

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20184 N

Thema

Synthese verschiedener Sensorik (E-SynchroBot)

Berichtszeitraum

01.11.2018 – 31.03.2021

Forschungsvereinigung

Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsstelle 1: Technische Hochschule Ingolstadt

Zentrum für Angewandte Forschung (ZAF)

Forschungsstelle 2: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)

Gefördert durch:

Synthese verschiedener Sensorik (E-SynchroBot)

Vorhaben Nr. 20184 N

Kostenorientierte Synthese verschiedenartiger Sensorik für den sicheren Einsatz von fahrerlosen Schleppern im Indoor- und Out-doorbereich bei Mischverkehr

Abschlussbericht

Management Summary:

Fahrerlose Schlepper in der Intralogistik ermöglichen eine zuverlässige und planbare Verketzung von Produktion und Logistik in modernen Produktionsumgebungen. Dabei stellen historisch gewachsene Layouts hohe Anforderungen an die überganglose Navigation und Ortung fahrerloser Systeme sowie die Sicherheit im Mischverkehr, die bisher mit kostenintensiven Sensoren, niedrigen Betriebsgeschwindigkeiten und zahlreichen Infrastrukturmaßnahmen sichergestellt wird.

Im Rahmen des Forschungsprojektes E|SynchroBot wurde daher der Einsatz kosteneffizienter Sensoren und einer dynamischen Sensordatenfusion für die Anwendung an fahrerlosen Schleppern untersucht. Dabei entstand ein ganzheitliches Konzept für die Digitalisierung der Einsatzumgebung mit inhärenter Informationsspeicherung, die mit unterschiedlichen Messprinzipien, der gewichteten Sensordatenfusion und entsprechenden Hardware- und Softwarekomponenten den sicheren Einsatz für fahrerlose Schlepper perspektivisch möglich macht. Das Konzept wurde dabei in enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses in der Form eines Funktionsdemonstrators umgesetzt und evaluiert.

Das Ziel des Forschungsprojektes **ist erreicht** worden.

Umfang des Berichtes:	122 Seiten, 57 Abbildungen, 19 Tabellen, 93 Literaturquellen
Laufzeit:	01.10.2018 bis 31.03.2021
Zuschussgeber:	BMW/IGF-Nr. 20184 N
Forschungsstelle 1:	Technische Hochschule Ingolstadt Forschungsförderung, -transfer und -controlling (FORTEC) [ehemals Zentrum für angewandte Forschung (ZAF)] Projektleiter: Prof. Dr. Peter Schuderer Nachfolgend FST1
Forschungsstelle 2:	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) Projektleiter: Prof. Dr. Jörg Franke Nachfolgend FST 2
Bearbeiter und Verfasser:	Lukas Baier (FST1) Dr.-Ing. Toni Donhauser (FST1) Prof. Dr. rer. pol. Peter Schuderer (FST1) Meike Herbert (FST2) Sebastian Kaßner (FST2) Andreas Willums (FST2) Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke (FST2) Maximilian Zwingel (FST 1 und 2)
Studentische Arbeiten im Rahmen des Projektes:	
M. Abdallah	Konzeption, Umsetzung und Validierung einer hardwarenahen Kollisionsabsicherung für autonome Routenzüge auf Basis von kosteneffizienten Sensoren
C. Atzinger	Entwicklung und praktische Umsetzung eines Konzepts zur sensorischen Umgebungserfassung fahrerloser Schlepper
D. Aydin	Analyse der Sensorsysteme für fahrerlose Transportfahrzeuge unter Berücksichtigung der Personen- und Anlagensicherheit
M. Biemüller	Konzeption, Umsetzung und Evaluation eines statischen Zustandsautomaten für einen dynamischen Einsatz autonomer Routenzüge
K. Böhner:	Studie zu Einflussfaktoren und Wirkungsprinzipien kontaktloser Sensorik im Bereich der fahrerlosen Intralogistik mit Fokus auf Outdoor-Szenarien
Y. Chen	Primäre Einflussfaktoren für die Zuverlässigkeit unterschiedlicher SLAM-Verfahren im Innen- und Außenbereich
C. Czapka	Development of a reliable multi-source localization system for indoor and outdoor navigation of mobile robots

N. Emmrich:	Prototypische Konzeptionierung und Evaluation einer energieautarken Sensorsystemlösung zur Parameterdefinition fahrerloser Schleppersysteme im Outdoorbereich
X. Huang:	Konzeption und Validierung einer adaptiven Nahfunkortung auf Basis von UWB-Technik
X. Huang	Entwurf und Umsetzung eines wissenschaftlichen Transportmittelkonzeptes für die autonome Sternversorgung mit fahrerlosen Transportentitäten
M. Kraus	Untersuchung der Eignung von RADAR-basierten Sensoren für die sichere Ortung und Navigation von fahrerlosen Schleppersystemen im Außenbereich
M. Mahler:	Studie zu Wirkungsprinzipien kontaktloser Sensorik für die Ortung fahrerloser Schleppersysteme im Indoorbereich mit Fokus auf der Schnittstelle zum Outdoorbereich
C. May	Analyse und Anwendung relevanter Richtlinien für die Sicherheitsbeurteilung der Fusion kosteneffizienter Sensoren im Kontext autonomer Schleppersysteme
A. Mönius:	Konzeption, Umsetzung und Evaluation eines Verfahrens zur dynamischen Rekonfiguration autonomer Routenzüge
M. Richter:	Analyse und Generalisierung marktverfügbarer Schlepperlösungen und gesetzlicher Anforderungen mit dem Ziel der Umsetzung eines Demonstrators für fahrerlose Schleppersysteme
J. Schöpplein:	Konzeption und Validierung einer outdoorfähigen Navigationslösung für fahrerlose Transportroboter in flexiblen Szenarien
S. Wang	Konzeption, Umsetzung und Evaluation einer Welttroutenplanung für autonome Routenzugsysteme
M. Zhengqi:	Konzeption und Umsetzung einer dreidimensionalen Hindernisdetektion basierend auf der Fusion optischer SLAM-Verfahren
Y. Zhao	Evaluation autonomer Shuttlesysteme – Analyse bestehender Lösungen und das Potential der Technologie
P. Ziegler:	Konzeption und prototypische Implementierung einer Navigationslösung für autonome Schleppersysteme im Innenbereich

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkungen	12
2	Einleitung	13
2.1	Problemstellung.....	13
2.2	Arbeitshypothese	15
3	Stand der Forschung und Entwicklung.....	17
3.1	Positionsbestimmung und Ortung fahrerloser Schleppersysteme	17
3.1.1	Sensoren für die Ortung fahrerloser Schleppersysteme	19
3.1.2	Einflüsse auf Sensoren im Innen-, Übergangs- und Außenbereich.....	21
3.1.3	Fusion von Sensordaten für die Ortung von fahrerlosen Schleppersystemen.....	23
3.1.4	Performance kosteneffizienter Sensoren und Skaleneffekte.....	24
3.2	Pfadplanung und Navigation von fahrerlosen Schleppersystemen	25
3.3	Sicherheits-Sensorik zur Kollisionsvermeidung	27
3.4	Autonome Schleppersysteme im hallenübergreifenden Einsatz.....	29
4	Lösung der Arbeitspakete	31
4.1	Definition eines übergangslosen Ortungs- und Navigationskonzeptes.....	31
4.1.1	Anforderungen an ein übergangsloses Ortungs- und Navigationskonzept	32
4.1.2	Vollständige Digitalisierung der Einsatzumgebung	32
4.1.3	Übergangslose Ortung unter Berücksichtigung der Einsatzumgebung	37
4.1.4	Übergangslose Navigation basierend auf der Einsatzumgebung.....	38
4.1.5	Rekonfigurationsfähiger Zustandsautomat für die Steuerung des Verhaltens	40
4.1.6	Zusammenfassung des Konzeptes für den Betrieb fahrerloser Schlepper im Innen und Außenbereich mit kosteneffizienten Sensoren	42
4.2	Realisierung einer übergangslosen Ortung innerhalb eines Labordemonstrators.....	43
4.2.1	Einführung in den Labordemonstrator „Robotino“ zur Umsetzung der Lagekopplung	43
4.2.2	Einführung in den Labordemonstrator Linde P50lon zur Umsetzung der Lagepeilung und der übergangslosen Ortung.	44
4.2.3	Vorstellung der Sensoren und Verfahren für die Lagekoppelung im Kontext der übergangslosen Ortung	47
4.2.4	Sensoren und Verfahren für die Lagepeilung im Kontext der übergangslosen Ortung.....	50

4.2.5	Vorstellung der dynamischen Fusion basierend auf Kovarianzen zur übergangslosen Ortung	55
4.2.6	Evaluierung der Ansätze der Lagekopplung basierend auf kosteneffizienten Sensoren	57
4.2.7	Validierung der Ansätze der Lagepeilung basierend auf kosteneffizienten Sensoren	63
4.2.8	Evaluierung der gesamten übergangslosen Ortung im Innen- und Außenbereich anhand des Labordemonstrators	71
4.2.9	Zusammenfassung der Realisierung der übergangslosen Ortung innerhalb eines Labordemonstrators	74
4.3	Sondierung potentiell sicherer Sensorik und Konzeptionierung eines ökonomischen, sicheren Gesamtsystems	74
4.3.1	Analyse der sicherheitsrechtlichen Anforderungen an den Einsatz fahrerloser Schleppersysteme	74
4.3.2	Relevante Normen für fahrerlose Schlepperfahrzeuge ohne Bezug auf die Detektion von Personen.....	78
4.3.3	Auswertung der definierten Sensorkonzepte im Kontext der Sicherheitsanforderungen	79
4.4	Fusion des „unsicheren“ Ortungskonzeptes mit der potentiell sicheren Personendetektion zu einem sicheren Gesamtsystem.....	84
4.4.1	Vorbereitung der potentiell sicheren Sensorik zur Verknüpfung mit der Ortungslösung	84
4.4.2	Zusammenführung der potentiell sicheren Sensorik sowie der digitalisierten Einsatzumgebung zu einem potentiell sicheren Gesamtsystem	84
4.4.3	Validierung der Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit sowie Testläufe mit dem Funktionsdemonstrator.....	89
4.4.4	Zusammenfassung der Fusion des unsicheren Ortungskonzeptes und der potentiell sicheren Personendetektion	98
4.5	Realisierung und Test der Ortungslösung an einem Funktionsdemonstrator	99
4.5.1	Physischer Aufbau	99
4.5.2	Evaluation des Gesamtsystems.....	106
5	Verwendung der Zuwendungen	109
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	110
7	Bewertung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU und ihre Anwendungsmöglichkeiten	111
8	Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	113
8.1	Transfermaßnahmen in der Laufzeit des Forschungsprojektes	113

8.2 Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens.....	114
9 Zusammenfassung und abschließende Bewertung.....	116
10 Literatur	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Umsatzentwicklung fahrerloser Transportroboter mit Logistikbezug weltweit nach [1]	13
Abbildung 2: Schwerpunkte des Forschungsprojektes E SynchroBot	16
Abbildung 3: Grundlagen der Ortung, die Lagepeilung (links) und Lagekopplung (rechts)	18
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Sensorerfassung und Informationsverarbeitung einer IMU nach [7]	19
Abbildung 5: Der fahrerlose Schlepper TractEasy der Firma EasyMile [50]	29
Abbildung 6: Konzept der vollständigen Digitalisierung der Einsatzumgebung, eigene Abbildung aus [39]	33
Abbildung 7: Verwendete Onboard-Sensorik zur Umfelderkennung im Rahmen des Konzeptes	37
Abbildung 8: Hierarchischer Ansatz für die übergangslose Navigation fahrerloser Schlepper	39
Abbildung 9: Rekonfigurationsfähiger Zustandsautomat für die übergangslose Ortung und Navigation	41
Abbildung 10: Beispielhafte Konfigurationen eines fahrerlosen Schleppers im hallenübergreifenden Einsatz bei Mischverkehr	42
Abbildung 11: Labordemonstrator Robotino mit den Sensoren für die Realisierung einer übergangslosen Ortung	44
Abbildung 12: Bewegungsmodell der zweiten Applikationsplattform	45
Abbildung 13: Schematische Darstellung der Drehachse für die zweite Applikationsplattform	45
Abbildung 14: Setup der zweiten Applikationsplattform mit den Sensoren für die Lagekopplung und Lagepeilung	46
Abbildung 15: Umgebungserfassung der Intel Realsense T265	47
Abbildung 16: Schematischer Ablauf der Lagepeilung mittels adaptivem Monte Carlo Filter ..	51
Abbildung 17: Exemplarische Darstellung der Referenzen für die übergangslose Ortung	55
Abbildung 18: Darstellung der relevanten Referenzen sowie deren Relation für die übergangslose Ortung	56
Abbildung 19: Darstellung der beiden EKF-Filter für die Lagepeilung und Lagekopplung basierend auf den entsprechenden Eingangsdaten	57
Abbildung 20: Resultierende Trajektorien für die Lagekopplung unter Nutzung kosteneffizienter Sensoren	59
Abbildung 21: Testaufbau für die Evaluierung des Closed Loop-Test	60
Abbildung 22: Schematische Darstellung des dynamischen Bewegungskonzeptes	61

Abbildung 23: Darstellung der einzelnen Trajektorien der Lagekopplung für einen repräsentativen Testlauf des dynamischen Bewegungsszenarios.....	62
Abbildung 24: Darstellung der Trajektorien eines repräsentativen Testlaufes als überlappendes Gesamtbild	62
Abbildung 25: Qualitative Ergebnisse des hallenübergreifenden Einsatzes der Lagekopplung ohne Zurücksetzen der Referenz mit stark erhöhter Kovarianz der LIDAR-ICP-Schätzung im Kontext des Außenbereiches	64
Abbildung 26: Kovarianz der Ortung mit AMCL für $t=0$ s	64
Abbildung 27: Kovarianz der Ortung mit AMCL für $t = 13$ s mit tatsächlicher Pose des Labordemonstrators (oranger Kreis)	65
Abbildung 28: Kovarianz der Ortung mit AMCL für $t = 32$ s mit tatsächlicher Pose des Labordemonstrators (oranger Kreis) sowie dem Sektor der Bewegung (hellgraues Rechteck)	65
Abbildung 29: Kovarianz der Ortung mit AMCL für $t = 40$ s mit der tatsächlichen Pose des Labordemonstrators (oranger Kreis) und der schematischen Darstellung der Trajektorie.....	66
Abbildung 30: Empirische Bestimmung der Metrik für die Kovarianz der Ortungslösung basierend auf UWB mit den eingemessenen Positionen (grau), den Messungen mit 3 Empfängern (orange) und vier Empfängern (blau), jeweils mit Standardabweichungen in x- und y-Richtung.....	67
Abbildung 31: Genauigkeit der Ortung mittels UWB für 8 Abstände zum Zentrum des Abdeckungsgebietes. Graue Punkte stellen die eingemessenen Positionen des Senders dar, blaue Punkte die Lagepeilung mit 3 Empfängern und orangene Punkte die Lagepeilung mit 4 Empfängern	68
Abbildung 32: Verhalten der Ortung mittels UWB bei Störeinflüssen durch eine Person (links) und ohne (rechts).....	68
Abbildung 33: Trajektorien der Ortung basierend auf Lagekopplung und UWB für einen exemplarischen Testlauf.....	69
Abbildung 34: Vollständige Trajektorie sowie die Kovarianzen der Ortung basierend auf der Lagepeilung des UWB-Systems	70
Abbildung 35: Visualisierung der übergangslosen Ortung beim Übergang in den Außenbereich.....	71
Abbildung 36: Visualisierung der übergangslosen Ortung im Außenbereich (Legende wie Abbildung 35).....	72
Abbildung 37: Visualisierung der übergangslosen Ortung nach Rückkehr und Durchfahren des Transitbereiches.....	72
Abbildung 38: Exemplarische Evaluierung unterschiedlicher Sensoren für die Detektion von Hindernissen im Fahrweg	81
Abbildung 39: Sensorbox für die Fusion unterschiedlicher Sensoren im Kontext der IEC TS 62998(oranger Kreis)	82

Abbildung 40: Sicherheitsbereich (rot) sowie die Erfassungsbereiche der ultraschallbasierten- (pink) und infrarotbasierten (blau) Sensoren.....	83
Abbildung 41: Zusammenführung des Konzeptes der vollständigen Digitalisierung der Einsatzumgebung sowie der Sensoren für die übergangslose Ortung und Navigation und der potentiell sicheren Sensorik.....	85
Abbildung 42: Exemplarischer Entscheidungsbaum zur organisatorischen Absicherung des sicheren Betriebs fahrerloser Schlepper in Abhängigkeit der aktuellen Umgebungsbedingungen	86
Abbildung 43: Simulation des Gesamtsystems in der Umgebung Gazebo zur Evaluation der Sicherheit.....	90
Abbildung 44: Aufnahme der Prüfkörper A und B	92
Abbildung 45: Durchführung der Prüfungen gemäß der EN ISO 3691-4 am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik in Erlangen.....	93
Abbildung 46: Exemplarische Darstellung der Sensorik zur rotatorischen Absicherung mittels kosteneffizienter Sensoren	95
Abbildung 47: Prüfaufbau zur Prüfung der Detektionsfähigkeit unter Einfluss von weiß strahlendem Licht.....	96
Abbildung 48: Funktionsdemonstrator des Forschungsprojektes E SynchroBot	99
Abbildung 49: Module für den übergangslosen Betrieb eines fahrerlosen Schleppers bei Mischverkehr.....	100
Abbildung 50: Umfeld des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik mit einem Satellitenbild hinterlegt (links) und als reine knotenbasierte Darstellung (rechts)	101
Abbildung 51: Definition der befahrbaren Bereiche für fahrerlose Schlepper basierend auf klassischen Bildverarbeitungsmethoden und dem Einsatz von KI-Algorithmen.....	103
Abbildung 52: Darstellung der Pfadplanung der mittleren Hierarchiestufe im Innenbereich basierend auf einer probabilistischen Landkarte	103
Abbildung 53: Navigation im Innenbereich, Links die Sensordaten der Realsense D435i, rechts die resultierende Hinderniskarte mit den farbigen Oktaedern basierend auf der Höhe der Hindernisse sowie der ausgeführten Trajektorie (grüne Linie).....	104
Abbildung 54: Kommunikationskette für die Mitteilung externer Wetterparameter an den fahrerlosen Routenzug zur Definition der Umgebungseinflüsse	105
Abbildung 55: Anbringung der Warneinrichtung sowie der Notfall-Stromversorgung in der Form eines Bosch-Akkus	106
Abbildung 56: Ausschnitt einer exemplarischen Evaluierungsfahrt mit den Sensorinformationen sowie der Navigation und Ortung des Systems	107
Abbildung 57: Evaluation des Systemverhaltens bei mehreren Wetterwechseln	108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sensoren für die Ortung fahrerloser Schleppersysteme sowie deren Eignung im Innen- und Außenbereich	22
Tabelle 2: Eigenschaften unterschiedlicher IMUs in Relation zu deren Preis basierend auf [25]	25
Tabelle 3: Relevante Normen für den sicheren Betrieb fahrerloser Schleppersysteme	27
Tabelle 4: Einflussfaktoren durch Witterungsbedingungen für fahrerlose Schlepper.....	34
Tabelle 5: Bewertung der Sensoren zur Umfelderkennung basierend auf den Witterungsbedingungen	35
Tabelle 6: Verwendete Komponenten zur Umgebungserfassung mit kosteneffizienten Sensoren	36
Tabelle 7: Evaluation der Genauigkeit unterschiedlicher Verfahren für die Lagekopplung bei linearer Bewegung	58
Tabelle 8: Prozentualer Fehler pro zurückgelegtem Meter.....	59
Tabelle 9: Rotatorische Genauigkeit der Lagekopplung	60
Tabelle 10: Ergebnisse der Lagekopplung im Closed-Loop Test.....	63
Tabelle 11: Evaluation der Lagepeilung mit einem kosteneffizienten UWB-System: Versatz zwischen der realen Pose, der Lagepeilung und der Ortung basierend auf den fusionierten Lagekopplungen.....	70
Tabelle 12: Ergebnisse der übergangslosen Ortung im Innen und Außenbereich nach Rückkehr zum definierten Startpunkt	73
Tabelle 13: Verwendete Sensoren sowie deren Spezifikationen für die Überprüfung relevanter Messprinzipien	79
Tabelle 14: Auftretende Umweltbedingungen, nach [64].....	87
Tabelle 15: Mittlere prozentuale Messabweichung der Ultraschallsensoren zwischen 20,0°C und 5,0°C für Abstandsmessungen ohne Korrekturterm der Temperatur	95
Tabelle 16: Testplan zu Prüfung E	97
Tabelle 17: Vergleich der Standardabweichung des Laserscanners ohne und mit Blendung..	97
Tabelle 18: Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Projektes	113
Tabelle 19: Geplante Transfermaßnahmen nach Abschluss des Projektes	115

1 Vorbemerkungen

Das Vorhaben „Kostenorientierte Synthese verschiedenartiger Sensorik für den sicheren Einsatz von fahrerlosen Schleppern im Indoor- und Outdoorbereich bei Mischverkehr“ wurde im Förderzeitraum vom 01.10.2018 bis 31.03.2021 unter der Leitung von Prof. Dr. Peter Schuderer an der Technischen Hochschule Ingolstadt (FST1) und Prof. Dr. Jörg Franke am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg (FST2) durchgeführt. Im Zusammenhang mit der Forschungsfrage wurden 20 Abschlussarbeiten verfasst, die sich wie folgt gliedern:

- 2 Studienarbeiten
- 6 Bachelorarbeiten
- 4 Projektarbeiten
- 8 Masterarbeiten

Im Rahmen des Projektes wurden die Ideen und Erkenntnisse des Forschungsbetriebes fortlaufend den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses kommuniziert und mit ihnen diskutiert. Neben den vier regulären Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses wurden dabei fünf informelle Berichte über den Fortschritt des Projektes mit anschließender Möglichkeit zum kritischen Austausch versandt. Durch die gezielte Unterstützung des Projektes vonseiten der Unternehmen im Projektbegleitenden Ausschuss war es trotz der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie möglich, die Ziele des Forschungsprojektes erfolgreich zu erreichen. An dieser Stelle noch einmal vielen Dank allen Projektpartnern für die Bereitstellung von Geräten, die Durchführung von Versuchen an den Forschungseinrichtungen und die zahlreichen digitalen Austauschmöglichkeiten, die geschaffen wurden.

Das IGF-Vorhaben 20184 N der Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e.V. wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurde gemäß Arbeitsplan des Projektantrages in sechs Arbeitspakete unterteilt. Der vorliegende Projektbericht greift dabei die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete auf und verzahnt diese zu einer ganzheitlichen Betrachtung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens. In Kapitel 2 wird eine Einführung in die Problematik des sicheren Einsatzes kosteneffizienter Sensoren im Kontext mit fahrerlosen Schleppersystemen im Indoor- und Outdooreinsatz bei Mischverkehr gegeben. Kapitel 3 stellt darauf aufbauend den Stand von Wissenschaft und Technik in den identifizierten Problemfeldern der Digitalisierung der Einsatzumgebung, der übergangslosen Ortung und der kosteneffizienten Sensorik dar. Anschließend werden in Kapitel 4 die untersuchten Lösungsansätze für die genannten Probleme beschrieben und diese exemplarisch anhand eines Funktionsdemonstrators sowie eines Anwendungsfalls erläutert. In den Kapiteln 5 bis 7 werden die Mittelverwendung, deren Notwendigkeit und Angemessenheit sowie der damit erzielte wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Nutzen der erzielten Ergebnisse dargestellt. Kapitel 8 gibt einen Überblick der durchgeführten Maßnahmen für den Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft, bevor Kapitel 9 diesen Projektbericht mit einer Zusammenfassung abschließt.

2 Einleitung

2.1 Problemstellung

Die betriebliche Intralogistik ist ein wichtiger Befähiger für moderne Unternehmen, um sich in globalisierten und umkämpften Geschäftsfeldern zu behaupten. Neue Formen der Gestaltung von Produktionsumgebungen, wie beispielsweise die Matrixproduktion, stellen dabei die Intralogistik in das Zentrum des Produktionsprozesses. Die erreichte Flexibilität durch eine dynamische Verkettung der einzelnen Anlagen in Verbindung mit geeigneten Informationsflüssen ermöglicht die Beherrschung hoher Variantenzahlen sowie eine reaktive und dynamische Produktion.

Im Kontext eines zunehmenden Fachkräftemangels steigt der Anteil fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) in den Bereichen des Warehousing und der Versorgung innerhalb der Produktion in den vergangenen Jahren kontinuierlich an. Die Vereinigung WorldRobotics prognostiziert daher basierend auf einem bestätigten Umsatzvolumen von 3,7 Milliarden \$ für fahrerlose Transportroboter mit Logistikbezug im Jahr 2018 ein beständiges Wachstum für die kommenden Jahre, wie Abbildung 1 zeigt.



Abbildung 1: Umsatzentwicklung fahrerloser Transportroboter mit Logistikbezug weltweit nach [1]

Bei der Betrachtung der Einsatzumgebungen von FTF-Projekten zeigt sich eine überwiegende Umsetzung in Greenfield-Planungen, wobei die Produktion und Materialflüsse in der Intralogistik als Gesamtsystem optimiert werden können. In historisch gewachsenen Einsatzumgebungen hingegen stellen die besonderen Werksstrukturen große Anforderungen an FTF-Systeme. Insbesondere bei KMU entstehen mit entsprechenden Umsatzsteigerungen zweckmäßige Neubauten, die sich primär an den notwendigen Produktionsmitteln und der verfügbaren Fläche orientieren. Die Intralogistik folgt im Planungsprozess nachgelagert und muss sich meist den vorrangigen Planungsstufen fügen.

Hieraus resultieren zahlreiche Anforderungen an die Intralogistik als Bindeglied zwischen einzelnen Produktionsstufen sowie den Lägern für die Materialversorgung. Verteilte Layouts erfordern einen Betrieb im Innen- und Außenbereich sowie ein reaktives und dynamisches Verhalten der Transportlösung. Für FTF ergeben sich somit Herausforderungen insbesondere in

der Ortung, Navigation und Kollisionsvermeidung, die abhängig von den Umgebungsbedingungen einen sicheren Betrieb der Fahrzeuge ermöglichen müssen.

Für den ausschließlichen Einsatz in Indoor-Umgebungen existiert bereits eine Vielzahl von FTF für die dynamische Materialversorgung. Diese Systeme setzen auf standardisierte und zertifizierte Lösungen für die genannten Anforderungen, ermöglichen jedoch keinen Betrieb bei wechselnden Umgebungsbedingungen, wie sie im Außenbereich vorliegen. Auf der anderen Seite existieren auch FTF, die ausschließlich für den Einsatz in Outdoor-Umgebungen vorgesehen sind. Diese Lösungen entsprechen dabei nicht den Anforderungen des Innenbereiches in Hinblick auf Infrastruktur, realisierbare Geschwindigkeiten und Dynamik des Systems. [2]

Als zentrales Bindeglied der Materialversorgung im gemischten Innen- und Außeneinsatz eignet sich der Einsatz von einzelnen FTF als Individualtransportmittel aus Effizienzgründen nur in Sonderfällen, da die Wirtschaftlichkeit von Einzeltransporten mit der Transportlänge und geringem Bündelungsgrad stark abnimmt. Der Einsatz von fahrerlosen Schleppersystemen im hallenübergreifenden Materialtransport verspricht hier entsprechende Vorteile bei großen Transportmengen und gebündelten Transportrouten.

Der bisher lediglich sporadische Einsatz von fahrerlosen Schleppersystemen im kombinierten Indoor- und Outdoor-Betrieb ist dadurch bedingt, dass kostengünstige Lösungen für die kontaktlose Absicherung von fahrerlosen Systemen unter variablen Umweltbedingungen kommerziell nicht verfügbar sind. Bestehende Systeme setzen für die kontaktlose Absicherung auf redundante und eigens entwickelte Sensoren, die einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz fahrerloser Schlepper nur in hochspezifischen Anwendungsfällen ermöglichen. Der Einsatz von Kontaktsensoren für die Sicherheitsfunktion von fahrerlosen Schleppern ist ebenfalls aufgrund der damit verbundenen Einschränkungen der Betriebsgeschwindigkeit meist wirtschaftlich nicht sinnvoll. Kontaktlose Sicherheitseinrichtungen sind meist für einen speziellen Anwendungsfall und dessen Umgebungseinflüsse optimiert und zeigen daher signifikante Nachteile, wenn sie in anderen Domänen eingesetzt werden. Innerhalb von Produktionsgebäuden wird die Personensicherheit beispielsweise in der Regel mit Laserscannern realisiert, welche im Outdoor-Betrieb bei schlechter Witterung wie Starkregen oder Schnee allerdings nicht mehr geeignet sind, um einen sicheren Betrieb mit wirtschaftlichen Geschwindigkeiten zu ermöglichen.

Typischerweise wechseln gegenwärtige Applikationen, die in beiden Bereichen operieren sollen, im Übergangsbereich das Sensorkonzept. Ein Beispiel ist die Indoor-Absicherung mittels Laserscanner in Kombination mit der Absicherung über einen konventionellen Bumper im Außenbereich. Dies geht allerdings mit einer signifikanten Reduktion der maximal zulässigen Geschwindigkeit einher, da der Reaktions- und Bremsweg des Systems in Abhängigkeit einer verträglichen Bumperlänge abgestimmt werden muss. Das Sicherheitskonzept beruht somit auf der Rückmeldung eines einzelnen Sensors, der die Personensicherheit im zugehörigen Arbeitsbereich sicherstellt. Eine Kombination unterschiedlicher Sensorkonzepte mit einer gegenseitigen Plausibilisierung der Sensorergebnisse und einer Auswertung des Sicherheitsbereichs durch die Fusion der einzelnen Daten ist aktuell im Bereich fahrerloser Schleppersysteme nicht kosteneffizient verfügbar.

Die unterschiedlichen Umgebungs- und Einsatzbedingungen im Innen- und Außenbereich erfordern im Hinblick auf die Anforderungen von KMU an dynamische Intralogistiksysteme neue Ansätze für die übergangslose Navigation von fahrerlosen Schleppersystemen. Lösungen aus dem Innen- oder Außenbereich lassen sich nur in Einzelfällen auf die jeweils andere Umgebung erweitern und sind somit nicht übergangslos anzuwenden. Verfügbare Applikationen setzen analog zu der Realisierung der Betriebssicherheit auf einen Wechsel der verwendeten Sensoren und Algorithmen mit entsprechenden Stillstandszeiten im Übergang. Die damit verbundenen Verluste in der Transportleistung sowie die physikalische Blockade von Transportwegen sind in der Realität meist nicht vertretbar, was die Verbreitung von fahrerlosen Schleppersystemen zusätzlich einschränkt. [3]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für den wirtschaftlich sinnvollen Einsatz von fahrerlosen Schleppern in der Intralogistik von KMU eine sichere Lösung der übergangslosen Lokalisierung und Navigation unter Verwendung kosteneffizienter und berührungslos wirkender Sensoren notwendig ist. Um für den Einsatz in Unternehmen, insbesondere KMU in Frage zu kommen, müssen die folgenden Kriterien durch eine entsprechende Lösung erfüllt werden:

- **Wirtschaftlichkeit:** Das fahrerlose Schleppersystem muss für verschieden Einsatzumgebungen und –szenarien wirtschaftlich implementiert und betrieben werden können.
- **Ressourceneffizienz:** Wechselnde Einsatzumgebungen und Flexibilität im Betrieb müssen ohne weitere Infrastruktur oder Adaptionen realisiert werden.
- **Gesetzliche Rahmenbedingungen:** Die Lösung für ein fahrerloses Schleppersystem muss die gesetzlichen Anforderungen und Rahmenbedingungen erfüllen.
- **Universalität:** Insbesondere für KMU ist es notwendig, dass die Lösung autark und somit ohne großen Implementierungsaufwand einsetzbar ist.
- **Reaktivität:** Im Kontext von Mischverkehr ist die Reaktivität des Systems das Maß für den erfolgreichen Betrieb bei unvorhergesehenen und dynamischen Ereignissen.

2.2 Arbeitshypothese

Das Ziel des Forschungsvorhabens bestand in der Entwicklung eines Konzeptes für den hallenübergreifenden Einsatz von fahrerlosen Schleppersystemen unter Verwendung von kosteneffizienten Sensoren und einer intelligenten Sensordatenfusion. Aus dem in diesem Projektbericht detaillierten Stand der Wissenschaft und Technik ergibt sich die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Digitalisierung der Arbeitsumgebung mit inhärenter Informationscodierung sowie einer beständigen Erfassung von Umgebungsparametern für einen universellen Ansatz der Inbetriebnahme und des kontinuierlichen Betriebs von fahrerlosen Schleppersystemen in dynamischen Umgebungen. Durch das Wissen des fahrerlosen Schleppers über die jeweils vorliegenden Umweltbedingungen zu jedem Zeitpunkt wird eine informierte Fusion der Sensordaten zum Zwecke der Ortung und des potentiell sicheren Betriebs möglich. Das entwickelte Gesamtkonzept für den sicheren Einsatz fahrerloser Schleppersysteme adressiert dabei die in Abbildung 2 dargestellten Schwerpunkte in ganzheitlicher Weise.

Das entwickelte Konzept für die übergangslose Ortung nutzt absolute Referenzen aus der digitalisierten Einsatzumgebung für die durchgängige Positionsbestimmung unter Verwendung der unterschiedlichen Teil-Ortungssysteme und einer Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der Sensoren unter den aktuell gegebenen Einsatzbedingungen. Durch die Fusion der

Sensordaten unter Beachtung der Umgebungsparameter kann somit eine zuverlässige Positionsbestimmung erreicht werden. Im Bereich der Pfadplanung und Navigation ermöglicht das ganzheitliche Konzept die flexible Navigation fahrerloser Schlepper unter Nutzung verschiedener Ansätze für Innen-, Übergangs- und Außenbereiche. Für den potentiell sicheren Betrieb des Gesamtsystems werden kosteneffiziente Sensoren zur Kollisionsvermeidung eingesetzt und Schwächen einzelner Messprinzipien durch Fusion sublimiert. Anwendungsbezogen lässt sich so unter Berücksichtigung der realen Umgebungsbedingungen ein potentiell sicherer Betrieb gewährleisten. Die Integration aller Teilsysteme in Software und Hardware durch einen Funktionsdemonstrator stellt den letzten wesentlichen Schwerpunkt des Forschungsprojektes und somit dieses Abschlussberichtes dar.

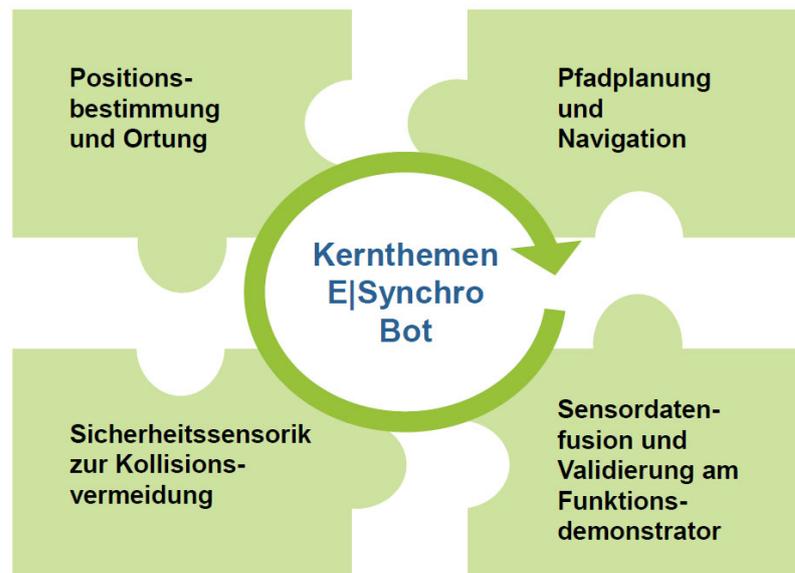


Abbildung 2: Schwerpunkte des Forschungsprojektes E|SynchroBot

Im Kontext der Schwerpunkte wurde das Projekt von den beiden Forschungsstellen entsprechend der jeweiligen Kompetenzen in engem Austausch bearbeitet. Das Resultat ist ein abgestimmtes und funktionales Gesamtkonzept, welches durch seine Modularität in einer Vielzahl von Anwendungsfällen eingesetzt werden kann. Mit ihm ist ein potentiell sicherer Einsatz von fahrerlosen Schleppern im Innen- und Außenbereich bei Mischverkehr möglich.

3 Stand der Forschung und Entwicklung

Der Ortung von fahrerlosen Transportfahrzeugen kommt als Grundlage für die Navigation eine besondere Bedeutung im Bereich der autonomen Intralogistik zu. In Kapitel 3.1 werden daher bestehende Sensoren und Konzepte für die Ortung fahrerloser Systeme vorgestellt. Anforderungen des hallenübergreifenden Einsatzes sowie die Herausforderungen der Fusion von unterschiedlichen Ortungsansätzen werden ebenfalls beleuchtet, um die Diskrepanzen bestehender Lösungen für den hallenübergreifenden Einsatz aufzuzeigen und die Notwendigkeit eines integrativen Ansatzes zu verdeutlichen.

In Kapitel 3.2 wird die Navigation von fahrerlosen Schleppersystemen und insbesondere die Lücke zwischen verfügbaren Lösungen der einzelnen Einsatzbereiche und den Anforderungen des hallenübergreifenden Einsatzes als zentrales Element des Betriebs fahrerloser Schlepper beleuchtet. Auch die besonderen Anforderungen von diesen Systemen als Teilmenge von Fahrerlosen Transportfahrzeugen mit den entsprechenden Einschränkungen der Freiheitsgrade in der Bewegung werden berücksichtigt. [4]

Die rechtlichen Anforderungen sowie bestehende Ansätze für die Absicherung von fahrerlosen Schleppersystemen werden in Kapitel 3.3 erläutert und im Hinblick auf den hallenübergreifenden Einsatz bewertet. In diesem Kapitel findet sich auch eine Aufarbeitung gängiger Ansätze der Fusion von Sensordaten. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf der Nutzung unterschiedlicher Sensorsysteme und der Fusion der Einzeldaten. Abschließend werden zwei Gesamtsysteme erörtert, die einen hallenübergreifenden Einsatz fahrerloser Schleppersysteme ermöglichen sollen.

3.1 Positionsbestimmung und Ortung fahrerloser Schleppersysteme

Das folgende Kapitel fasst den Stand der Technik in Bezug auf die Ortung fahrerloser Schleppersysteme zusammen. Basierend auf einer Erläuterung der Grundlagen für die Ortung werden mögliche Sensoren und Sensorkombinationen vorgestellt, die für den Zweck der Positionsbestimmung genutzt werden können. Bestehende Ansätze für die Fusion von Ortungsdaten sowie die Definition von gemeinsamen Referenzen werden erläutert und in Hinblick auf die besonderen Herausforderungen der überganglosen Ortung bewertet.

Grundlegend lässt sich die Position eines fahrerlosen Schleppersystems durch zwei fundamentale Konzepte feststellen, die Lagepeilung und die Lagekopplung. Die Lagepeilung bestimmt die Position eines messenden Systems im Raum über die Erfassung des Abstandes mit bekannten Marken zu jedem Zeitpunkt. [5] Die Messung des Abstands zu Marken kann dabei nach dem Prinzip der Laufzeitmessung oder über die Interferenz/Verzerrung von Signalen durchgeführt werden. Über eine Triangulation der gemessenen Abstände sowie die bekannten Positionen der Marken im Raum lässt sich somit die Position des Fahrzeuges bestimmen. Bei der Lagekopplung werden Änderungen des Systems über die Messdauer integriert, um Bewegungen in Relation zur Startreferenz zu erfassen. Die beiden Verfahren zur Ortung sind in Abbildung 3 dargestellt.

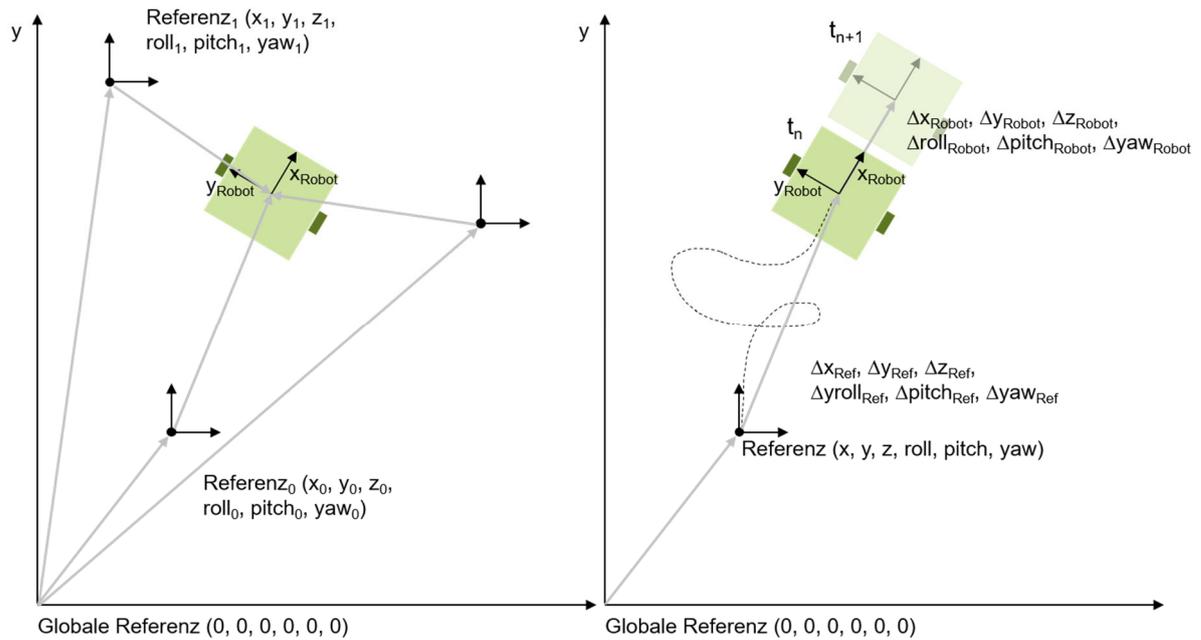


Abbildung 3: Grundlagen der Ortung, die Lagepeilung (links) und Lagekopplung (rechts)

Die Lagekopplung ermöglicht aufgrund des Messprinzips eine Lagebestimmung des Systems auch ohne exterozeptive Informationen, besitzt aber aus demselben Grund keine Möglichkeit der Korrektur von Sensor drift und Fehlmessungen. Dies bedeutet, dass sich Fehler in der sensorischen Erfassung oder mathematischen Verarbeitung propagieren und der Fehler zwischen der Ortung und der realen Position im Zeitverlauf zunimmt.

Die Lagepeilung ist auf externe Referenzen angewiesen, deren Positionen dem erfassenden System bekannt sein müssen. Fehler in der sensorischen Erfassung von Marken sind auf Messrauschen oder Interferenzen zurückzuführen, sodass im zeitlichen Verlauf keine Zunahme der Fehler zu erwarten ist. Kritisch ist bei dieser Art der Ortung eine Über- oder Unterbestimmtheit der Position durch zu viele oder zu wenige Referenzen.

Aufgrund der Unsicherheiten einzelner Sensoren und Ortungslösungen werden in bestehenden Ansätzen unterschiedliche Pose-Schätzungen unter Verwendung von Filtern fusioniert. Gaußsche Filter stellen einen Ansatz für die Ortung von Systemen mit bekannter Startposition und einer Normalverteilung des Rauschens der Sensoren dar. Hierbei wird basierend auf dem Bewegungsmodell des Schleppers (Zustandsübergangswahrscheinlichkeit) und einem Abgleich von Umgebungsmessungen (Auftrittswahrscheinlichkeit) die Position des Schleppers im Raum bestimmt. Für nichtlineare Sensor- und Bewegungsmodelle existieren verschiedene Methoden zur Approximation, wie der Erweiterte Kalman-Filter (EKF) und der Unscented Kalman-Filter (UKF) [6]

Bei unbekanntem Startpositionen ermöglichen Histogramm- und Partikelfilter eine Ortung des Systems basierend auf einer Wahrscheinlichkeitsverteilung über den gesamten Arbeitsraum. Dabei werden Zustände generiert und über das Bewegungsmodell sowie die sensorische Erfassung der Umgebung bewertet, sodass die Konzentration der Partikel im Umfeld der realen Position des Systems zunehmend konzentriert wird. [6]

3.1.1 Sensoren für die Ortung fahrerloser Schleppersysteme

Im Bereich der Lagekopplung bilden meist propriozeptive Sensoren, wie Drehzahlmesser oder inertielle Messeinheiten (IMU) die fundamentale Datenquelle für die Positionsbestimmung fahrerloser Schleppersysteme ab. Basierend auf der Integration von Veränderungen über den zeitlichen Horizont lässt sich hierbei die Position des erfassenden Systems in Abhängigkeit zu einer absoluten Referenz bestimmen. Im Bereich der Drehzahlmesser kann über die Auflösung des erfassenden Sensors und die Ablaumlänge des Rades die zurückgelegte Strecke des Rades bestimmt werden. Durch Sensoren an zwei oder mehr Rädern sowie die geometrische Abhängigkeit zwischen diesen lässt sich somit die Änderung des gesamten Systems berechnen. Durch eventuell existierenden Schlupf der Räder, den variablen Durchmesser durch Abrieb und Ungenauigkeiten bei der mathematischen Auswertung kommt es hierbei im zeitlichen Verlauf zu zunehmenden Abweichungen der Pose-Schätzung und der realen Position des Systems. Bei IMUs werden Beschleunigungen basierend auf der Trägheit des Sensors in statischen Feldern (Gravitation, Magnetfeld und Massenträgheit) gemessen und in entsprechende Informationen über die Bewegung des Systems übersetzt, wie in Abbildung 4 schematisch dargestellt wird. Auch hier treten durch Ungenauigkeiten bei der Erfassung der Beschleunigungen, der Transformation und der mathematischen Integration im Zeitverlauf wachsende Differenzen zwischen der errechneten Position und der realen Position des Systems auf.

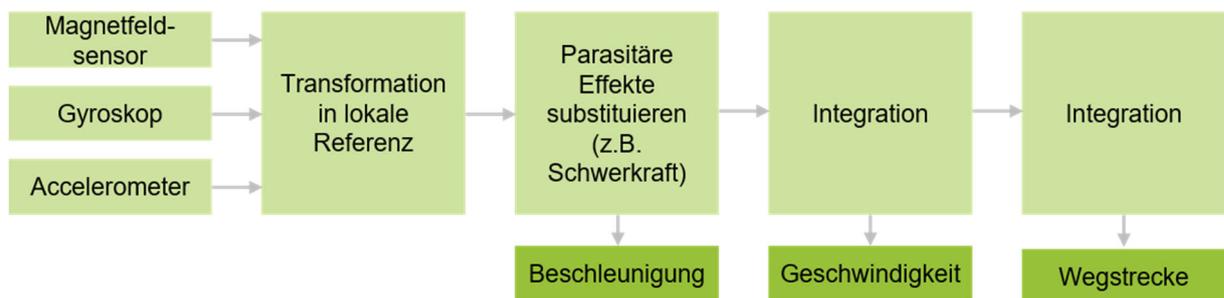


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Sensorerfassung und Informationsverarbeitung einer IMU nach [7]

In den letzten Jahren hat sich auch die Verwendung von Sensoren zur Umfelderkassung im Bereich der Lagekopplung verbreitet. Basierend auf der Annahme, dass sich die erfasste Umgebung zwischen zwei Messungen statisch verhält, lässt sich eine Änderung in den Messwerten auf die Bewegung des messenden Systems zurückführen. Hierbei werden Sensorsysteme mit einer hohen Informationsdichte wie beispielsweise Light Detection and Ranging-Systeme (LiDAR) oder Kameras benötigt, um zuverlässige Aussagen treffen zu können.

Im Bereich der Lagepeilung werden Sensoren genutzt, die eine absolute Erfassung von Marken als Referenzen ermöglichen. Als grundlegendes Messprinzip werden dabei elektromagnetische Wellen in unterschiedlichen Frequenzbereichen genutzt.

Ein LiDAR-Sensor sendet Impulse im oder nahe am Spektrum des optischen Lichtes aus. Ein entsprechender Sensor erfasst die Reflexion von erfassten Referenzen und berechnet über die Zeitdifferenz des Aussendens und des Empfangs der Reflexion die Laufzeit des Signals. Unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit als physikalische Konstante lässt sich so der Abstand zu den Marken ermitteln. LiDAR-Sensoren können, je nach Art und Bauweise als ein-, zwei- oder dreidimensionale Sensoren, für die Generation von Punktwolken genutzt werden um somit eine inkrementelle Darstellung von Referenzen im Raum zu realisieren.

Basierend auf den bekannten Positionen der künstlichen oder natürlichen Referenzen lässt sich dann die Position des messenden Systems über Triangulation bestimmen. Seit einigen Jahren sinken auch die Kosten für Festkörper-LiDAR, die eine dreidimensionale Erfassung des Messbereiches ohne bewegliche Komponenten ermöglichen. LiDAR-Sensoren eignen sich aufgrund der Frequenz des Messträgers besonders für die genaue Erfassung von optischen Merkmalen sowie natürlichen Referenzen, wie beispielsweise bauliche Begrenzungen. [8]; [9]

RADAR-Sensoren (Radio Detection and Ranging) nutzen Radiowellen für die Detektion von Referenzen analog zu LiDAR-Sensoren über die Laufzeit des Signals. Aufgrund der geringeren Wellenlänge des Messprinzips (Frequenzen von 26 GHz und 77 GHz) werden spezielle Marker benötigt, die durch den Sensor zuverlässig erfasst werden können. Durch die genutzten Wellenlängen von RADAR-Sensoren ist dieses Verfahren zudem sehr anfällig für Reflexionen und Interferenzen von Störeinflüssen. Die Lagepeilung ist daher nur in offenen Bereichen mit geringer Struktur und somit wenig Störpotentialen denkbar, insbesondere, wenn natürliche Referenzen genutzt werden sollen. [9]

Globale Navigationssysteme (GNSS) nutzen ebenfalls ein Laufzeitverfahren für die Positionsbestimmung, setzen hierbei aber auf zentrale Emittierer, die sich im Orbit der Erde befinden. Basierend auf dem übermittelten Zeitstempel der Signalausendung und der Position des referenzierten Satelliten kann der Empfänger die Laufzeit des Signals bestimmen. Durch den Empfang von Signalen mehrerer Satelliten lässt sich dabei die Position des Empfängers auf der Erdoberfläche über Triangulation berechnen. Die verwendeten elektromagnetischen Wellen befinden sich dabei im Frequenzbereich von 1.575,42 MHz, weshalb Abschirmungen durch Bauten sowie Reflexionen Probleme bei der korrekten Ortung verursachen können. In diesem Kontext soll auch das realtime kinematic differential-GNSS erwähnt werden, welches gegenüber dem klassischen GNSS eine höhere Genauigkeit erreichen kann. Das System, bestehend aus Satelliten und GNSS-Empfängern, wird hierbei durch kartografisch exakt vermessene Punkte mit GNSS-Antenne und -Empfänger (Referenzpunkte) sowie einer zusätzlichen Antenne auf dem zu ortenden Schlepper ergänzt. Da die per GNSS ermittelte Position von Referenzpunkt und Schlepper jeweils die gleiche Abweichung von der realen Position aufweist, ist eine Korrektur der Position des Schleppers möglich. Dazu wird zunächst die Abweichung der per GNSS ermittelten Position des Referenzpunktes von der bekannten Soll-Position bestimmt. Anschließend werden die Messdaten des Schleppers um diese Abweichung korrigiert. Die Datenerneuerungsrate beträgt bei verfügbaren Systemen in der Regel drei bis zehn Minuten. Durch Echtzeit-Auswertung der Trägerphase der empfangenen Satellitensignale im mobilen Empfänger kann die Genauigkeit der Messung weiter gesteigert und die Zeit der Verfügbarstellung verkürzt werden. Somit werden Abweichungen im Zentimeterbereich möglich.

Im Vergleich zu GNSS verwendet ein auf einem drahtlosen Netzwerk basierendes System ebenfalls Anker, die jedoch an festen lokalen Positionen platziert sind, anstelle von Satelliten in der Umlaufbahn. Die abgedeckte Fläche eines solchen Systems ist wesentlich geringer, das Funktionsprinzip bleibt jedoch gleich. Das Ortungssystem misst die Entfernungen durch Auswertung der Signallaufzeit über Zeitstempel zwischen dem Empfänger und den zugehörigen Sendern (auch Anker genannt). Eine weitere Möglichkeit ist die Bestimmung des Standortes über den Received Signal Strength Indicator (RSSI), der jedoch eine vorherige Kartierung der Umgebung erfordert. Für diese Art der Ortung können verschiedene Funktechnologien genutzt werden. Die bekanntesten sind Wireless Local Area Network (WLAN), Bluetooth,

Radio-Frequency Identification (RFID) und Ultra-Wideband (UWB). Die für eine präzise Ortung am besten geeignete Technologie ist Ultrabreitband, da diese für eine Kommunikation mit hoher Bandbreite und kurzer Reichweite ausgelegt ist. Die erreichbare Genauigkeit liegt im Bereich von wenigen Zentimetern. Eine der größten Herausforderungen bei der drahtlosen netzwerkbasierter Ortung in Innenräumen ist die Mehrwegeausbreitung des Signals. Obwohl UWB recht robust gegenüber Mehrwegeausbreitung ist, wirkt es sich dennoch negativ auf die Leistung aus, wenn Funkwellen durch Reflexion (z. B. Wände, Personen) abgelenkt werden und den Empfänger über zwei oder mehr Pfade mit unterschiedlichen Zeitverzögerungen erreichen. [10]

Monokulare Kamerasensoren arbeiten im sichtbaren Spektrum und erfassen reflektierte Strahlung. Durch eine Linse wird dabei die Umgebung auf eine zweidimensionale Matrix abgebildet, die Farbinformationen erfasst. Eine Laufzeiterfassung ist dabei grundsätzlich nicht möglich, da keine Informationen über den Zeitpunkt der Reflexion bekannt sind. Aufgrund der Datendichte und geometrische Grundbeziehungen lassen sich dennoch absolute Abstandsmessungen durchführen, wenn beispielsweise die bekannte Größe einer erfassten Referenz in Relation zu der erfassten Pixelanzahl und den Eigenschaften der Linse gesetzt wird.

Bei der Nutzung von zwei optischen Sensoren können erfasste Referenzen über die Relation der beiden Sensoren im dreidimensionalen Raum bestimmt und somit die Position des erfassenden Systems berechnet werden. Im Kontext von Stereokameras befinden sich die beiden Sensoren in einer Messeinheit und sind statisch verbunden. Durch diesen Zusammenhang lassen sich Merkmale in Abstände übersetzen und eine Lagepeilung realisieren.

Zusätzliche Informationen lassen sich durch die Nutzung eines aktiven Infrarotprojektors generieren, der die beiden Messprinzipien der Mono- und Stereokamera vereint. Durch ein regelmäßiges und bekanntes Muster, meist im Infrarotbereich, lassen sich aus optischen Verzerrungen Abstände zu den erfassenden Sensoren bestimmen. Durch die Nutzung von zwei optischen Sensoren ermöglicht diese Art der Referenzbestimmung höhere Informationsdichten und eignet sich beispielsweise für die Erstellung von Punktwolken, die für die Ortung mit bestehenden Karten abgeglichen werden können.

3.1.2 Einflüsse auf Sensoren im Innen-, Übergangs- und Außenbereich

Basierend auf den zugrundeliegenden Messprinzipien weisen die unterschiedlichen Sensoren signifikante Unterschiede in der Beeinflussung durch externe Faktoren auf. Dabei lassen sich die Umwelteinflüsse in drei Kategorien unterscheiden:

- Natürliche Einflüsse
- Räumliche Einflüsse
- Dynamische Einflüsse

Natürliche Einflüsse verursachen Abweichungen zwischen der Realität und Messwerten basierend auf unbeeinflussbaren Zuständen im Betrieb von fahrerlosen Schleppersystemen. Signifikant sind hierbei insbesondere:

- Umgebungstemperatur
- Beleuchtungsstärke
- Luftfeuchte
- Windstärken
- Oberflächentemperatur

Während bestimmte Sensoren der Ortung basierend auf ihrem Messprinzip nur von einzelnen Umgebungsbedingungen beeinflusst werden, stellen insbesondere plötzliche Wechsel der Umgebungsbedingungen hohe Anforderungen an die Robustheit der gesamten Sensorik der Ortungslösungen. Besonders Extrema, wie die Öffnung eines Hallentors im Hochsommer oder Winter beeinflussen die Erfassung und somit die Ortung eines Systems. In Innenbereichen sind die erfassten Umgebungsbedingungen meist konstant und können entsprechend bei der Positionsbestimmung berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Sensoren für die Ortung fahrerloser Schleppersysteme sowie deren Eignung im Innen- und Außenbereich

Sensor	Funktionsprinzip	Typische Genauigkeit	Typische Reichweite	Eignung Indoor-Einsatz	Eignung Outdoor-Einsatz
Ultraschallsensor	Laufzeitmessung	cm	2 - 10 m	Ja	Ja
Infrarotsensor	Laufzeitmessung	cm - m	1 - 5 m	Ja	Begrenzt
Laser	Laufzeitmessung	mm - cm	Bis zu 200 m	Ja	Begrenzt
RADAR	Laufzeitmessung	cm	0.2 – 200 m	Begrenzt	Ja
GNSS	Laufzeitmessung	m	global	Nein	Ja
Drahtloses Netzwerk (UWB)	Laufzeitmessung	cm - m	1 - 50 m	Ja	Ja
Drehzahlmesser	Pulsweiten	n/a	–	Ja	Ja
IMU	Trägheit	1 %	–	Ja	Ja
Kamera	Licht-Matrix	mm - dm	1 - 10 m	Ja	Ja
3-D Kamera	Strukturiertes Licht / Infrarot	cm	0.5 - 8 m	Ja	Ja

Räumliche Einflüsse lassen sich durch die entsprechende Gestaltung der Einsatzumgebung erklären und können meist in gewissem Maße angepasst werden. Enge Straßenschluchten beeinflussen beispielsweise den Empfang von GNSS-Signalen signifikant, während der Einsatz von transparenten Materialien die bei der Erfassung mittels LiDAR-Systemen zu Problemen führt. Im Falle von LiDAR-Sensoren können etwaige Probleme aber beispielsweise durch die Anbringung von reflektierendem Klebeband in der Erfassungshöhe gelöst werden.

Dynamische Einflüsse finden sich durch Bewegung und Interaktion der fahrerlosen Schleppersysteme mit weiteren Akteuren der Einsatzumgebung. Dynamische Einflüsse lassen sich

dabei nicht vermeiden und müssen im Rahmen der Ortung von Systemen berücksichtigt werden. Beispielsweise muss bei der Ortung mittels künstlicher Referenzmarken eine Alternativortung realisiert werden, wenn Marken durch Personen oder andere Fahrzeuge verdeckt werden.

Basierend auf den typischen Einflussfaktoren der Einsatzbereiche stellt die Tabelle 1 die Eigenschaften und Eignung bestimmter Sensoren für die Ortung von fahrerlosen Schleppersystemen dar.

3.1.3 Fusion von Sensordaten für die Ortung von fahrerlosen Schleppersystemen

Wie in Kapitel 3.1.1 erwähnt, stellt die Fusion von Sensordaten einen weit verbreiteten Ansatz für die Ortung von fahrerlosen Schleppersystemen dar. Für diese Fusion existiert eine hohe Zahl von Ansätzen, die jeweils unterschiedliche Komplexität, Stärken und Schwächen aufweisen. Gängige Verfahren basieren auf definierten Regeln (Mehrheitsentscheid), parametrischen und nicht-parametrischen stochastischen Ansätzen, Fuzzy-Algorithmen oder der Evidenztheorie. [11]

Besondere Beachtung kommt dabei den parametrischen und nicht-parametrischen stochastischen Ansätzen zu, die sowohl die Unsicherheiten in der sensorischen Wahrnehmung als auch dem Bewegungsmodell des Systems berücksichtigt. Dabei werden sensorische Messwerte als Wahrscheinlichkeitsverteilung der Realität angenommen und somit eine Unsicherheit modellspezifisch dargestellt. Die Unsicherheit unterschiedlicher Sensoren lässt sich im Rahmen der Fusion berücksichtigen und ermöglicht eine gewichtete Betrachtung. [12]; [13]

Im Bereich der parametrischen Filter stellen der Kalman- und der Histogramm-Filter häufig eingesetzte Ansätze für die Fusion von Sensordaten dar. Der Kalman-Filter setzt ein lineares System voraus, in dem sich das Messrauschen der Sensoren als Normalverteilung um den Erwartungswert manifestiert. In der Realität handelt es sich jedoch oft nicht um lineare Systeme, weshalb Variationen für nichtlineare Systeme existieren, wie beispielsweise der EKF, welcher das Messrauschen durch eine Approximation mittels Taylor-Reihen der ersten Ordnung linearisiert. [14] Die Nutzung des erweiterten Kalman-Filters (EKF) ermöglicht so die Fusion unterschiedlicher Sensorquellen für die Lagekopplung und Lagepeilung zu einer Ortungslösung. In [15] werden beispielsweise GNSS-Daten mit IMU und Encoder-Daten fusioniert, um eine Ortung in abgeschatteten Bereichen des Außenbereiches zu ermöglichen. Die zusätzliche Nutzung von optischen Sensordaten ermöglicht eine weitere Verbesserung der Ortung, wie in [16] gezeigt. Neben dem EKF existieren weitere Varianten des Kalman-Filters, wie beispielsweise der UKF, der ein deterministisches Verfahren für die Approximation der Linearisierung nutzt. Der UKF ist ressourcenaufwändiger zu implementieren, liefert bei stark nichtlinearen Systemen aber die besseren Ortungsergebnisse. [17]

Durch Verwendung einer nicht-parametrischen Darstellung der Sensordaten ist der Partikelfilter (PF) in der Lage, multimodale Verteilungen zu approximieren [13]. In [18] wird ein solcher Filter auf GNSS- und IMU-Daten angewendet. Die gleichen Sensoren werden in [19] zusammen mit optischen sowie Bewegungssensoren verwendet, um die Fahrzeuglage zu schätzen. In [20] wird ein Partikelfilter zur Ortung gegen eine digitale Karte verwendet. Details zu Theorie und Praxis von Partikelfiltern für Ortungszwecke finden sich beispielsweise in [21].

[22] vergleicht eine sowohl mit einem Partikel- als auch mit einem Kalman-Filter-Ansatz durchgeführte Ortung mit Drehzahlsensoren, IMU und Funkortung für verschieden Datensätze eines mobilen Roboters. Die Fusion der Sensordaten in der Umsetzung des EKF zeigt dabei eine signifikant geringere Abweichung in Relation zu der tatsächlichen Position des Roboters. Die Ortung durch einen Partikelfilter ermöglicht hingegen auch ohne bekannte Startposition die Ortung. In [23] wurde ein ähnlicher Vergleich unter Nutzung von Drehzahl- und Ultraschallsensoren durchgeführt, wobei die Auswirkung der Anzahl der verwendeten Partikel bei PF-basierter Ortung genauer betrachtet wurde. Auch hier zeigt sich eine geringere Abweichung der fusionierten Ortung mittel EKF und der tatsächlichen Position des Fahrzeugs. Im Bereich des Sports zeigt [24] die Anwendbarkeit beider Filtertypen auf hochdynamische Systeme bei der Ortung und Verfolgung der Bewegung von Sportlern mit einem UWB-System. Durch eine geeignete Implementierung der beiden Filter-Techniken lassen sich jeweils durchschnittliche Genauigkeiten von 20 cm bei dynamischen Bewegungen erzielen.

Die Analyse des Stands der Technik zeigt, dass bereits zahlreiche Ansätze zur Ortung fahrerloser Systeme und der Sensordatenfusion zur Verbesserung der Ortungsgenauigkeit existieren. Die Ansätze unterscheiden sich darin, welche Wahrnehmungsarchitektur verwendet wird und wie die von dieser Architektur generierten Daten verarbeitet werden, um eine Ortung zu realisieren. Von besonderer Relevanz ist dabei die realitätsnahe Beschreibung des Wahrnehmungsmodells der einzelnen Sensoren, welches insbesondere bei kontaktlosen Messverfahren die Beeinflussung von äußeren Umgebungseinflüssen berücksichtigen muss. Je genauer die Wahrnehmungsmodelle der Sensoren und das Bewegungsmodell eines mobilen Systems die Realität abbilden, umso näher beschreibt das Ergebnis der Fusion unterschiedlicher Sensoren die tatsächliche Position eines Systems [8]

3.1.4 Performance kosteneffizienter Sensoren und Skaleneffekte

Die Sensoren unterliegen als wirtschaftliches Gut den gleichen Grundsätzen liberalisierter Märkte, wie sie für jede frei verfügbare Technologie gelten. Eine Preisfindung erfolgt dabei anhand des Angebotes, der Nachfrage sowie der verfügbaren Vor- und Nachteile der einzelnen Sensoren. Dabei lässt sich allgemein festhalten, dass die Kosten für einzelne Sensoren steigen, je komplexer das Messprinzip ist, je zahlreicher die erhaltenen Messinformationen sind und je genauer die Sensoren die Realität erfassen. Im Kontext von IMUs lässt sich dieser Sachverhalt an den Eigenschaften unterschiedlicher, kommerziell verfügbarer Sensoren in der Tabelle 2 zeigen.

Der Zusammenhang zwischen den Fähigkeiten der Sensoren und deren Preisgestaltung lässt sich dabei auf alle relevanten Messprinzipien erweitern, seien es optische [26], GNNS- [27], RADAR- [28] oder LiDAR-Sensoren [29]. Kostenintensive Sensoren zeichnen sich dabei unter anderem durch integrierte Filterstufen und eine Abstimmung der internen Komponenten aus, was insbesondere bei zeitkritischen Messprinzipien wie der Laufzeitmessung von Signalen zu erheblich höheren Genauigkeiten führt. Sensoren aus dem oberen Preissegment verfügen zudem häufig über interne Kompensationsmechanismen für Umwelteinflüsse, die kosteneffizienten Sensoren nicht zur Verfügung stehen.

Positiv für die Entwicklung der Sensorpreise wirken sich die aktuellen Trends zu autonomen und intelligenten Produkten im Bereich der Automobil- und Endverbraucherbranchen aus. Die entsprechende Marktmacht der OEMs in diesen Bereichen führt dazu, dass die Preise für Sensoren mit zunehmender Eignung für eine Erfassung der Umgebung kontinuierlich sinken

und unter Berücksichtigung Ihrer Funktionalitäten als kosteneffizient bewertet werden können. [30] Eine Evaluation der kosteneffizienten Sensoren zeigt hierbei jedoch auch, dass diese weiterhin eine starke Abhängigkeit von Umgebungseinflüssen besitzen. [31]; [32]; [33]

Tabelle 2: Eigenschaften unterschiedlicher IMUs in Relation zu deren Preis basierend auf [25]

Kategorie	Luft- und Raumfahrt	Militär	Industrie	Endkunde
Kosten	>50.000 €	10.000 – 20.000 €	500 – 3.000€	< 500 €
Drift Gyroskop	< 0,1 °/h	0,1 – 10 °/h	< 1 °/sec	> 1 °/sec
Rauschen	< 0,005 °/ \sqrt{h}	0,2 – 0,5 °/ \sqrt{h}	Keine Vorgabe	Keine Vorgabe
Drift Accelerometer	5-10 μ g	0,02 – 0,04 mg	Keine Vorgabe	Keine Vorgabe
Beispiel	Honeywell HG9848	Honeywell HG1900	Microstrain GX2	ArdIMU

3.2 Pfadplanung und Navigation von fahrerlosen Schlep-persystemen

Aufgrund der Kernaufgabe von fahrerlosen Schleppersystemen, dem Transport von Material zwischen Quellen und Senken, stellt die Pfadplanung und Navigation eine wesentliche Komponente für den Betrieb ebendieser dar. Im hallenübergreifenden Kontext stellt dabei die über-gangslose Navigation analog zur Ortung hohe Anforderungen an Sensorik und Logik des Fahrzeugs.

Die Navigation fahrerloser Systeme lässt sich dabei in zwei Aufgaben unterteilen, die Pfadplanung und die eigentliche Navigation, also die Ausführung des geplanten Pfades. Bereits bei der Pfadplanung müssen die Besonderheiten fahrerloser Schleppersysteme mit Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften des Schleppers sowie der dynamischen Umgebungsbedingungen des Außenbereiches berücksichtigt werden. Während im Rahmen der Pfadplanung von fahrerlosen Schleppern gemäß dem Stand der Technik in Innenbereichen noch auf metrische Karten zurückgegriffen werden kann, eignen sich diese im Kontext des hallenübergreifenden Transportes aufgrund von Speicherplatzbeschränkungen und limitierter Rechenleistung nicht. Topologische Karten aggregieren hier die Einsatzumgebung in einem geeigneten Maß, bei dem die relevanten Informationen für die optimale Pfadplanung weiter berücksichtigt werden können. [34]

Als oberste Ebene der Pfadplanung für fahrerlose Schleppersysteme im hallenübergreifenden Einsatz lassen sich die Anforderungen der Einsatzumgebung mit einem Streckennetz des Nahverkehrs einer Stadt vergleichen, welches meist in Form einer topologischen Karte mit metrischen Referenzen abgebildet wird. Quellen und Senken der Intralogistik lassen sich dabei als Knotenpunkte des Streckennetzes darstellen, während logische Verknüpfungen die Kanten bilden. Entgegen der Pfadplanung in homogenen Einsatzumgebungen, bei denen die

Abstände als metrische Informationen ausreichend sind, um einen optimalen Pfad zu bestimmen, sind im hallenübergreifenden Einsatz auch äußere und dynamische Einflüsse zu berücksichtigen. Die Pfadplanung fahrerloser Schlepper im hallenübergreifenden Einsatz steht somit vor den gleichen Herausforderungen wie die Pfadplanung autonomer Automobile, die nicht einfach mit den klassischen Ansätzen fahrerloser Transportfahrzeuge, die auf Implementierungen des Dijkstra- [35] oder A*-Algorithmus [36] basierend auf metrischen Informationen aufbauen, gelöst werden können.

Im Bereich der autonomen Straßenfahrzeuge existiert bereits eine Vielzahl von Verfahren für die Pfadplanung unter Berücksichtigung von statischen (z.B. Entfernung) und dynamischen Einflüssen (z.B. Wetter und Verkehrssituation). [37] beschreibt die Nutzung eines hierarchischen Ansatzes für die Pfadplanung in Kombination mit entsprechend zeitkritischen Einflussfaktoren. Streckennetze werden dabei in einzelne Subnetze aggregiert und jeweils mit Graphensuchverfahren unter Berücksichtigung der Einflüsse gelöst. [38] erzielt ähnliche Ergebnisse durch eine Erweiterung des klassischen Dijkstra-Algorithmus mit entsprechenden zeitkritischen Metriken.

Die Ausführung des geplanten Pfades im Rahmen der Navigation ist systemabhängig. Bei spurgeführten Fahrzeugen wird die Ausführung durch die entsprechende Repräsentation der Spur vorgegeben, die optisch, induktiv oder als digitale Leitlinie gestaltet werden kann. Für den flexiblen und dynamischen Einsatz von fahrerlosen Schleppersystemen sind spurgeführte Systeme jedoch nicht zielführend, wie die Verfügbarkeit ebendieser Technologien bei gleichzeitig ausbleibender Marktdurchdringung in den vergangenen Jahrzehnten zeigt. Die freie Navigation ermöglicht den flexiblen Einsatz der Systeme in einem dynamischen Umfeld, weist dabei aber auch eine hohe Abhängigkeit von der Erfassung und Interpretation der Einsatzumgebung auf. Während eine freie Navigation von fahrerlosen Schleppern im Innenbereich den Industriestandard definiert [2], existieren in Außenbereichen kaum System mit freier Spurführung. Einzelne Systeme verwenden für Innen- und Außenbereiche dieselben Sensoren und Algorithmen, wobei entsprechende Beeinträchtigungen durch den Einsatz von Infrastruktur vermieden oder Beeinträchtigungen der Verfügbarkeit akzeptiert werden. [39]

Ein weitverbreiteter Ansatz ist dabei das Anlernen der Einsatzumgebung im Rahmen der Inbetriebnahme des Systems beim Kunden. Aufgrund der Unvorhersehbarkeit dynamischer Einflüsse kann dieses Anlernen mehrere Tage bis Wochen in Anspruch nehmen, um entsprechende Informationen für die zuverlässige Navigation des Systems zu erhalten. Unbekannte Szenarien des Einsatzes, wie beispielsweise bauliche Veränderungen nach der Inbetriebnahme führen dabei zu einem erneuten Aufwand für die erneute Inbetriebnahme. [40]

Im Bereich der autonomen Automobile finden sich alternative Ansätze, die auf eine Vielzahl von Sensoren und die komplette Digitalisierung der Umgebung des Fahrzeuges zur Realisierung einer freien Navigation setzen. [41] Für die reaktive Navigation werden dabei primär LiDAR [42] oder optische Systeme [43] genutzt, die eine Definition befahrbarer Bereiche ohne inhärente Informationen erlauben. Durch eine Verknüpfung einzelner Entitäten lassen sich zudem kritische Informationen in Bezug auf die Befahrbarkeit einzelner Sektoren für die Navigation der Fahrzeuge nutzen. [44]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Ansätze der Pfadplanung fahrerloser Schlepper in Innenbereichen aufgrund der Limitierungen der rein abstandsbezogenen Metrik nicht ohne Weiteres auf den Außenbereich erweitert werden können. Zeitkritische Metriken aus

dem Bereich der Automobile lassen sich hingegen ohne eine geeignete Art der Umgebungs- darstellung nicht in den Intralogistikkontext transferieren. In der Ausführung der Navigation stellt das vorherige Einlernen der Umgebung sowie der Soll-Trajektorien den Stand der Technik für fahrerlose Schlepperfahrzeuge dar. Eine umgebungsspezifische Realisierung von unterschiedlichen und optimierten Navigationsansätzen für fahrerlose Schlepper existiert bisher nicht.

3.3 Sicherheits-Sensorik zur Kollisionsvermeidung

Als Subsystem der fahrerlosen Transportfahrzeuge sind die Sicherheitseinrichtungen fahrer- loser Schleppersysteme im deutschen Rechtsraum durch eine Vielzahl von Normen geregelt. Insbesondere Sensorik zum Personenschutz ist in einer Reihe von nationalen und EU-weiten Normen spezifiziert.

Sicherheitseinrichtungen dienen in diesem Kontext zum Schutz von Personen und Sachwerten. In der DIN EN ISO 3691-4:2020-11 [45] werden die Anforderungen an das Sicherheits- system eines FTF definiert. Auch der VDI beschäftigt sich mit diesem Sachverhalt. Die Fahr- zeugsicherheit wird im „Leitfaden FTS-Sicherheit“ [46], die Systemsicherheit in VDI-Richtlinie 2510 Blatt 2 [47] thematisiert. Die grundlegendste Sicherheitseinrichtung von FTS bildet der Not-Aus-Taster, der durch manuelles Betätigen ein unverzügliches Stoppen des Schleppers hervorruft. Die weiteren Einrichtungen können in taktile und berührungslose Systeme unter- teilt werden.

In der folgenden Tabelle 3 findet sich eine Auflistung der relevanten Normen, die für den sicheren Einsatz fahrerloser Schlepper im Innen- und Außenbereich bei Mischverkehr relevant sind.

Tabelle 3: Relevante Normen für den sicheren Betrieb fahrerloser Schleppersysteme

Ziffer	Typ	Titel	Geltungsbereich
Richtlinie 2006/42/EG	EU-Richtlinie	Maschinenrichtlinie	EWR
DIN EN ISO 3691	Norm	Flurförderzeuge – Sicher- heitstechnische Anforderun- gen und Verifizierung	EWR
Richtlinie 2013/35/EU	EU-Richtlinie	Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitneh- mer vor der Gefährdung durch physikalische Einwir- kungen	EWR
VDI 2510	Technische Regel	Fahrerlose Transportsys- teme (FTS)	DE

VDI 2710	Technische Regel	Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)	DE
DIN EN ISO 62998	Norm	Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsrelevante Sensoren für den Schutz von Personen	EWR
EN/IEC 61496	Norm	Sicherheit von Maschinen – Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen	EWR
DIN EN IEC 60947-5-2	Norm	Näherungsschalter	EWR
DIN EN ISO 13849-1	Norm	Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen	EWR
DIN EN 61508-1	Norm	Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme	EWR
DIN EN 62061:2016-05	Norm	Sicherheit von Maschinen - Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Steuerungssysteme	EWR

Bei einer Analyse der marktverfügbaren Systeme im Bereich der fahrerlosen Intralogistik wird ersichtlich, dass kommerziell vertriebene Systeme zu großen Teilen auf sicherheitszertifizierte LiDAR-Systeme für den Personenschutz zurückgreifen. Während für den Einsatz in Innenbereichen eine Vielzahl von Herstellern und Modelle mit unterschiedlichen Spezifikationen existieren, sind in Außenbereichen mit wechselnden Umgebungsbedingungen nur eine geringe Anzahl an zertifizierten Sensoren verfügbar. [40] Dies resultiert in hohen Kosten für die Systeme, wodurch die Umsetzung von fahrerlosen Schleppersystemen im hallenübergreifenden Einsatz bisher nur selten wirtschaftlich sinnvoll scheint.

Mit der Zunahme des Autonomiegrades von Straßenfahrzeugen geraten seit Kurzem auch andere Messprinzipien und somit Sensoren in den Fokus der sicheren Personendetektion, die über die Verwendung von LiDAR-Systemen hinausgeht. Der Autobauer Tesla setzt in seinem „Full Self-Driving“ System auf Kameras und RADAR-Sensoren, um die Sicherheit des Systems bei realen Umweltbedingungen zu realisieren. Andere Hersteller versuchen durch eine Redundanz in den erfassten Sensorinformationen die Unabhängigkeit von einzelnen, kostenintensiven Sensoren zu erreichen. [48]; [49]

3.4 Autonome Schleppersysteme im hallenübergreifenden Einsatz

Nach der Detaillierung der Grundlagen soll im Folgenden auf zwei fahrerlose Schleppersysteme eingegangen werden, die den hallenübergreifenden Einsatz bereit heute durchführen können. Ein besonderer Fokus wird dabei auf die entsprechende Sensorik, die genutzte Software und die Sicherheitskomponenten der Systeme gelegt.



Abbildung 5: Der fahrerlose Schlepper TractEasy der Firma EasyMile [50]

Das fahrerlose Schleppersystem TractEasy der Firma EasyMile wurde im Jahr 2018 vorgestellt und basiert auf dem elektrischen Schlepper Jet-16 der Firma TLD mit einer Zuglast von 25 Tonnen. Im Umfeld der Flughafenlogistik entwickelt ist der Schlepper mit unterschiedlichen Sensoren aus dem hochpreisigen Segment ausgestattet, die eine vollständige Erfassung der Einsatzumgebung ermöglichen. Eingesetzt werden dabei LiDAR, Kameras, IMUs, dGPS und Drehzahlmesser, die für die Ortung fusioniert werden. Für die Pfadplanung und Navigation wird die proprietäre Software EZSoftware eingesetzt, welche auf ein eingelerntes und optimiertes Streckennetz zurückgreift. Somit müssen befahrbare Routen des Systems bei der Inbetriebnahme bekannt sein und dem System durch manuelles Anlernen bekannt gemacht werden. Die Sicherheit des Systems wird primär über die Auswertung der unterschiedlichen LiDAR-Sensoren realisiert. [50] Das kommerziell verfügbare System ist in Abbildung 5 dargestellt.

Das TractEasy System stellt mit seinem Marktfokus auf die Flughafen- und Automobillogistik eine hochspezialisierte Lösung unter Verwendung hochpreisiger Sensoren dar. Die genutzte Software für die Pfadplanung und Navigation des Systems ist dabei in sich geschlossen und lässt sich nur mit Expertenwissen applizieren. Die Realisierung in einem zertifizierten und

kommerziell erfolgreichen Produkt zeigt jedoch das Potential, welches durch einen hallenübergreifenden Einsatz von Schlepperfahrzeugen erzielt werden kann.

Das zweite System ist ein fahrerloser Schlepper der Firma Schiller Automatisierungstechnik, der den Status eines Prototypen erreicht hat [39]. Basierend auf einem handelsüblichen Schleppersystem der Firma Linde, welches Schnittstellen für den automatisierten Betrieb besitzt, wurde ein fahrerloses System für den gemischten Einsatz im Innen- und Außeneinsatz entwickelt. Das Fahrzeug besitzt für Navigation, Ortung und Sicherheit drei LiDAR-Sensoren, die sich an der Front und den Seiten des Fahrzeuges befinden. Die Grundlage bildet dabei der sicherheitszertifizierte Sensor OUTDOOR-Scan der Firma Sick, welcher einen zertifizierten Sicherheitsbereich von 4 Metern im Außenbereich aufweist. Dies begrenzt die maximale Geschwindigkeit des Systems, zeigt jedoch, dass auch kommerziell verfügbare Systeme perspektivisch für einen fahrerlosen Betrieb ausgestattet werden können. Die entsprechende Software für die Interaktion und die Ansteuerung des autonomen Routenzuges ist nicht weiter spezifiziert und kann somit als proprietär eingestuft werden. Erweiterungen oder Modifikation des Systems basierend auf realen Einsatzbedingungen und neuartigen Sensorentwicklungen sind somit nicht möglich.

4 Lösung der Arbeitspakete

Wie aus der Analyse des Stands der Technik ersichtlich wird, existieren bisher keine kosteneffizienten Lösungen für den potentiell sicheren Betrieb von fahrerlosen Schleppern im hallenübergreifenden Einsatz. Lösungen für den Betrieb in Innenbereichen können aufgrund ihres Fokus auf LiDAR-Systeme und den damit verbundenen Einschränkungen bezüglich Umweltbedingungen und der Navigation der Systeme nicht im hallenübergreifenden Kontext eingesetzt werden. Einzelne Lösungen für den Außenbereich greifen auf hochredundante und kostenintensive Sensoren zurück, die extra für den Einsatz auf fahrerlosen Schleppersystemen konzipiert und entwickelt wurden. Zusammen mit dem zeitintensiven Anlernprozess für die digitale Leitlinie entstehen hierbei hohe Implementierungskosten, die eine Umsetzung nur in Einzelfällen wirtschaftlich sinnvoll machen.

Kosteneffiziente Sensoren aus dem Endverbraucher- und Automobil-Sektor eröffnen das Potential einer Nutzung unterschiedlicher Messprinzipien, um Schwächen einzelner Sensoren in Hinblick auf das Gesamtsystem kompensieren zu können. Insbesondere im Übergang zwischen Innen- und Außenbereich, in dem spontane Änderungen der Umgebungsbedingungen den sicheren Betrieb des fahrerlosen Schleppers gefährden können, eröffnen sich durch eine dynamische Fusion Potentiale für eine kosteneffiziente Umsetzung.

Durch die enge Verzahnung von Ortung, Navigation und Sicherheit eines fahrerlosen Schleppers muss die kostenorientierte Synthese der Sensorik stets in Wechselwirkung mit den entsprechenden Funktionen betrachtet werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde daher ein ganzheitliches Konzept für den potentiell sicheren Einsatz von fahrerlosen Schleppern unter der Verwendung von kosteneffizienten Sensoren und geeigneten Fusionsansätzen entwickelt und umgesetzt. Eine detaillierte Beschreibung des Konzeptes mit den Anforderungen findet sich in Kapitel 4.1 entsprechend dem Arbeitspaket 1 des Projektantrages. Kapitel 4.2 behandelt den besonders wichtigen Bereich der übergangslosen Ortung. Hier werden die einzelnen Komponenten sowie der Nachweis einer übergangslosen Ortung anhand zweier Labordemonstratoren entsprechend dem zweiten Arbeitspaket des Antrages beschrieben und evaluiert. Eine Analyse der sicherheitsrechtlichen Anforderungen sowie die Auswahl und Bewertung der Sensorkonzepte findet sich in Kapitel 4.3 und deckt die entsprechenden Arbeitspakete des Antrages ab. In Kapitel 4.4 wird die Kombination der einzelnen Module zu einem schlüssigen Gesamtkonzept gemäß Arbeitspaket 4 ganzheitlich beschrieben. Es folgt in Kapitel 4.5 die Beschreibung der Umsetzung innerhalb eines Funktionsdemonstrators sowie die Bewertung des Gesamtsystems im Kontext eines anwendungsnahen Funktionsdemonstrators.

4.1 Definition eines übergangslosen Ortungs- und Navigationskonzeptes

Die Realisierung eines übergangslosen Ortungs- und Navigationskonzeptes für den hallenübergreifenden Einsatz von fahrerlosen Schleppern erfordert eine detaillierte Analyse der Anforderungen der Einsatzumgebungen. Während diese im Innenbereich größtenteils definiert und geregelt vorliegen, unterliegen die einzelnen Parameter im Außenbereich großen

Schwankungen, die besonders im Übergang zwischen den Einsatzbereichen Extrema ausbilden können.

4.1.1 Anforderungen an ein übergangsloses Ortungs- und Navigationskonzept

Den Maßstab für ein entsprechendes Konzept für die übergangslose Ortung und Navigation fahrerloser Schlepper bildet ein personengeführtes System, welches durch die kognitiven Fähigkeiten sowie die Erfahrung des Bedieners ein Höchstmaß an Flexibilität und Universalität erreicht. Analysiert man den Betrieb eines personengeführten Systems, so lassen sich die folgenden Aspekte beobachten, die von einem fahrerlosen System ebenfalls abgedeckt werden müssen:

- **Erfahrung:** Die Einsatzumgebung ist einem Bediener bekannt. Er kennt das grobe Layout der Einsatzumgebung sowie die Routen, die er in diesem befahren kann.
- **Adaption:** Ein Bediener passt sein Verhalten den Gegebenheiten an. Insbesondere im Außenbereich wird eine Person die Geschwindigkeit des Fahrzeuges bei schlechter Sicht reduzieren und mehr auf die Wahrnehmung mit adäquaten Sinnesorganen setzen.
- **Dynamik:** Ein personengeführter Schlepper ist nicht fest in seiner Routenplanung und folgt keiner digitalen Leitlinie. Bei Hindernissen in der Route kann ein Bediener eine Alternativroute nutzen, auf die Behebung der Behinderung warten oder lokal ausweichen.
- **Multisensorik:** Ein Bediener evaluiert seine sensorischen Wahrnehmungen basierend auf dem Kontext der Umgebung und der Relevanz für das Systemverhalten.

Mit Orientierung an den Fähigkeiten personengeführter Schlepper wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein ganzheitliches Konzept für die übergangslose Ortung und Navigation von fahrerlosen Schleppern entworfen. Der zentrale Leitgedanke ist dabei eine komplette Digitalisierung der Einsatzumgebung mit inhärenter Informationscodierung zur Nutzung von Wissen innerhalb des Systems. Basierend auf diesem Wissen über die Einsatzumgebung kann der fahrerlose Schlepper sein Verhalten adaptieren und unterschiedliche Sensorquellen für die Umgebungswahrnehmung nutzen. Ein rekonfigurationsfähiger Zustandsautomat auf dem fahrerlosen Schlepper führt dabei eine hierarchische Navigation aus, die übergangslos in unterschiedlichen Stufen die feingranulare Planung und Ausführung des Pfades übernimmt.

Die folgenden Unterkapitel detaillieren die einzelnen Stufen des Konzeptes.

4.1.2 Vollständige Digitalisierung der Einsatzumgebung

Die Grundlage des Konzeptes für den sicheren Einsatz von Schleppern im hallenübergreifenden Umfeld bildet eine vollständige Digitalisierung der Einsatzumgebung in einem lokalen und globalen Kontext unter Nutzung eines standardisierten und maschinenlesbaren Formates. Das Ziel ist hierbei, eine vollständige Karte der Einsatzumgebung zu erhalten, die alle relevanten Informationen beinhaltet und zudem für die Pfadplanung der Navigation genutzt werden kann. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, eignen sich topologische Karten mit metrischen Informationen (hybride Karten) für die Darstellung einer Einsatzumgebung als Knoten und Kanten. Durch die Kodierung weiterer Informationen zu den einzelnen Attributen wird es mög-

lich, diese im Rahmen der Pfadplanung und –ausführung zu berücksichtigen [51]. Ein schematisches Beispiel für eine vollständig digitalisierte Einsatzumgebung als knotenbasiertes Umgebungsmodell ist in Abbildung 6 dargestellt.

Informationen zu Streckenlängen, erlaubten Maximalgeschwindigkeiten oder physikalische Beschränkungen, wie eine maximale Durchfahrtshöhe, können dabei direkt von einem Algorithmus ausgewertet und als Gewichtungen der Kanten des Streckennetzes Verwendung finden. Zudem ermöglicht die Zuweisung von Attributen für bestimmte Einsatzbereiche (z.B. „indoor“ und „outdoor“ eine automatisierte Steuerung des Verhaltens des Systems, die über eine reine Nutzung der digitalisierten Einsatzumgebung im Rahmen der Pfadplanung und Navigation hinausgeht.

Basierend auf der Definition der Einsatzumgebung zu jedem Zeitpunkt eröffnet sich die Möglichkeit, das Verhalten und die Wahrnehmung der Umgebung durch das Fahrzeug zu steuern und zur Laufzeit des Systems zu adaptieren. Notwendig ist hierbei eine gemeinsame Referenz zwischen der Einsatzumgebung und der aktuellen Position des fahrerlosen Schleppers, die eine Relation zwischen der Karte und der selbstlokalisierten Pose des Fahrzeugs herstellt. Hierfür eignet sich im Kontext des hallenübergreifenden Einsatzes das globale Koordinatennetz mit Längen- und Breitengraden, welches in Zentraleuropa eine Genauigkeit von 1,11 cm bei 7 Stellen hinter dem Komma für die Angabe von Positionen ermöglicht. In Verbindung mit der Angabe der Höhe über dem Meeresspiegel ermöglicht dies eine eindeutige Definition jedes Punktes innerhalb einer Einsatzumgebung.

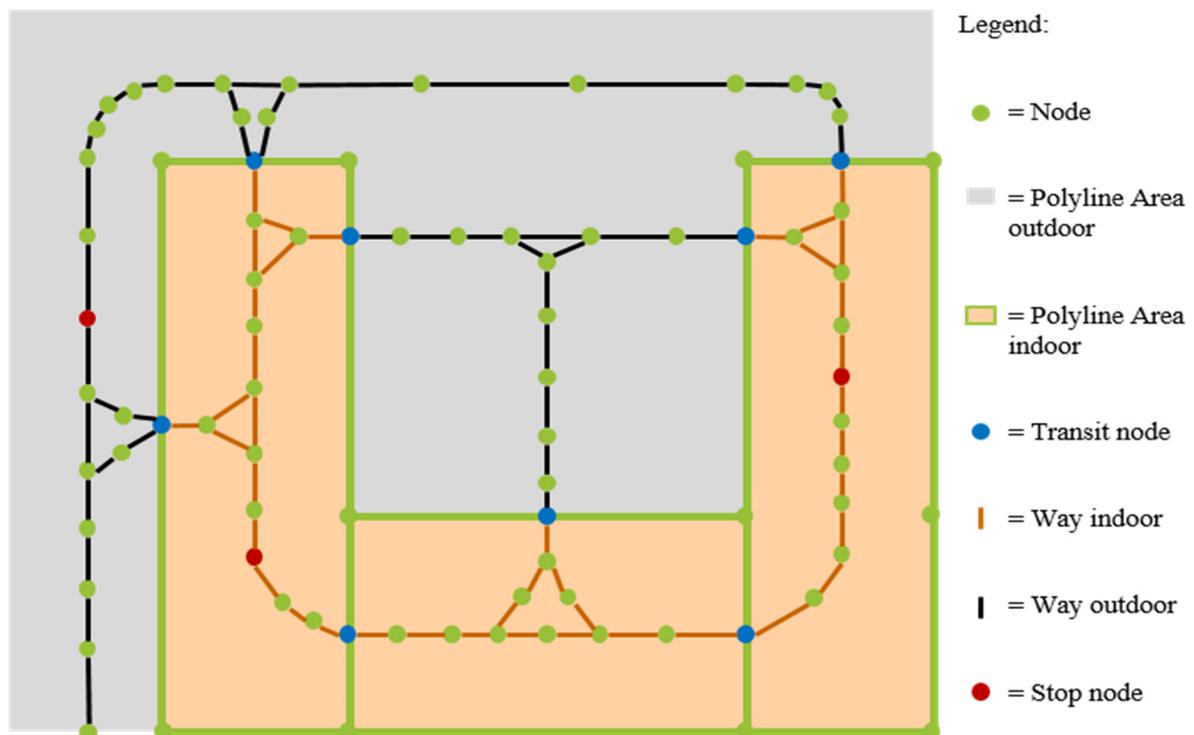


Abbildung 6: Konzept der vollständigen Digitalisierung der Einsatzumgebung, eigene Abbildung aus [39]

Mit der Definition der einzelnen Bereiche können weitere Informationen für den Betrieb des Systems aggregiert und dem fahrerlosen Schleppersystem zur Verfügung gestellt werden. Die Umgebungsbedingungen im Außenbereich können somit berücksichtigt werden, falls der

Schlepper eine Fahrt durch den Außenbereich plant, und anderenfalls ignoriert werden. Zudem lassen sich detailliertere Karten für eine hierarchische Pfadplanung und Navigation für Innenbereiche im Kontext der globalen Referenz nachladen und verwenden.

Neben der Digitalisierung der Einsatzumgebung als knotenbasiertes Modell, welches die Erfahrung des Systems darstellt, bildet die sensorische Umfelderkennung des Schleppersystems die zweite relevante Komponente der Digitalisierung der Einsatzumgebung. Aus der Analyse des Standes der Technik und empirischen Versuchen zeigt sich, dass eine Vielzahl von unterschiedlichen Messprinzipien Mehrwerte für die Umfelderkennung liefern. Ein besonderer Fokus liegt hier auf den optischen Systemen, die aufgrund ihrer hohen Informationsdichte eine ganzheitliche Erfassung der Umgebung ermöglichen. Aber auch kosteneffiziente LiDAR-Systeme, Ultraschallsensoren, RADAR, Time-of-Flight Sensoren unter Nutzung von Infrarot, UWB-Sensoren, GNSS-Empfänger, Drehzahlsensoren und IMUs weisen spezifische Stärken bei der Umgebungserfassung unter bestimmten Umgebungsbedingungen auf.

Aus einer Analyse der historischen Witterungsbedingungen im mitteleuropäischen Raum ergeben sich im 95%-Perzentil für den übergangslosen Einsatz fahrerloser Schleppersystem die in der Tabelle 4 aufgeführten Bereiche im Hinblick auf mögliche Witterungsbedingungen:

Tabelle 4: Einflussfaktoren durch Witterungsbedingungen für fahrerlose Schlepper

Einflussfaktor	Innenbereich	Außenbereich
Temperatur in °C	18 bis 21	-20 bis 40
Luftfeuchte in %	40	5 bis 100
Luftfeuchte kondensierend	Nein	Ja/Nein
Windgeschwindigkeit in km/h	< 5	0 bis 120
Beleuchtungsstärke in Lux	500 bis 1.500	1 bis 100.000

Die erfassten Einflussfaktoren beeinträchtigen die unterschiedlichen Messprinzipien und somit die sensorische Umfelderkennung mit wechselnder Signifikanz. Kontextbezogen wurden daher die Einflussfaktoren definiert und die Fähigkeiten der unterschiedlichen Sensoren für die Umgebungswahrnehmung validiert. Die entsprechende Auswertung in Bezug auf Witterungsszenarien findet sich in Tabelle 5.

Ergänzend zu den Witterungsbedingungen, die sich aus dem hallenübergreifenden Einsatz fahrerloser Schlepper ergeben, wurden auch die Kollisionsszenarien definiert, die sich aus einem Mischverkehr mit potentiell werksfremden Personen ergeben können. Die Grundlage der kritischen Kollisionsszenarien bildet hierbei die Annahme, dass der Schlepper sowohl im Innen- als auch im Außenbereich verkehrt und Lasten in Form einzelner oder mehrerer Anhänger bewegt. Der Schlepper fährt nur vorwärts und kann sowohl anderen Fahrzeugen als auch Personen begegnen. Es sind für Deutschland typische Umgebungs- und Wetterbedingungen zu erwarten. Da es sich bei der zu erwartenden Einsatzumgebung um ein Werks Gelände handelt, ist ausschließlich mit unterwiesenen Personen zwischen 16 und 65 Jahren zu rechnen. Ein repräsentatives Fahrzeug selbst wiegt etwa 1 Tonne und misst ca. 1,2 m x 0,8 m x 1,5 m (plus Anhänger). Es bewegt sich mit 8 km/h (= 2,2 m/s) und benötigt ca. 6 m (= Verzögerung 0,4 m/s²) bis zum Stillstand aus voller Fahrt. [52]

Für die Detektion anderer Fahrzeuge müssen metallische oder Kunststoffflächen (Reflektivität mind. 0,5) im Erfassungsbereich vor einer Kollision erkannt werden. Da es sich um flurgebundene Fahrzeuge handelt sind die möglichen Erscheinungen im Erfassungsbereich klar definiert. Für diesen Fall wird festgelegt, dass Fahrzeuge im Bereich 0 – 1 m über Bodenniveau in den Erfassungsbereich eintreten können. Die Geschwindigkeit beträgt vorwärts maximal 2,2 m/s, rückwärts maximal 1,6 m/s. Personen werden für Kollisionsszenarien definiert gemäß dem 5%-Perzentil der Frauen ab 16 Jahren nach DIN EN 33402-2 und RKI mit einer Körperhöhe von 1,535 m, Körpertiefe von 0,245 m, Hüftbreite von 0,34 m, Geschwindigkeit von 1,6 m/s und einer Beschleunigung von 2 m/s². [53]

Tabelle 5: Bewertung der Sensoren zur Umfelderkennung basierend auf den Witterungsbedingungen

		Sensor											
		LIDAR	Infrarot	UWB	RADAR nah	RADAR fern	Time-of-Flight	Kamera		Wärmebild	Ultraschall		
							Stereokamera	2D/3D Kamera					
Physikalische Bedingungen	Temperatur	Besonders hohe/niedrige Temperaturen (< 5 °C oder > 30 °C), große Temperaturschwankungen	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	Luftfeuchtigkeit	besonders hohe/niedrige Luftfeuchtigkeit	Green	Yellow	Grey	Green	Green	Grey	Green	Green	Grey	Yellow	Yellow
	Zusatzstoffe in der Atmosphäre	Öl-Nebel, Lösungsmittel, Wasserdampf, Farbpartikel, Staub oder aggressive Gase	Green	Yellow	Grey	Green	Yellow	Red	Red	Red	Grey	Yellow	Yellow
	Elektrische oder magnetische Felder	Einfluss von Störfeldern	Green	Green	Red	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
	Lichtverhältnisse	wechselhafte Lichtverhältnisse, extreme Dunkelheit/Helligkeit	Green	Yellow	Grey	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Green	Green	Green
		Funktionsfähigkeit in der Dunkelheit	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Green	Green
	Wetter	extreme Wetterbedingungen, Witterungsempfindlichkeit	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
		Hitze, Frost, Wind	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
		Schnee	Red	Red	Yellow	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow
		Nebel	Red	Red	Green	Green	Yellow	Red	Red	Red	Green	Green	Green
Regen		Red	Red	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	

Die Reflektivität von Haut und Kleidung wird mit 0,4 (vgl. Infrared Reflectivity of Pedestrian Mannequin for Autonomous Emergency Braking Testing) angesetzt. Der Radarquerschnitt

beträgt näherungsweise 1 m². Aufgrund des Einsatzes auf Industriegelände ist davon auszugehen, dass alle Personen grundlegend über den Betrieb eines fahrerlosen Schleppersystems informiert sind.

Tabelle 6: Verwendete Komponenten zur Umgebungserfassung mit kosteneffizienten Sensoren

Sensor	Messprinzip	Kosten
Realsense D435i	Stereokamera	Ca. 220 €
Realsense T265	Fisheye-Kamera	Ca. 220 €
Ublox Neo8m	GNSS-Empfänger	Ca. 56 €
Decawave DW1000 UWB	UWB-System	Ca. 210 €
HC-SR04	Ultraschallsensor	Ca. 5 €
VL53L0X	1D IR-ToF	Ca. 15 €
VL53L1X	3D IR-ToF	Ca. 20 €
RCWL0516	Dopplerradar	Ca. 3 €
HC-SR501	Pyroelektrischer Infrarotsensor	Ca. 3 €
TMP006	Oberflächentempersensoren	Ca. 10 €
ALS-PT19	Lichtsensoren	Ca. 3 €
TSL2591	Lichtsensoren	Ca. 9 €
BMP280	Druck- und Temperatursensoren	Ca. 8 €
LMS9DS1	IMU	Ca. 23 €
RPLidar A2M8	IR-LiDAR	Ca. 420 €
Sick TiM 571	LiDAR	Ca. 3.300 €
Summe:		Ca. 4.525 €

Basierend auf der Analyse der Einflussfaktoren der Witterung auf die einzelnen Messprinzipien, der Definition der Einsatzumgebung in Form eines knotenbasierten Referenzmodells sowie der Anforderungen der Kollisionsszenarien wurde ein Sensorkonzept zur Erfassung der Umgebung definiert. Dieses nutzt modulare Onboard-Sensorik für die Erfassung des Umfeldes des fahrerlosen Schleppers sowie externe Umgebungssensorik für die Bestimmung der

dynamischen Einsatzparameter im Außenbereich. Dabei wurde für jedes relevante Messprinzip ein kosteneffizienter, repräsentativer Sensor ausgewählt. Die verwendeten Sensoren sowie die Kosten der einzelnen Systeme sind in Tabelle 6 aufgeführt, während Abbildung x das Konzept darstellt.

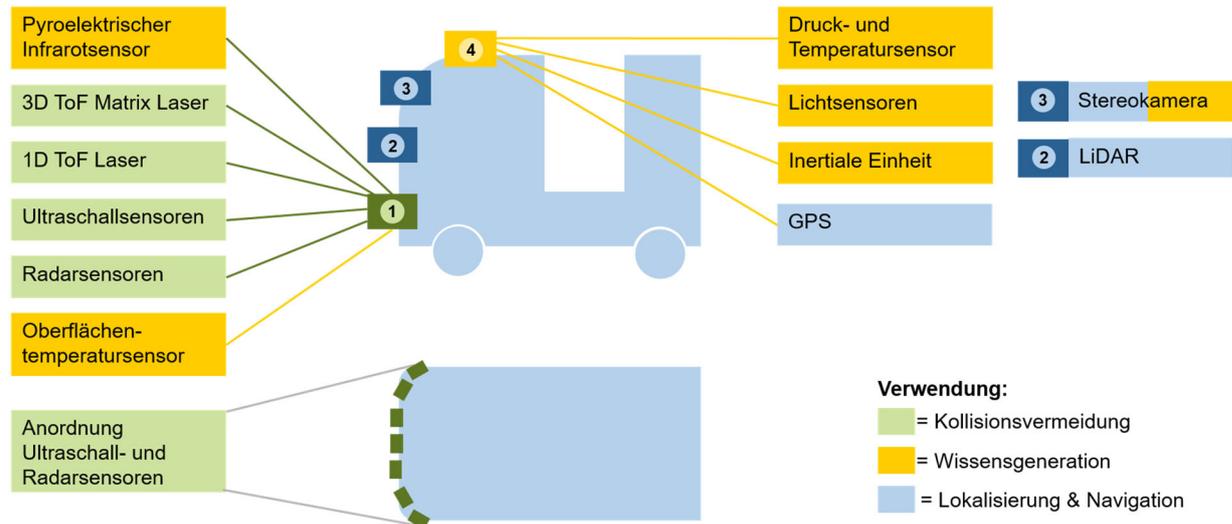


Abbildung 7: Verwendete Onboard-Sensorik zur Umfelderkennung im Rahmen des Konzeptes

4.1.3 Übergangslose Ortung unter Berücksichtigung der Einsatzumgebung

Basierend auf der kompletten Digitalisierung der Einsatzumgebung und der Umfelderkennung durch die Sensorik am Fahrzeug sowie der Umweltbedingungen aus der Umgebung lässt sich ein übergangsloses Ortungskonzept definieren. Durch die impliziten Informationen wird der dynamische Einsatz unterschiedlicher Algorithmen und Verfahren für die Ortung des Systems in Abhängigkeit der aktuellen Einsatzumgebung ermöglicht.

Aus der Analyse des Stands der Technik haben sich die folgenden Ansätze für die Ortung in den separaten Teilbereichen als zielführend erwiesen und wurden somit in das Konzept der übergangslosen Ortung überführt. In Innenbereichen eignen sich konturbezogene Ortungsansätze basierend auf vorhandenem oder im Betrieb erstelltem Kartenmaterial (SLAM) aufgrund der quasistatischen Umgebungen gut für komplexe Einsatzumgebungen. Im Übergangsbereich unterliegt die sensorische Umfelderkennung des fahrerlosen Schleppers mit Onboard-Sensorik großen Sprüngen in der Kontinuität der Erfassung, weshalb sich hier eine infrastrukturgestützte Ortung unabhängig von der Umgebungserfassung als Lösung anbietet. In Außenbereichen steht mit GNSS eine absolute Referenz zur Lagepeilung zur Verfügung, die durch IMU und Drehzahlsensoren in der Lagekopplung ergänzt werden kann. Die genannten Verfahren der Ortung weisen dabei aufgrund der genutzten Verfahren für Lagekopplung und Lagepeilung eine spezifische Eignung für die unterschiedlichen Einsatzbereiche auf, was bei vorhandenen Informationen zu den aktuellen Umweltbedingungen entsprechend kompensiert werden kann. Im folgenden Abschnitt werden die entsprechenden Ansätze der Lagepeilung und Lagekopplung gemäß nochmals detailliert.

Im Innenbereich eignet sich aufgrund der hohen Merkmalsdichte der Umgebung und der resultierenden Erfassungsinformationen der Einsatz eines Partikelfilters in Verbindung mit LiDAR-Daten und einer Karte der Einsatzumgebung für die Lagepeilung des fahrerlosen

Schleppersystems. Die entsprechende Karte kann im Rahmen der Beschreibung des Einsatzumfeldes verlinkt werden, um ein Nachladen ebendieser im Betrieb zu ermöglichen. Sofern keine Karte verfügbar ist, kann ein fahrerloses Schleppersystem basierend auf seinen Sensorinformationen eine eigene Karte zu erstellen, indem ein entsprechender SLAM-Algorithmus gestartet wird. Für die Lagekopplung im Kontext der Ortung in Innenbereichen eignen sich Drehzahlmesser, IMU, optischer Fluss sowie ein kanonischer Scan-Matcher. Die beiden letztgenannten Verfahren berechnen basierend auf zwei zeitlich versetzten Messungen die Bewegung des messenden Systems unter der Annahme einer statischen Umgebung. Aufgrund der hohen Merkmaldichte in Innenbereichen eignen sich die beiden Verfahren hier besonders für die Generierung von relevanten Ortungsinformationen.

Die Nutzung von Ultrabreitbandsensoren im Übergangsbereich stellt eine Möglichkeit der hochgenauen Lagepeilung unabhängig von der Onboard-Sensorik des Schleppers dar, ist hierbei aber auf Infrastruktur angewiesen. Aufgrund der hohen Zuverlässigkeit eignet sich dieses System besonders für die Ortung im Transitbereich zwischen Innen- und Außenbereichen, in dem optische Messprinzipien wie Kameras oder LiDAR-Systeme Schwächen aufweisen. Aufgrund der absoluten Positionsbestimmung über Funkwellen kann das System sicher lokalisiert werden, während die Sensoren des fahrerlosen Schleppers im Transit auf die neuen Umgebungsbedingungen kalibriert werden. Die hohen Kosten für das System mit mindestens vier Ankern pro Transitfläche und mindestens einem Empfänger (Tag) pro Fahrzeug relativiert sich im Vergleich zu den Vorteilen einer hochgenauen Ortung in dem besonders kritischen Bereich des Übergangs. Neben der Lagepeilung über UWB kann zudem auf die Daten der Drehzahlsensoren sowie der IMU des Systems in der Lagekopplung zurückgegriffen werden.

In Outdoor-Bereichen erfolgt die Lagepeilung über einen GNSS-Empfänger, der die absolute Position des fahrerlosen Schleppers basierend auf der Triangulation zu Satelliten mit Sichtverbindung bestimmt. Auch hier ergänzen propriozeptive Sensoren durch Lagekopplung die Ortung.

Ein Bezug der unterschiedlichen Ortungsergebnisse erfolgt im Rahmen des Konzeptes dabei stets im Referenzsystem der Weltkoordinaten. Dies bedeutet, dass sowohl die Infrastrukturgebundene Peilung als auch die Ortung im Innenbereich in das Weltkoordinatensystem transferiert werden müssen. Dies ist jedoch meist unproblematisch möglich, da entsprechende geometrische Vermessungsdaten verfügbar sind. Die Übergangslosigkeit der einzelnen Ortungsergebnisse zu einer resultierenden Ortung wird durch eine dynamische Fusion der Teillösungen unter Berücksichtigung der Einsatzumgebungen erreicht. Als Maßstab für die Aussagekraft der einzelnen Lösungen wird hierbei auf die Kovarianz der entsprechenden Ortungslösung zurückgegriffen.

4.1.4 Übergangslose Navigation basierend auf der Einsatzumgebung

Analog zu der übergangslosen Ortung basiert auch das Konzept der übergangslosen Navigation auf der ganzheitlichen Digitalisierung der Einsatzumgebung. Die Analyse der Einsatzszenarien sowie der Ansätze für die Navigation in Innen- und Außenbereichen des Stands der Technik legen dabei nahe, dass sich Lösungen des einen Teilbereiches nicht ohne weiteres auf die anderen Einsatzbereiche transferieren lassen. Daher ist im Bereich der Navigation ebenfalls ein informierter Wechsel zwischen den Navigationslösungen zielführend.

Der Einsatz einer knotenbasierten Darstellung der Einsatzumgebung ermöglicht dabei einen hierarchischen Ansatz der Pfadplanung und Navigation fahrerloser Schlepper, wie er in Abbildung 8 dargestellt ist. Auf der obersten Ebene wird die digitalisierte Einsatzumgebung als hybride topologische Karte genutzt, wobei bereits äußere Einflussfaktoren, wie beispielsweise Maximalgeschwindigkeiten, berücksichtigt werden können. Basierend auf dieser topologischen Karte lassen sich Start und Zielpunkte sowie gegebenenfalls notwendige Zwischenziele im Referenzsystem definieren. Anhand der inhärenten Informationen der hybriden topologischen Karte und einer gewählten Metrik wird ein optimaler Transportpfad geplant. Bei der Ausführung der Navigation wird basierend auf dem Ergebnis der Ortung für jede Kante des Streckennetzes evaluiert, ob sich diese im Innen-, Außen- oder Transitbereich befindet. Basierend auf diesen Informationen werden die genutzten Algorithmen für die Navigation ausgewählt und appliziert.

Außenbereiche im hallenübergreifenden Einsatz fahrerloser Schlepperfahrzeuge zeichnen sich allgemein durch wenig Infrastruktur und schwach strukturierte Umgebungen aus. Wechselnde Umgebungsbedingungen und Kontakt mit anderen Teilnehmern des Mischverkehrs erfordern eine adaptive und reaktive Form der Navigation, die sich an den kognitiven Fähigkeiten personengeführter Systeme orientiert. Anstelle von fest vorgegebenen digitalen Leitlinien eröffnet der Einsatz einer freien Peilung in Verbindung mit einer situationsabhängigen Steuerung Möglichkeiten für den potentiell sicheren Betrieb des fahrerlosen Schleppers. Basierend auf den Sensordaten der Onboard-Sensorik wird dabei definiert, welche Sektoren vor dem Fahrzeug in der gewünschten Richtung des topologischen Pfades befahrbar sind. Innerhalb dieser Sektoren kann der fahrerlose Routenzug linear frei agieren, da eine potentielle Kollision ausgeschlossen ist.

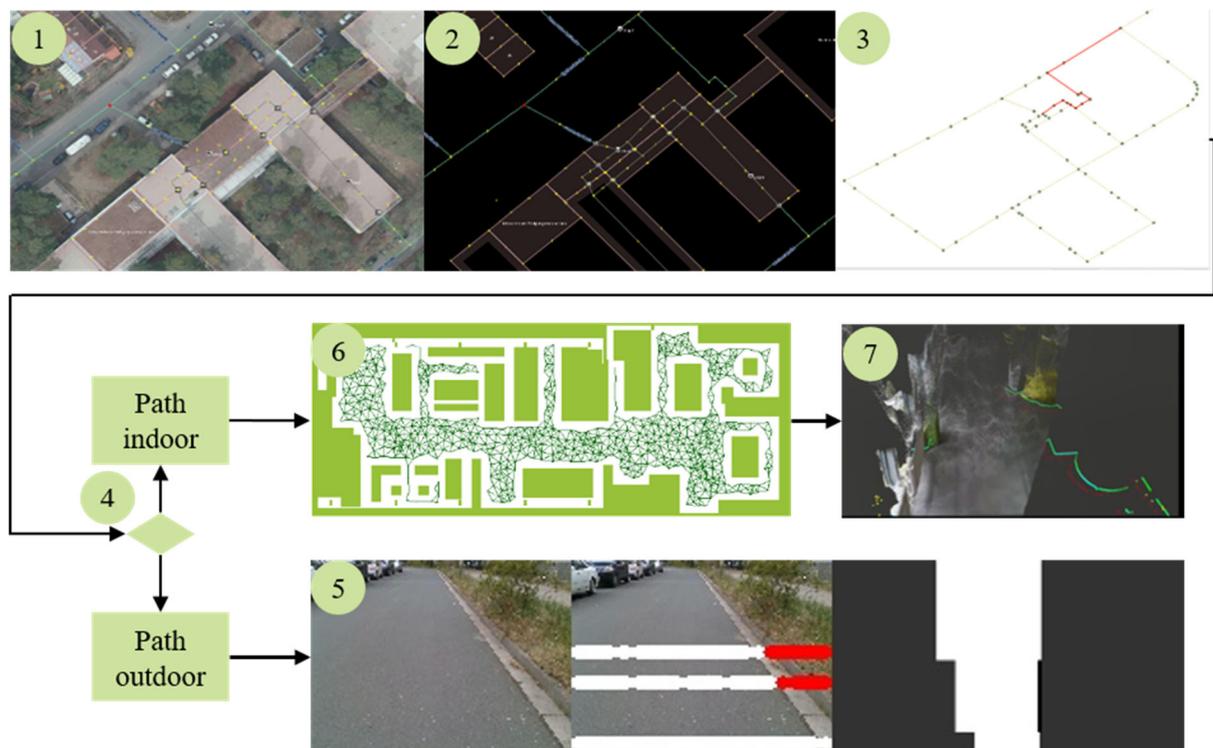


Abbildung 8: Hierarchischer Ansatz für die übergangslose Navigation fahrerloser Schlepper

In Innenebereichen zeigt eine Analyse des Stands der Technik, dass die Nutzung einer digitalen Leitlinie im komplexen Umfeld von Produktions- und Logistikhallen die Navigation des

Systems zielführen unterstützen kann. Da die Pfadplanung der höchsten Hierarchieebene nicht für die detaillierte Definition einer digitalen Leitlinie geeignet ist, muss in einem niedrigeren Abstraktionsgrad eine feingranularere Pfadplanung durchgeführt werden. Als geeigneter Kompromiss zwischen Aktualität und Rechenaufwand für die Pfadplanung eignet sich hier die Verwendung einer probabilistischen Landkarte, die einen Arbeitsbereich mit einem vordefinierten Streckennetz abbildet. Dieses Streckennetz kann ebenfalls basierend auf inhärenten Daten der digitalisierten Einsatzumgebung geladen und verwendet werden. Aufgrund der konstanten Umgebungsbedingungen im Innenbereich reicht hier die Anwendung eines für das Bewegungsmodell eines Schleppers modifizierten A*-Algorithmus basierend auf den metrischen Abständen der Punkte des Streckennetzes aus.

Transitbereiche zeichnen sich durch meist beengte Passagen aus, die dabei jedoch in der Regel frei von Hindernissen und komplexen Spurführungen sind. Daher wird konzeptionell in diesem Umfeld der Einsatz eines engen Regelkreises mit vorgegebener Trajektorie als ausreichend eingeschätzt. Basierend auf den Knotenkoordinaten des Start- und Zielpunktes des Transitbereiches kann dabei eine einfache Peilung mit anschließender Geradeausfahrt durchgeführt werden.

Durch die Nutzung der übergeordneten hybriden topologischen Karte mit absoluten Referenzen lässt sich die übergangslose Navigation durch ein Umschalten der entsprechenden Navigationslösungen an den jeweiligen Knotenpunkten durch die inhärenten Informationen realisieren.

4.1.5 Rekonfigurationsfähiger Zustandsautomat für die Steuerung des Verhaltens

Zentraler Bestandteil des Konzeptes der übergangslosen Ortung sowie der Navigation ist die Fähigkeit des fahrerlosen Schleppers, seine Konfiguration zur Laufzeit des Systems zu verändern. Eine Konfiguration stellt dabei eine eindeutige Verknüpfung einer Art der Ortung, einer Art der Navigation sowie einer adäquaten Gewichtung der Sensoren basierend auf den aktuellen Einsatzbedingungen voraus. Basierend auf den beschriebenen Witterungsbedingungen und den Konzepten für die Ortung und Navigation wurde ein rekonfigurationsfähiger Zustandsautomat entworfen, der den flexiblen und adaptiven Einsatz eines fahrerlosen Schleppers ermöglicht. Der grundsätzliche Aufbau des Zustandsautomaten für ein fahrerloses Schleppersystem ist in Abbildung 9 dargestellt.

Der rekonfigurierbare Agent stellt die eigentliche Intelligenz des fahrerlosen Schleppers dar und adaptiert die Verfahren zur Lokalisierung, Navigation und Sensordatenfusion, um sich entsprechend den vorherrschenden Einsatzbedingungen optimal anzupassen. Er führt auch die eigentliche Bewegung sowie die Transformation einzelnen Referenzsysteme in das globale Weltkoordinatensystem durch. Die Rekonfiguration erfolgt anhand eines Kataloges an potentiellen Zuständen, die anhand eines Entscheidungsbaumes gewählt werden. Die Implementierung erfolgt konzeptionell als dynamischer Zustandsautomat, welcher zur Laufzeit abgeändert werden kann.

Die Anzahl der relevanten Konfigurationen ergibt sich aus allen adaptierbaren Eigenschaften des Systems und muss somit anwendungsspezifisch festgelegt werden. Die unterschiedlichen Werte, die ein Parameter P als Adaption der Sensoren dabei annehmen kann, definieren seine Wertemenge W_P . Um eine Strategie zur dynamischen Rekonfiguration des Roboters zu definieren, müssen daher zunächst die Parameter P_1, P_2, \dots, P_n identifiziert werden, die zur

Laufzeit zu konfigurieren sind. Diese Parameter definieren für einen Agenten die Menge K aller seiner möglichen Konfigurationen:

$$K = W(P_1) \times W(P_2) \times \dots \times W(P_n)$$

Dabei wird o.B.d.A eine festgelegte Sortierreihenfolge der Parameter angenommen.

Zudem muss bestimmt werden, von welcher Menge an Umgebungsvariablen $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ die Konfiguration des Roboters abhängig ist. Dies können einerseits die Wetterumstände, denen der fahrerlose Schlepper ausgesetzt ist, und andererseits die Aufenthaltsbereiche des Schleppers sein.

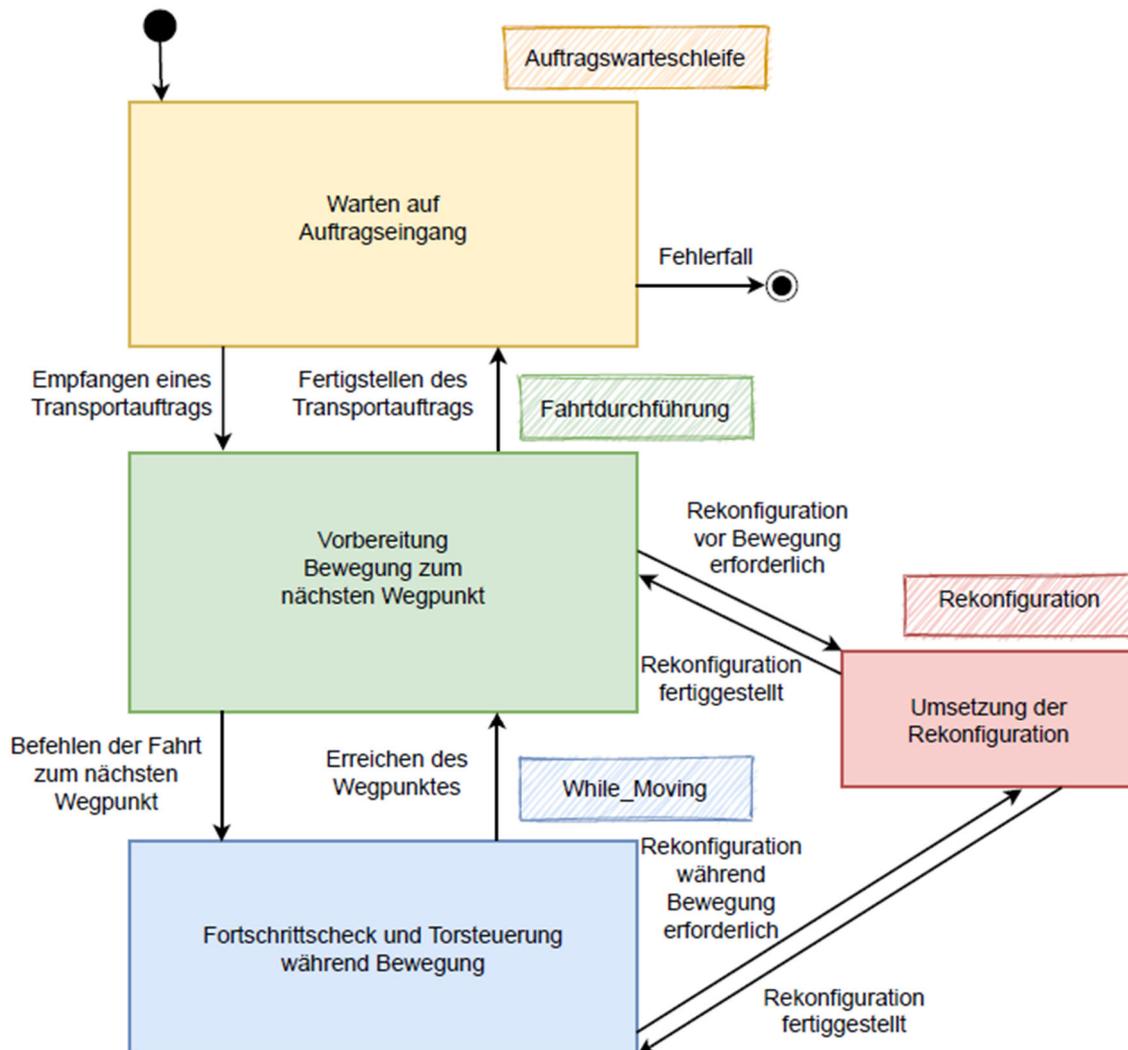


Abbildung 9: Rekonfigurationsfähiger Zustandsautomat für die übergangslose Ortung und Navigation

Sind alle Konfigurationsparameter und Umgebungsvariablen bestimmt, muss entschieden werden, unter welchen Umgebungsbedingungen welche Konfiguration aktiviert werden kann. Diese Bedingungen müssen widerspruchsfrei und vollständig sein. Widerspruchsfreiheit bedeutet, dass sich die Bedingungen zweier Konfigurationen nicht überlappen dürfen, also aus einer Bedingung eindeutig immer nur genau eine Konfiguration abgeleitet werden kann. Vollständigkeit ist gegeben, wenn für alle gültigen Umgebungsbedingungen eine Zuweisung zu einer Konfiguration vorliegt. Um das zu gewährleisten, eignet sich eine Darstellung als Ent-

scheidungsbaum. Ein Knoten enthält jeweils eine Entscheidungsfrage, die zu seinen Kinderknoten weggehenden Kanten sind vollständige und widerspruchsfreie Prädikate. Die Blätter sind die unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen zu aktivierenden Konfigurationen. Ein konkreter Entscheidungsbaum ist aus den Spezifikationen eines spezifischen fahrerlosen Schleppers ableitbar. Für einen fahrerlosen Schlepper im hallenübergreifenden Einsatz ist diese Entscheidungsbaum exemplarisch in Abbildung 10 dargestellt.

Eine Überprüfung der aktuellen Konfiguration sowie die gegebenenfalls notwendige Änderung der Konfiguration geschieht konzeptionell zu folgenden Zeitpunkten im Betrieb des Systems:

1. Beim Start des fahrerlosen Schleppers
2. Zyklische Prüfung auf Schwellwertüberschreitungen beim Empfang neuer Umwelteinflüsse
3. Nach Erreichen eines Wegpunkts und vor dem Losfahren zum nächsten Wegpunkt der obersten Hierarchiestufe

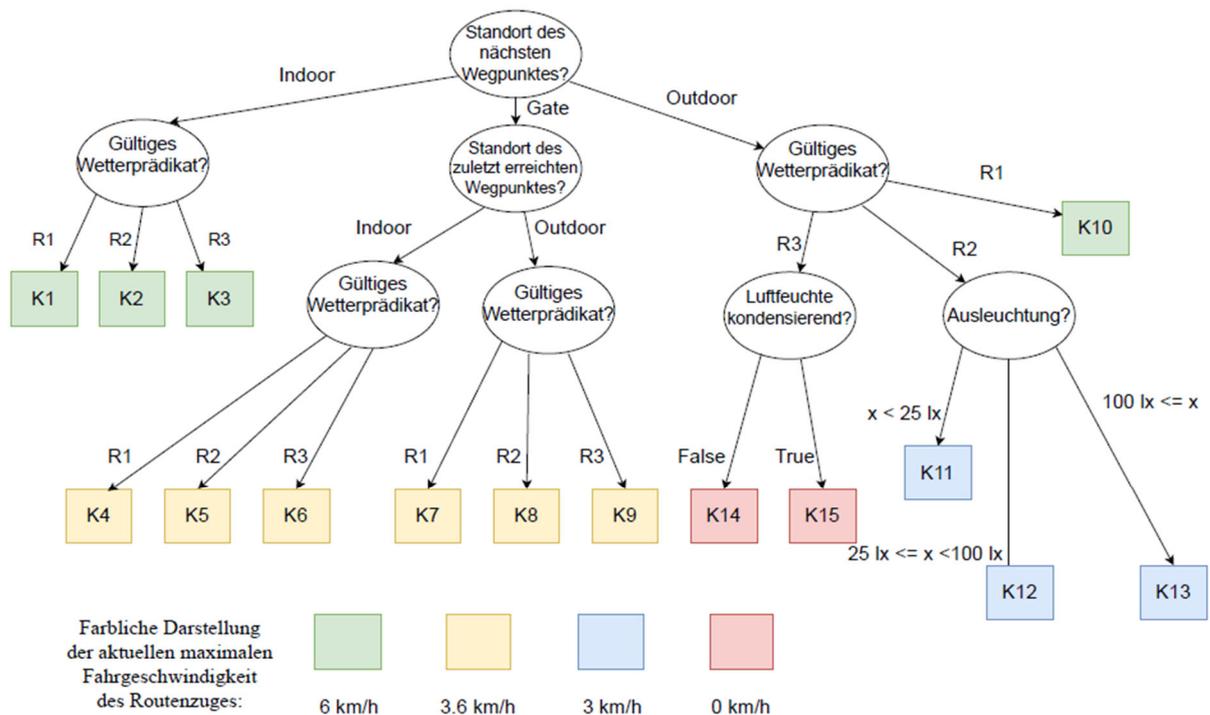


Abbildung 10: Beispielhafte Konfigurationen eines fahrerlosen Schleppers im hallenübergreifenden Einsatz bei Mischverkehr

4.1.6 Zusammenfassung des Konzeptes für den Betrieb fahrerloser Schlepper im Innen- und Außenbereich mit kosteneffizienten Sensoren

Das entwickelte Konzept des potentiell sicheren Betriebs fahrerloser Schlepper im Innen- und Außenbereich bei Mischverkehr unter Verwendung kosteneffizienter Sensoren lässt sich wie folgt zusammenfassen. Durch eine geeignete Form der Umgebungsrepräsentation in maschinenlesbarer Form wird dem fahrerlosen Schlepper die Nutzung von implizitem Wissen über die Einsatzumgebung ermöglicht. Basierend auf diesem Wissen, welches über eine Referenz

der ungefähren Position in den Weltkoordinaten abgerufen werden kann, wird dem Schlepper umgebungsspezifisch über einen rekonfigurierbaren Agenten die eigenständige Wahl geeigneter Verfahren für die optimale Ortung und Navigation ermöglicht. Zudem können aktuelle Umgebungsinformationen evaluiert und somit die Zuverlässigkeit der Sensorinformationen im Rahmen der Sicherheitsfunktion und der Sensordatenfusion des fahrerlosen Schleppers bewertet werden.

4.2 Realisierung einer übergangslosen Ortung innerhalb eines Labordemonstrators

In Arbeitspaket 2 wurde das definierte Konzept für die übergangslose Ortung mittels zweier Labordemonstratoren weiter spezifiziert, umgesetzt, evaluiert und bewertet. Dabei wurden die einzelnen Methoden der Lagekopplung und Lagepeilung unter Nutzung kosteneffizienter Sensoren umgesetzt, um die Fähigkeiten der entsprechenden Ansätze bewerten zu können. Zudem wurden Einflüsse auf die Aussagefähigkeiten der einzelnen Schätzungen für die Ortung in Abhängigkeit von Bewegungsmodell und Einsatzumgebung ermittelt und im Rahmen einer dynamischen Fusion in die übergangslose Ortung überführt.

Eine Umsetzung der Funktionalitäten erfolgte dabei mit Hilfe von zwei Labordemonstratoren, die jeweils ein unterschiedliches Bewegungsmodell für die Evaluation der Methoden zur Lagekopplung bereitstellen. Die Lagepeilung wurde aufgrund des absoluten Charakters der Positionsbestimmung ohne Berücksichtigung des relevanten Bewegungsmodelles an einem Labordemonstrator umgesetzt.

4.2.1 Einführung in den Labordemonstrator „Robotino“ zur Umsetzung der Lagekopplung

Für die Evaluation der einzelnen Sensoren für die Lagekopplung in unterschiedlichen Bewegungsmodellen wurde die Applikationsplattform Robotino der Firma Festo als Labordemonstrator eingesetzt. Die Basis der Plattform besteht aus drei unabhängigen, motorisierten Mecanum-Rädern, die in einem Winkel von 120° zueinander montiert sind [54], wie in Abbildung 11 zu sehen ist. Damit ist dieses Fahrzeug omnidirektional angetrieben und kann sich in jede beliebige Richtung drehen und bewegen. Bei Rädern, die im Abstand d vom Robotermittelpunkt angebracht sind, hängen die Radgeschwindigkeiten w_1, w_2, w_3 und die Robotergergeschwindigkeiten \dot{x} , \dot{y} und $\dot{\theta}$ wie folgt zusammen [55]

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \cos(\theta) & d \\ -\sin(\frac{\pi}{3} - \theta) & -\cos(\frac{\pi}{3} - \theta) & d \\ \sin(\frac{\pi}{3} + \theta) & -\cos(\frac{\pi}{3} + \theta) & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad 4.1$$

mit:	w_1, w_2, w_3	Radgeschwindigkeiten in m/s
	$\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$	Robotergergeschwindigkeit m/s
	θ	Orientierung des Roboters in rad

Jedes Rad ist mit einem Drehzahlsensor ausgestattet. Zusammen mit dem Übersetzungsverhältnis und dem Raddurchmesser kann die jeweilige Radgeschwindigkeit ermittelt werden.

Dies ermöglicht die Berechnung der Lagekopplung basierend auf den Drehzahlsensoren. Die Plattform ist außerdem mit einer eigenen Recheneinheit ausgestattet. Sie läuft mit einem Linux-Betriebssystem und ist für die Steuerung des Roboters zuständig. Für die Realisierung der Lagekopplung im Rahmen der übergangslosen Ortung werden entsprechende Sensoren für die unterschiedlichen Verfahren gemäß dem Ortungskonzept an der Plattform befestigt.

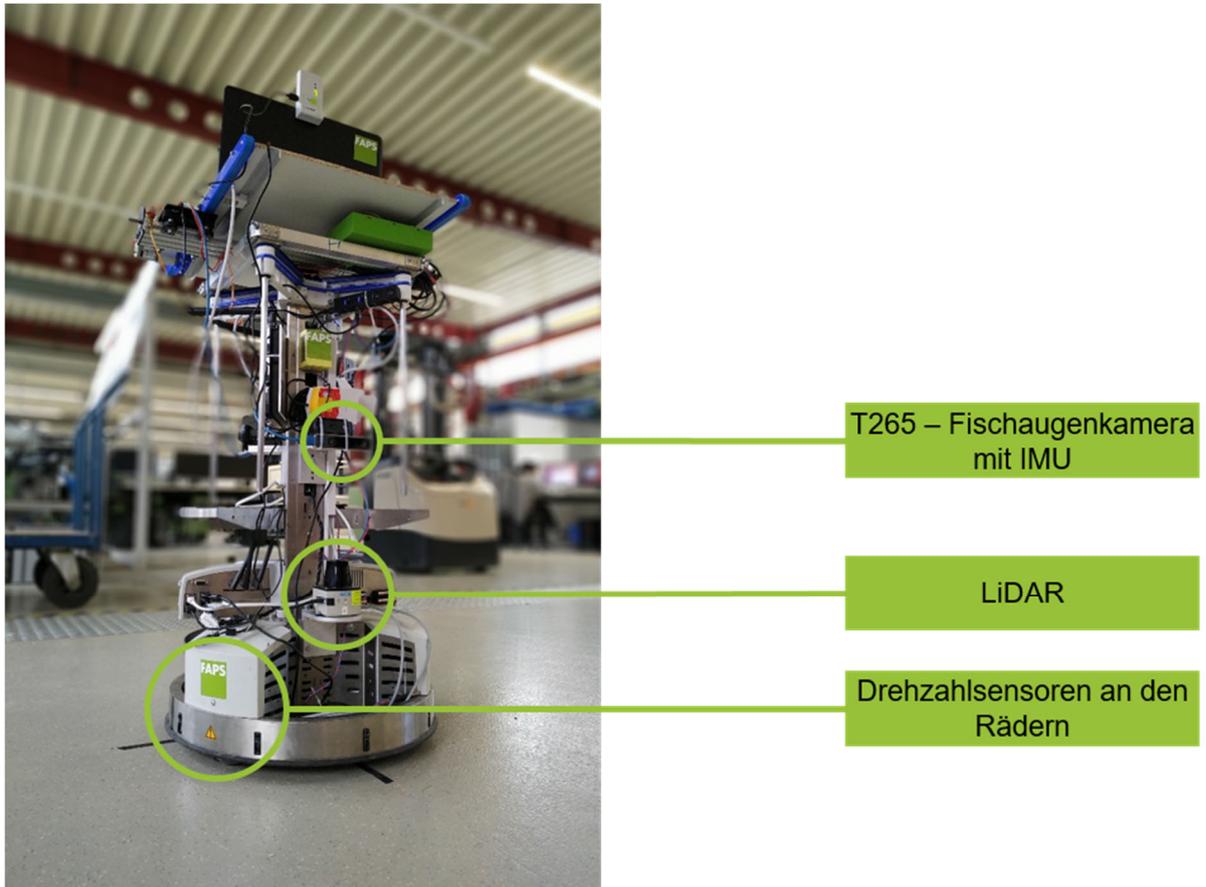


Abbildung 11: Labordemonstrator Robotino mit den Sensoren für die Realisierung einer übergangslosen Ortung

4.2.2 Einführung in den Labordemonstrator Linde P50lon zur Umsetzung der Lagepeilung und der übergangslosen Ortung.

Als weiterer Labordemonstrator für die Umsetzung und Evaluation der Lagepeilung gemäß dem definierten Konzept sowie der übergangslosen Ortung basierend auf Lagepeilung und Lagekoppelung dient ein Routenzug P50lon der Firma Linde, der durch ein Mitglied des Projektbegleitenden Ausschusses bereitgestellt wurde. Der Schlepper besitzt eine ausreichende Bodenfreiheit für den Einsatz in Innen- und Außenbereichen und eignet sich somit ideal als Labordemonstrator in diesem Bereich. Das Bewegungsmodell des Schleppers lässt sich als Dreiradkinematik beschreiben, die dem Ackermann-Modell ähnlich ist, aber nur ein angetriebenes, gelenktes Rad und zwei passive Räder im Heck aufweist. Abbildung 12 zeigt diese Konfiguration.

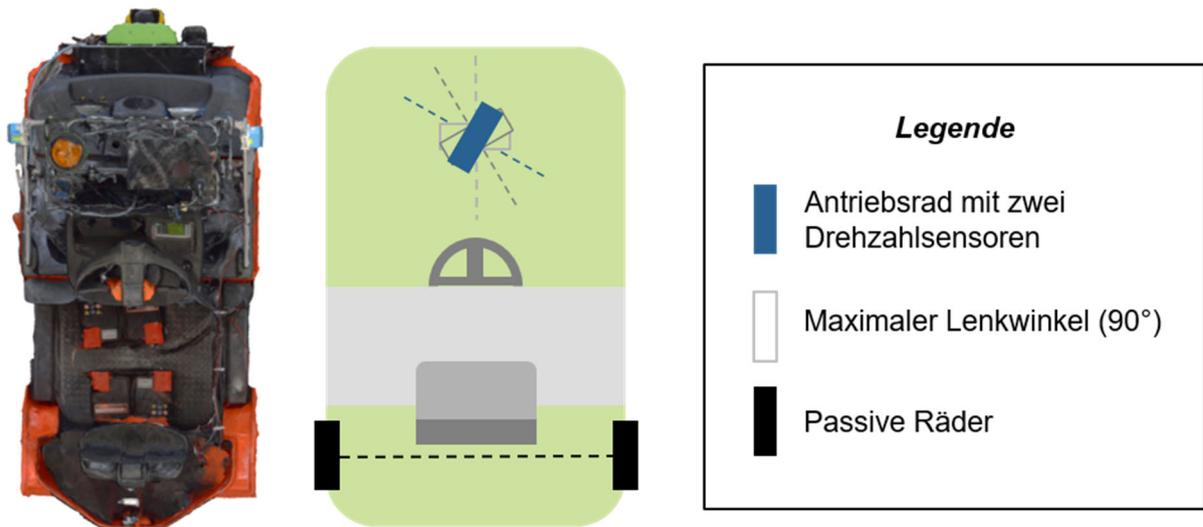


Abbildung 12: Bewegungsmodell der zweiten Applikationsplattform

Der momentane Drehpunkt dieses Fahrzeugs befindet sich dort, wo eine gedachte Linie durch die Welle des Vorderrads auf die Hinterachse trifft. Das angetriebene Rad kann bis zu 90° in jede Richtung gelenkt werden, was eine Drehung um das Zentrum der Hinterachse ermöglicht. Die Drehpunkte für die Lenkwinkel 30°, 60° und 90° sind exemplarisch in Abbildung 13 dargestellt. Vereinfacht kann diese Fahrzeugkonfiguration auch als Differentialantrieb aus Sicht der Hinterachse betrachtet werden.

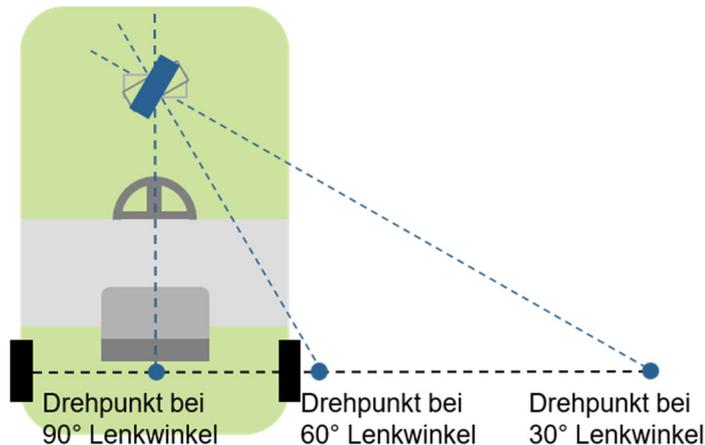


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Drehachse für die zweite Applikationsplattform

In Relation zu dem Bezugssystem des zweiten Labordemonstrators, welches physisch in der Mitte der Hinterachse platziert ist, können die Geschwindigkeiten des Roboters basierend auf den Sensorinformationen der Drehzahlsensoren wie folgt ausgedrückt werden. Es ist zu beachten, dass aufgrund der nicht-holonomischen Zwänge die Längsgeschwindigkeit immer Null bleibt.

$$\dot{x} = w * r * \cos \varphi \quad 4.2$$

$$\dot{\theta} = w * r * \sin \varphi \quad 4.3$$

mit:

- \dot{x} Lineare Geschwindigkeit des Roboters in m/s
- w Geschwindigkeit des Antriebsrades in m/s
- r Radius des Antriebsrades in m
- φ Lenkwinkel in rad
- $\dot{\theta}$ Winkelgeschwindigkeit des Roboters in rad/s

Abbildung 14 zeigt den zweiten Labordemonstrator mit den Sensoren für die übergangslose Ortung des Gesamtsystems unter Nutzung der in der Konzeption definierten Ansätze für die Lagekopplung und Lagepeilung mittels kosteneffizienter Systeme.

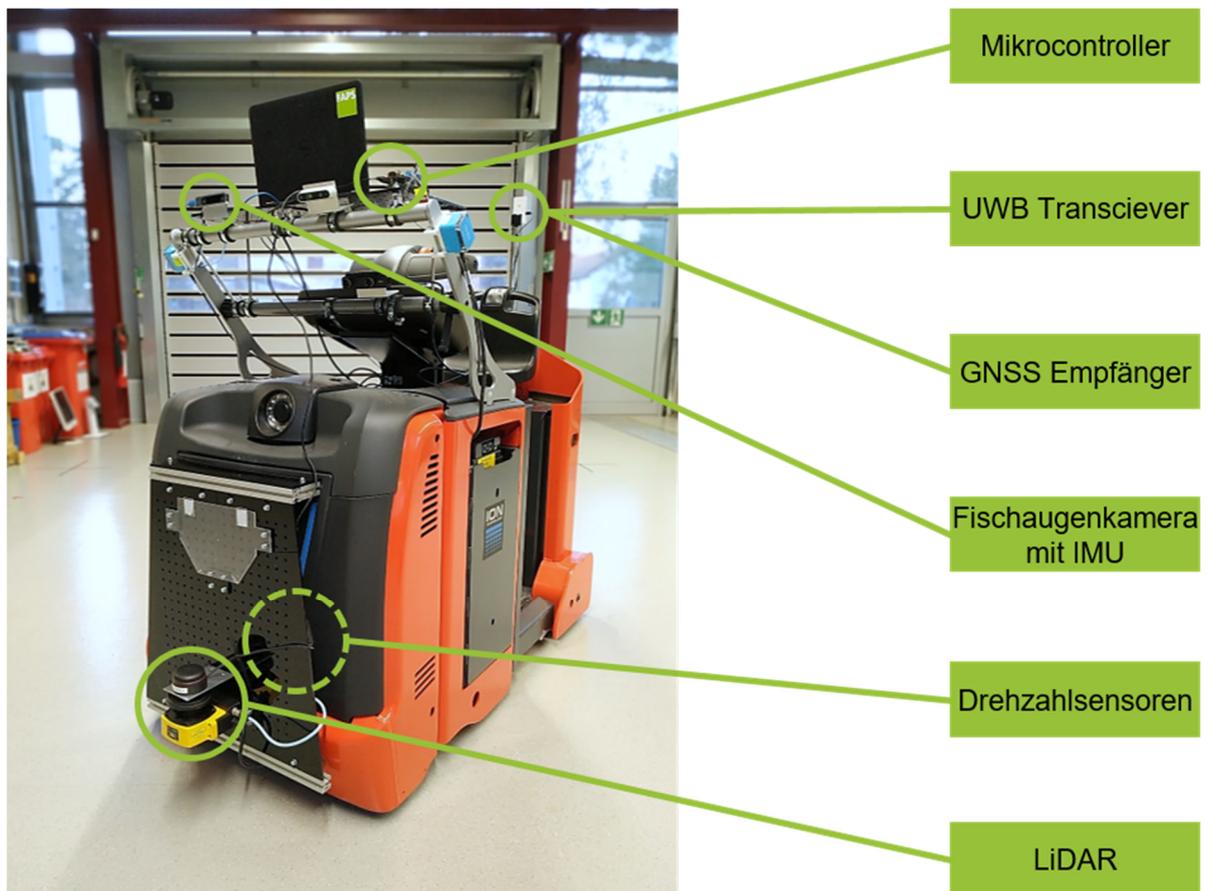


Abbildung 14: Setup der zweiten Applikationsplattform mit den Sensoren für die Lagekopplung und Lagepeilung
Als kosteneffiziente Komponenten die übergangslose Ortung wurden die folgenden Sensoren und Systeme ausgewählt:

- **Mikrocontroller:** Kommuniziert mit den Aktoren und erhält so die Informationen der Drehzahlsensoren
- **UWB-Transceiver:** UWB-Sensor für die Lagepeilung mittels UWB-System von Decawave

- **GNSS-Empfänger:** NEO-M8 GNNS-Empfänger von u-blox, für die Lagepeilung über GNNS [43]
- **Stereokamera Realsense T265 mit IMU:** Identisches Modell wie in 4.2.3.1 beschrieben für die Lagekoppelung basierend auf optischem Fluss
- **Drehzahlsensor:** Am gelenkten Rad angebracht, liefern die Sensoren Informationen für die Lagekoppelung basierend auf Rad-Drehzahlen
- **LiDAR RPLiDAR A2M8:** Das LiDAR-System RPLiDAR A2M8 von Slamtec bildet eine kostengünstige Lösung für die LiDAR-Erfassung der Umgebung ab (oberer LiDAR-Sensor in Abbildung 14). Die Sensorinformationen werden für die Lagekoppelung basierend auf LiDAR-ICP und die Lagepeilung mittels AMCL genutzt.

4.2.3 Vorstellung der Sensoren und Verfahren für die Lagekoppelung im Kontext der übergangslosen Ortung

In den folgenden Unterkapiteln werden die kosteneffizienten Sensoren und Verfahren für die Lagekoppelung detailliert, die im Rahmen des Konzeptes für die übergangslose Ortung identifiziert und spezifiziert wurden.

4.2.3.1 Stereo-Kamera mit IMU: Intel Realsense Tracking-Kamera T265

Die Intel Realsense Tracking-Kamera T265 ist eine kosteneffiziente Lösung für die optische Merkmalerfassung. Sie verfügt über zwei nach vorne gerichtete Fisheye-(Weitwinkel-)Kameras, eine IMU und eine eingebettete Verarbeitungseinheit. Jede Kamera erfasst die Umgebung mit einem Sichtfeld von 163° in monochromer Farbe bei 848 x 800 Pixeln und 30 Bildern pro Sekunde (FPS). Die Kamera muss für die korrekte Funktionsweise so angebracht werden, dass die Sicht der Kameras nicht durch Teile des Roboters verdeckt wird. Die erfassten Sensorinformationen der Kamera sind in Abbildung 15 dargestellt.



Abbildung 15: Umgebungserfassung der Intel Realsense T265

4.2.3.2 LiDAR SICK TiM571

Ein LiDAR (TiM571 der Firma SICK) wurde am ersten Labordemonstrator angebracht, um die Lagekopplung mittels LiDAR-ICP zu evaluieren. Gemäß Datenblatt für den Außeneinsatz geeignet, arbeitet der LiDAR mit einer Abtastrate von 15 Hz und erfasst dabei Datenpunkte in einem Sichtfeld von 270° bei einer Winkelauflösung von 0,33°. Seine Reichweite beginnt bei 0,05 m mit einer statistischen Genauigkeit von 20 mm bis zu einer Entfernung von 10 m. Die maximale Reichweite beträgt 25 m.

Die Implementierung der Software für die Auswertung der Sensoren, die Fusion der Sensordaten und die Ansteuerung der Aktoren der Labordemonstratoren erfolgt über das Robot Operating System (ROS). ROS stellt als Robotik-Framework eine Vielzahl von Funktionalitäten für Anwendungen bereit. Es beinhaltet eine Sammlung von Werkzeugen, Bibliotheken und Hilfsmitteln zur Erstellung komplexer Systeme und erlaubt die Einbindung von Funktionen als einzelne Pakete innerhalb des Systems. Diese einzelnen Instanzen der Funktionalitäten kommunizieren miteinander, indem sie Nachrichten über Topics und Services austauschen. ROS stellt zudem ein mächtiges Werkzeug für die Definition von Relationen zwischen unterschiedlichen Koordinatensystemen zur Verfügung. „tf“ ermöglicht die Definition von geometrischen Beziehungen zwischen Sensoren und dem Bewegungsmodell der Applikationsplattform, wodurch Transformationen zwischen den Sensordaten automatisiert appliziert werden können. Die Umsetzung der übergangslosen Ortung erfolgte auf dem ersten Labordemonstrator in ROS Kinetic Kame unter Ubuntu 16.04 auf einem Dell Latitude E5450. Der Rechner verfügt über eine Intel Core i7 5600U CPU mit 8 GB Arbeitsspeicher.

4.2.3.3 Lagekoppelung basierend auf Rad-Drehzahlen

Die Geschwindigkeiten der Räder des ersten Labordemonstrators, die von den angebrachten Drehzahlsensoren bestimmt werden, zusammen mit dem Wissen, wie diese in die Geschwindigkeit des Roboters übersetzt werden, liefern die notwendigen Informationen für die erste Umsetzung der Lagekoppelung. Die resultierende Geschwindigkeit der Plattform kann integriert werden, um Informationen über die Pose (Position und Orientierung) nach jedem Messschritt zu erhalten. Diese Pose wird im nächsten Messschritt verwendet, um über Lagekoppelung die neue Pose des Systems zu berechnen. Dieser Prozess wird iterativ ausgeführt.

Die Hauptfehlerquellen bei der Lagekoppelung basierend auf Drehzahlsensoren sind die folgenden:

- Begrenzte Auflösung der Sensoren
- Mathematische Unschärfe bei der Positionsintegration
- Fehlausrichtung des Rades
- Unvollkommene Form und Größe (Durchmesser) der Räder
- Variation im Radaufstandspunkt
- Unregelmäßiger Bodenkontakt (z. B. Rutscheffekt, nicht ebene Oberfläche)

Um Unsicherheiten in der Lagekopplung unter Berücksichtigung hoher Abweichungen für die Rotationskomponente zu berücksichtigen, wird jede Messung mit einer künstlichen Kovarianz (x , y , yaw) versehen. Die Kovarianz gibt dabei ein Maß für die sensoreigene Schätzung der Zuverlässigkeit der entsprechenden Messung an und wird in Metern angegeben. Ohne Berücksichtigung der Umgebungseinflüsse wird die Kovarianz der ersten Forschungsplattform aufgrund des physischen Aufbaus wie folgt definiert:

$$cov = \begin{bmatrix} 0.001 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.001 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

Für den zweiten Labordemonstrator, den Schlepper P50lon, ergibt sich die Kovarianz für die Lagekopplung über Drehzahlsensoren aufgrund der abweichenden Konfiguration und anderer Sensoren zu:

$$cov = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.01 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.01 \end{bmatrix}$$

Im Kontext der Lagekopplung basierend auf Raddrehzahlen hängen die Kovarianzen direkt mit dem Bewegungsmodell und der Einsatzumgebung eines fahrerlosen Schleppers zusammen. Eine Adaption der Kovarianzen in Hinblick auf die reale Einsatzumgebung ermöglicht es somit, eine realitätsnahe Aussage über die Zuverlässigkeit der gemeldeten Teilortung über die Lagekopplung zu treffen.

4.2.3.4 Lagekopplung basierend auf optischem Fluss

Die Lagekopplung basierend auf optischem Fluss beschreibt den Prozess der Berechnung der Verschiebung einer Kamera zwischen zwei Bildern mit Hilfe von Computer-Vision-Techniken (z. B. mit Hilfe einer erscheinungsbasierten oder merkmalsbasierten Methode). Durch die Anwendung dieses Verfahrens zur Berechnung der Transformation der Kameraposition zu jedem Zeitpunkt in Echtzeit kann eine vollständige Bewegungstrajektorie des messenden Systems bestimmt werden.

Die Realsense T265-Kamera als kosteneffizienter Sensor verwendet eine integrierte Intel Movidius Myriad 2.0 Visual Processing Unit, die eine 3-D-Pose aus den von den Kameras und der IMU generierten Daten mit einer Rate von 200 Hz schätzt. Die T265 verfügt über eine SLAM-Funktionalität, mit der intern eine Karte erstellt wird. Diese Funktion zur Lagepeilung wurde abgeschaltet, um bei jedem Teststart ein deterministisches Trackingverhalten über Lagekopplung zu gewährleisten. Außerdem ermöglicht die Kamera Funktionen zur Re-Lokalisierung bei divergierenden Posen, was aber im Rahmen dieses Arbeitspaketes deaktiviert wurden, um konsistente Daten zu sammeln, die sich als kontinuierliche Datenquelle für die Lagekopplung eignen.

Die Pose- und Geschwindigkeitsschätzungen werden im Referenzrahmen der Kamera angegeben. Für die weitere Verarbeitung müssen die Pose und die Geschwindigkeit in die Referenz des Labordemonstrators transformiert werden um dessen Bewegungen abzubilden. Je nach Ausrichtung der Kamera auf dem messenden System muss somit die Pose und die Geschwindigkeit des Sensors in die Bewegungsebene des Labordemonstrators überführt werden. Da die Qualität der Bewegungserfassung durch optischen Fluss direkt abhängig von der Anzahl der erfassten und differenzierbaren Merkmale der beiden Sensoren der Kamera ist, erweist sich eine Anbringung der Kamera in Fahrtrichtung des Labordemonstrators zielführend. In diesem Fall müssen nur die x- und y-Komponente der linearen Geschwindigkeiten transformiert und bei Rotation kompensiert werden, während die Giergeschwindigkeit zwischen Sensor und Labordemonstrator identisch ist.

Die Lagekopplung basierend auf optischem Fluss erfordert eine ausreichend beleuchtete und texturreiche Umgebung. Im Normalbetrieb mit hohem Vertrauen sind die Kovarianzen in Metern wie folgt gegeben:

$$cov = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.01 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0001 \end{bmatrix}$$

Die Kamera meldet ihre Konfidenz eigenständig mit den Zuständen „hoch“, „mittel“, „niedrig“ und „fehlgeschlagen“. Abhängig von dieser Konfidenzmeldung können die Kovarianzen mit einem Faktor von 1, 10, 100 bzw. 1000 angepasst werden. Aus einer Betrachtung der werkseitigen Festlegung der Kovarianzen wird bereits ersichtlich, dass die Erfassung des optischen Flusses für rotatorische Bewegungen als sehr genau eingestuft wird. (Faktor 0.0001) Dies wird später im Rahmen der Evaluation und Bewertung der Verfahren bestätigt.

4.2.3.5 Lagekopplung basierend auf LiDAR-ICP

Eine dritte Variante der Bewegungsdatengeneration für eine Lagekopplung wird durch die Auswertung von LiDAR-Daten bereitgestellt. Ein iterativer Closest-Point-Algorithmus (ICP) berechnet die Verschiebung zwischen zwei aufeinanderfolgenden LiDAR-Scans und schätzt so die Bewegung des Roboters unter der Annahme einer statischen Umgebung. Ähnlich wie bei der Lagekopplung basierend auf optischem Fluss ist diese Methode von der Erfassung und Identifikation von Merkmalen in der Umgebung abhängig. Sie kann folglich versagen, wenn der LiDAR keine ausreichende Menge an Merkmalen erfassen kann oder die erfassten Merkmale nicht ausreichend differenzierbar sind.

Die Kovarianz der Pose-Schätzung basierend auf der Bewegungserfassung mittel LiDAR-ICP lässt sich standardmäßig wie folgt darstellen:

$$cov = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.01 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.01 \end{bmatrix}$$

Jede dargestellte Variante der Lagekopplung liefert in ihrer Messung eine Standorthypothese für die Bewegung des Labordemonstrators. Das Ziel der Ortung ist es, diese Hypothesen dynamisch zu einer einzigen Schätzung zu verschmelzen, die genauer und robuster ist als jede Hypothese für sich.

4.2.4 Sensoren und Verfahren für die Lagepeilung im Kontext der übergangslosen Ortung

In den folgenden Kapiteln werden die entsprechenden Verfahren für die Lagepeilung vorgestellt, die für die übergangslose Ortung auf dem zweiten Labordemonstrator integriert wurden.

4.2.4.1 Lagepeilung durch LiDAR und Adaptive Monte Carlo Ortung mittels gitterbasierter Karte

Für die absolute Lagepeilung mittels LiDAR-Messdaten wird eine Karte als Referenz für den Abgleich mit der sensorischen Umfelderkennung verwendet. Ein eingehender LiDAR-Scan wird mit der Karte abgeglichen, um die aktuelle Position des Roboters zu schätzen. Ein einzelner Scan reicht dabei nicht aus, um die Position und Orientierung in der Umgebung eindeutig zu bestimmen. Es können Mehrdeutigkeiten durch symmetrische Formen in der Karte und Ungenauigkeiten in der sensorischen Erfassung auftreten. Daher wird bei der adaptiven

Monte-Carlo-Ortung (AMCL), wie in [20]; [21] beschrieben, die Multimodalität eines Partikel-filters genutzt, um eine Verteilung wahrscheinlicher Posen innerhalb des Kartenrahmens dar-zustellen. Abbildung 16 zeigt den schematischen Ablauf der Anwendung der Lagepeilung durch Nutzung des adaptiven Monte Carlo-Filters. Zu Beginn wird eine Menge von Partikeln entweder global auf der gesamten Karte oder um eine bestimmte Pose herum verteilt. Jeder Partikel stellt in diesem Fall eine Hypothese der Pose und des Bewegungszustandes des Roboters dar.

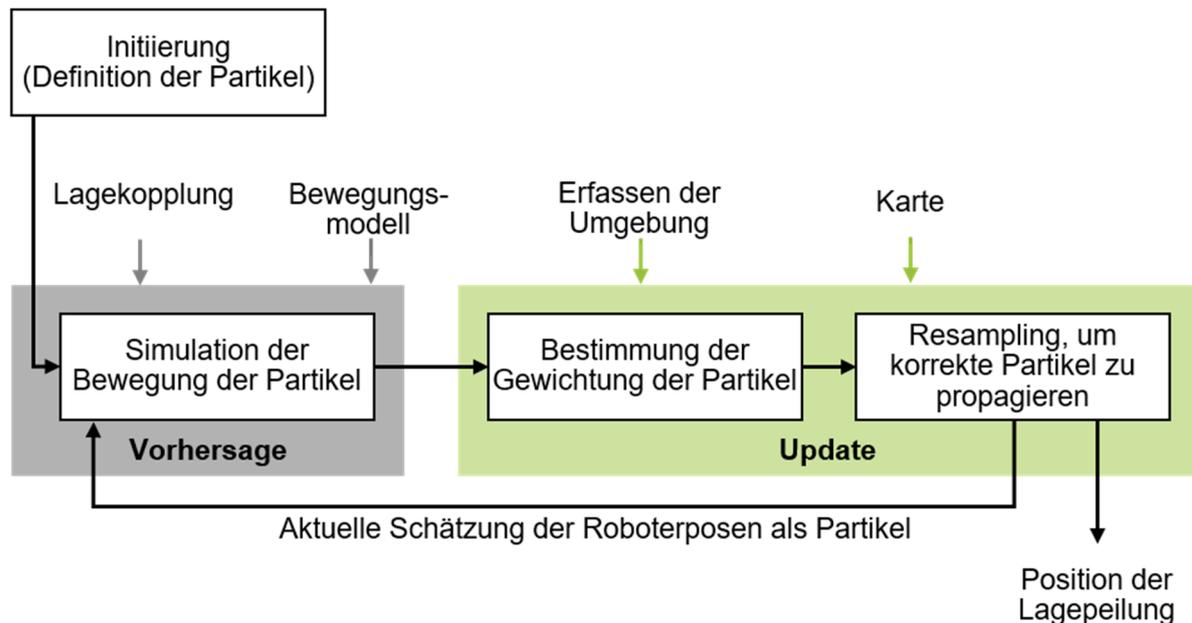


Abbildung 16: Schematischer Ablauf der Lagepeilung mittels adaptivem Monte Carlo Filter

Während sich der Roboter durch die Umgebung bewegt, werden die Partikel mit einem differentiellen Bewegungsmodell und dem Ergebnis der Ortung des vorherigen Filterschrittes propagiert. Dieser Schritt der Simulation des Zustandes appliziert zudem zusätzliches Rauschen, um die Unsicherheit in der sensorischen Erfassung der Bewegung zu simulieren. Basierend auf der Beobachtung von natürlichen Landmarken, in diesem Fall des LiDAR-Scans, und dem Vergleich mit den prognostizierten Posen der Landmarken basierend auf dem Bewegungsmodell, wird eine Bewertung jedes Partikels durchgeführt. Jeder Partikel wird demnach gewichtet, wie gut die Merkmale im LiDAR-Scan mit den Merkmalen in der Karte übereinstimmen, wenn sich der Roboter an der Position dieses Partikels befinden würde. Dieser Prozess stellt die eigentliche Lagepeilung dar. Schließlich wird der Schritt des Resamplings durchgeführt. Abhängig von den Gewichten wird ein neuer Partikelsatz mit einer erhöhten Anzahl von Partikeln in der Nähe der wahrscheinlichsten Posen erzeugt. Dieser Partikelsatz erhält die einheitliche Gewichtung des ursprünglichen Partikels. Aufgrund des großen Rechenaufwandes wird der Partikelfilter diskret ausgeführt und der Resampling-Prozess nur bei einer bestimmten Summe von Roboterbewegungen ausgelöst werden. Außerdem wird die Stichprobengröße strategisch angepasst und damit verringert, wenn die Partikel um dieselbe Pose konvergiert haben.

Nach einer Weile verschwinden unwahrscheinliche Pose-Schätzungen und die Partikel sammeln sich um eine einzige Pose. Diese Konvergenz kann potentiell gegen eine falsche Schätzung laufen, besonders wenn die Anzahl der verwendeten Partikel klein ist oder wenn die

Partikel beim Schritt der Initiierung über eine große Fläche verteilt sind. Damit sich der Algorithmus von einer fehlgeschlagenen Konvergenz erholen kann, werden regelmäßig zufällig platzierte Partikel initiiert. Mit dieser Modifikation ist die adaptive Monte-Carlo-Ortung auch in der Lage, Divergenzen in der Ortung zu beheben. Zum Abschluss der Lagepeilung basierend auf dem AMCL-Algorithmus wird nach jedem Filterschritt die beste Pose-Schätzung (bei der größten Agglomeration von Partikeln) mit einer Kovarianzmatrix ausgegeben, die das Vertrauen in diese Schätzung angibt. Da der Prozess erst bei einer minimalen Roboterbewegung von mindestens 0,1 Metern in linearer Richtung oder einer Rotation von mindestens 0,1 Radiant ausgelöst wird, wird die beste Pose-Schätzung nicht veröffentlicht, wenn der Roboter anhält. Zu diesem Zeitpunkt wird davon ausgegangen, dass die letzte Pose weiterhin gültig ist. Daher wird die letzte Pose-Schätzung kontinuierlich mit einer Rate von 10 Hz zusammen mit einem aktuellen Zeitstempel veröffentlicht. Die Zuverlässigkeit der Pose-Schätzung sowie die Zeit des Algorithmus, bis entsprechend korrekte Teil-Ortungen verfügbar sind, lassen sich durch eine Initiierung des Filters um die tatsächliche Pose des Labordemonstrators signifikant verringern.

4.2.4.2 Lagepeilung über GNNS

Zur Ortung des Roboters mittels Lagepeilung im Außenbereich wurde das NEO-M8N GNSS-Modul der Firma u-blox [56] als kosteneffizienter Sensor in den Labordemonstrator integriert. Basierend auf mehreren TOA-Messungen zu Satelliten mit bekannten Standorten aus den GNNS-Umsetzungen GPS und GLONASS kann die Position des Empfängers auf der Erde bestimmt werden. Die Position wird im geografischen Koordinatensystem als Breiten- und Längengrade angegeben. Da die Erde eine Kugel ist, variiert die Länge eines Grades sowohl in der geografischen Breite als auch in der geografischen Länge von Ort zu Ort. In Zentral-Europa ist mit sieben Stellen nach dem Komma resultierend eine Positionsauflösung von 1,11 cm möglich. Die entsprechende Übersetzung der Lagepeilung in metrische Informationen sollte somit bei jedem Anwendungsfall überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Die Höhenmessung ist für die Lagepeilung mittels GNNS für fahrerlose Schlepper irrelevant, da zwei Außenbereiche physikalisch nicht übereinander liegen können. Der GNSS-Empfänger wurde zudem oberhalb der Hinterachse positioniert, wie in Abbildung 14 zu sehen ist. Bei einer anderen Platzierung müsste die Messung zusätzlich von der Montageposition auf die Orientierung des Roboters umgerechnet werden. Somit wäre die Lagepeilung von der Kurs-schätzung des Roboters abhängig. Eine falsche Schätzung der Orientierung würde dann die GNSS-basierte Positionierung verfälschen. Diese Fehlerquelle kann durch die entsprechende Sensorplatzierung eliminiert werden. Die Kovarianzen werden vom GNSS-System in Abhängigkeit von der Signalqualität berechnet und im Rahmen der Positionsschätzung veröffentlicht. Für die spätere Sensorfusion wird die mit einer Frequenz von 4 Hz gelieferte Positionsschätzung von der Weltreferenz in die lokale Referenz aus Konsistenzgründen mit einer künstlich erhöhten Frequenz von 10 Hz transformiert.

Im Kontext der übergangslosen Peilung ist es zudem sinnvoll, einige feste Referenzen zwischen den Messungen des GNNS und der Einsatzumgebung zu definieren. Dies ermöglicht die Nutzung von metrischen Abständen ohne Berücksichtigung der Besonderheiten der GNNS-Koordinaten. Am Beispiel des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik wird dies weiter erläutert. Der dortige Einsatzbereich der Labordemonstratoren hat seinen Ursprung in der Institutshalle, wobei die x-Achse nach Osten (5.3) und die y-Achse nach Norden (5.4) zeigt. Die Relation von Kartenreferenz und Weltkoordinatensystem wird

aus Satellitenbildern mit $lat_{world}=49.573902$ und $long_{world}=11.025550$ übernommen. Somit lassen sich metrische Informationen mit den folgenden Funktionen in das GNNS-Referenzsystem überführen.

$$x = 72,220 * (long - long_{world}) \quad 4.4$$

$$y = 111,310 * (lat - lat_{world}) \quad 4.5$$

mit:	x, y	Koordinaten bezüglich der Kartenreferenz in Metern
	$lat, long$	Breiten- und Längengrad in der Weltreferenz
	$lat_{world}, long_{world}$	Relation der Karten- und Weltreferenz

4.2.4.3 Lagepeilung basierend auf UWB-Funkortung in Transitbereichen

Wie im Rahmen des Konzeptes beschrieben, stellt der Einsatz von UWB-Systemen eine Lösung für die hohen Anforderungen der Genauigkeit einer Ortung im Transit zwischen Innen- und Außenbereich dar. Ein UWB-Ortungssystem setzt sich aus mehreren stationären Sensoren (Ankern) zusammen, deren Positionen als feste Punkte in der Karten- oder Weltreferenz definiert werden. Das System kann sich in diesem über Lagepeilung lokalisieren, indem die Abstände eines oder mehrerer mobiler Sensoren (Tags) zu den bekannten Ankern gemessen werden. In der Umsetzung mittels kosteneffizienter Sensoren wurde für die Lagepeilung durch UWB das Modul DW1001 von Decawave [57] eingesetzt. Die Anker werden an eingemessenen Positionen initiiert und somit als ganzheitliche Referenz definiert. Bei der Anbringung ist zu beachten, dass die Erfassung über UWB im Bereich zwischen den Ankern aufgrund der omni-direktionalen Ausbreitung der Funkwelle optimal ist. Aus diesem Grund sollten Anker an den Ecken des Übergangsbereiches in einer Höhe von mindestens 2 Metern angebracht werden. Dies verringert auch die Gefahr von Reflexionen und die Dämpfung des Signals durch Personen und Fahrzeugen.

Durch das initiale Einmessen des UWB-Systems bei Inbetriebnahme lässt sich jede erfasste Pose eines Tags im Übergangsbereich in die übergeordnete Referenz überführen. Die Position des UWB-Tags innerhalb dieser Referenz wird mit einer Frequenz von 10 Hz gemeldet. Wie in Abbildung 14 zu sehen ist, wird das zu ortende Tag ebenfalls über dem Drehpunkt des Labordemonstrators befestigt. Auch hier findet sich der Grund in der Vermeidung von Korrelationen zwischen der Orientierung des Fahrzeugs und dem Ergebnis der Lagepeilung.

Das kostengünstige UWB-System von Decawave liefert keine Kovarianzen gemeinsam mit den Positionsmessungen der Lagepeilung. Daher wurden die Kovarianzen empirisch aus der UWB-Ortungsgenauigkeit bestimmt und festgesetzt. Während sich der Tag in der Schnittfläche zwischen den Ankern befindet, liefert die Lagepeilung gute Ergebnisse, weshalb hier ein statischer Faktor in der Genauigkeit des Sensors zum Tragen kommt. Liegt die Positionsschätzung innerhalb des Abdeckungsbereiches, werden die Kovarianzen für das exemplarische UWB-System mit 0,5 Metern angenommen, wobei ein Straffaktor von $\gamma=150\%$ hinzugefügt wird, wenn die Schätzung auf nur drei statt vier Ankerverbindungen zum Tag basiert (Formel 4.6). Es werden keine Ortungsdaten verwendet, wenn das Tag weniger als drei Ver-

bindungen zu Ankern herstellen kann. Außerhalb des definierten Bereichs nimmt die Positionsgenauigkeit signifikant ab, weshalb die Kovarianzen exponentiell in Abhängigkeit von der Entfernung d (Formel 4.7) zwischen der Positionsschätzung und dem nächstgelegenen Punkt im definierten Abdeckungsbereich berechnet werden.

$$cov_{in}(x, x) = cov_{in}(y, y) = 0.5 * \gamma \quad 4.6$$

$$cov_{out}(x, x) = cov_{out}(y, y) = 0.5 * \gamma * (d + 1.0)^3 \quad 4.7$$

with: cov_{in} Feste Kovarianz innerhalb des definierten Abdeckungsbereiches
 γ Straffaktor (150 % falls Verbindung nur zu 3 Ankern gegeben)
 cov_{out} Variable Kovarianz, falls das Tag außerhalb der Abdeckungsfläche lokalisiert wird
 d Abstand zwischen der Positionsschätzung und dem definierten Abdeckungsbereich

4.2.4.4 Einführung in die Referenzsysteme

Im Folgenden werden die verwendeten Referenzsysteme, die für die Realisierung der Lagepeilungen, der Lagekopplungen und der Fusion benötigt werden sowie ihre Beziehung zueinander erläutert. Die Referenz der Lagekopplungen (odom), markiert den Startpunkt der betrachteten Labordemonstratoren und stellt somit die absolute Referenz zu Beginn der Laufzeit dar. Die Position des jeweils betrachteten Labordemonstrators als Ergebnis der Fusion in der übergangslosen Ortung wird gemäß der Konvention als „base_link“ referenziert. Die Beziehungen zwischen den Referenzen der einzelnen Koordinaten werden über Transformationen definiert, die den metrischen Versatz im dreidimensionalen Raum beschreiben. Abschließend wird für die übergangslose Ortung die absolute Referenz der „world“ eingeführt, welche die gemeinsame Referenz im Kontext der Einsatzumgebung darstellt. Die relativen Referenzen für Karten des Innenbereiches werden als entsprechender „map_frame“ bezeichnet.

Für die Implementierung der übergangslosen Ortung unter Verwendung kosteneffizienter Sensoren mittels Labordemonstratoren wurde das Umfeld des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg genutzt. Abbildung 17 zeigt eine exemplarische Konstellation der entsprechenden Referenzen für die Ortung. Die Roboterposition (base_link) sitzt im Rotationszentrum des entsprechenden Labordemonstrators. Die Ausgangsposition des Roboters ist im Wesentlichen die Referenz der Lagekopplung (odom). In Bezug zu dieser Referenz wird die aktuelle Pose des Roboters anhand der unterschiedlichen Ansätze der Lagekopplung bestimmt, wie in den Kapiteln 4.2.3.3, 4.2.3.4 und 4.2.3.5 beschrieben. Der Kartenrahmen (map) beschreibt den festen Ursprung einer bestimmten Innenraumkarte im Weltraum (world), wobei die Relation von base_link zu diesen beiden Referenzen über die in 4.2.4.1, 4.2.4.2 und 4.2.4.3 vorgestellten Ansätze zur Lagepeilung ermittelt werden.

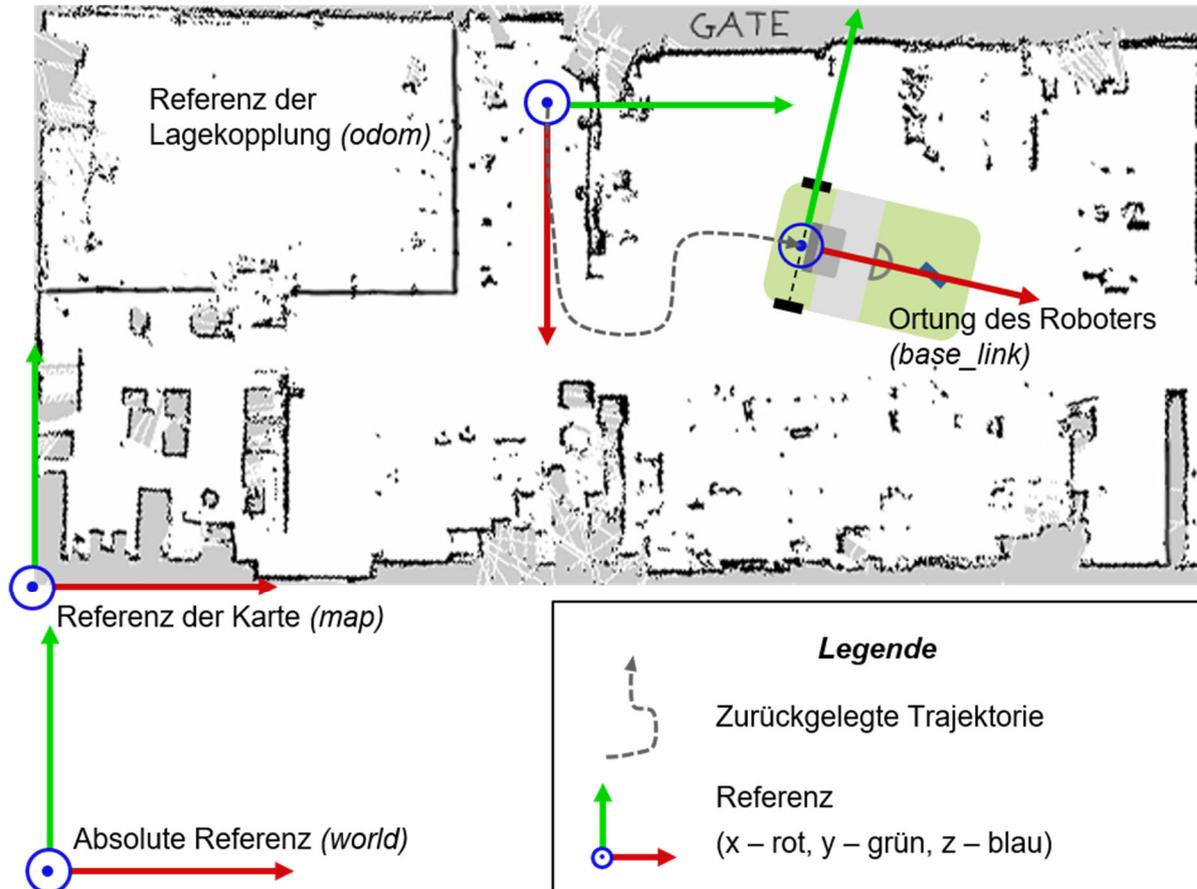


Abbildung 17: Exemplarische Darstellung der Referenzen für die übergangslose Ortung

4.2.5 Vorstellung der dynamischen Fusion basierend auf Kovarianzen zur übergangslosen Ortung

Basierend auf den Referenzsystemen, den definierten Sensoren und Ansätzen für die Lagepeilung und Lagekoppelung wird im Folgenden die Umsetzung der Fusion der Einzel-Systeme für die übergangslose Ortung vorgestellt. Abbildung 18 rekapituliert die relevanten Referenzen für alle vorgestellten Ortungsmodulare. Die oberste Instanz dieses Diagramms ist die Weltreferenz, die den gemeinsamen Bezugspunkt für alle Ortungslösungen darstellt. Die Messungen des GNSS-Empfängers im geografischen Koordinatensystem werden in dieser Referenz erfasst. Der Ursprung jeder Karte (Kartenreferenz) hat eine feste Position in der Weltreferenz. Die feste Platzierung der UWB-Anker ist in der Kartenreferenz definiert und sowohl der UWB-Tag als auch das AMCL melden ihre Standortschätzungen in diesem Kontext. Sie lassen sich somit über die bekannten Relationen zwischen den einzelnen Referenzen transformieren.

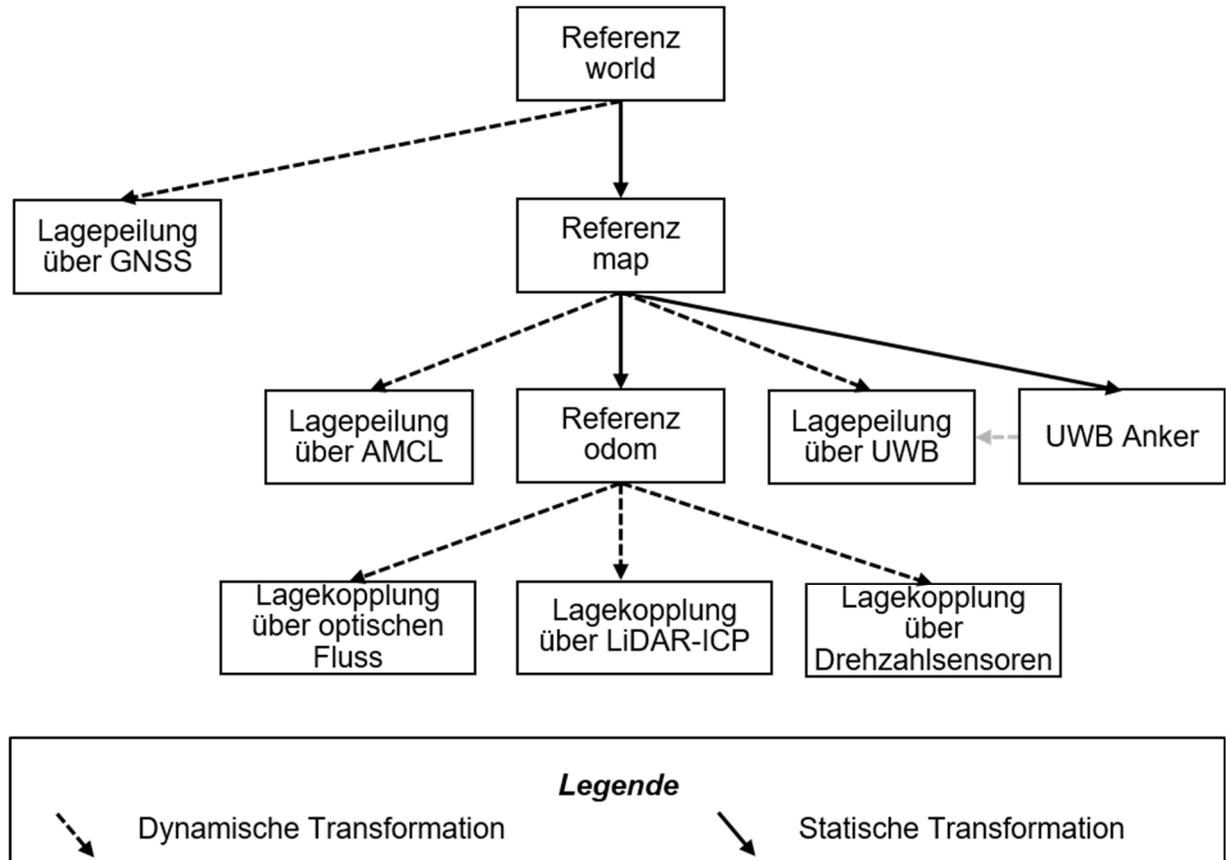


Abbildung 18: Darstellung der relevanten Referenzen sowie deren Relation für die übergangslose Ortung

Abbildung 18 zeigt, dass jede Teil-Ortung über die festen Relationen in die Weltreferenz übertragen werden kann, selbst wenn Einzelsysteme in anderen Referenzen eine Pose des Schleppers bestimmen. Die Referenz zu Beginn der Lagekopplungen kann beispielsweise an die Kartenreferenz gekoppelt werden, um metrische Abstände im Vergleich zu der Weltreferenz zu reduzieren. Zudem kann über eine Anpassung der Relation zwischen der Referenz der Lagekopplung zu Beginn (odom) und einer statischen Referenz (Welt- oder Kartenreferenz) der Drift einzelner Messverfahren in der Lagekopplung kompensiert werden. Aufgrund der hohen Positioniergenauigkeit ist dieser Anpassungsprozesse beispielsweise bei dem Durchfahren des Abdeckungsbereiches der UWB-Ortung zielführend.

Für die Fusion der Teilortungen über Lagekopplung und Lagepeilung werden zwei Instanzen eines erweiterten Kalman-Filters (EKF) eingesetzt, die die einzelnen Schätzungen basierend auf den Kovarianzen der Systeme fusionieren. Abbildung 19 zeigt die Eingangsdaten für beide Filter. In die Fusion der Verfahren der Lagepeilung gehen die Informationen der Drehzahlsensoren als rudimentäres Bewegungsmodell mit den absoluten Positionsdaten der Lagepeilung mittels AMCL, GNSS und UWB ein. Dies ist notwendig, da GNSS und UWB nur absolute Positionsinformationen an den Filter übermitteln und somit im Transit- und Außenbereich kein Bewegungsmodell für den Filter verfügbar wäre. Außerdem liefern die Drehzahlsensoren eine seitliche Geschwindigkeitsmessung in y-Richtung, selbst wenn die seitliche Bewegung des zweiten Forschungsdemonstrators eingeschränkt ist. Da der zugrundeliegende Filter jedoch Zustände mithilfe eines Bewegungsmodells mit omnidirektionaler Bewegungsfreiheit propagiert, ist diese Nullmessung (von y) eine wertvolle Information für den Vorhersageschritt des EKF.

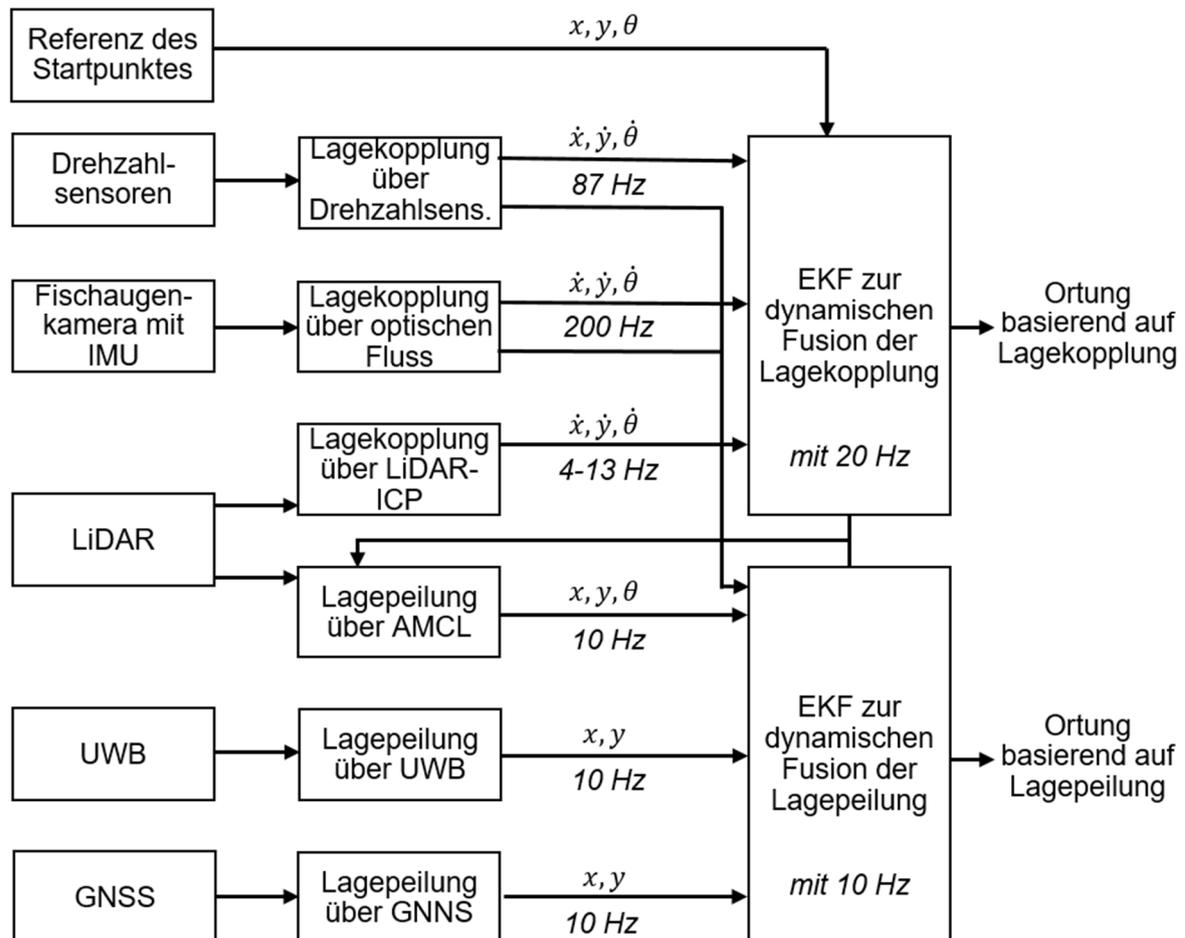


Abbildung 19: Darstellung der beiden EKF-Filter für die Lagepeilung und Lagekopplung basierend auf den entsprechenden Eingangsdaten

Abbildung 19 zeigt auch, dass der adaptive Partikelfilter in AMCL die fusionierte Positionsänderung verwendet, um die Bewegung der einzelnen Partikel mit einem realen Bewegungsmodell zu beschreiben. Die Zuverlässigkeit der Lagepeilung mittels AMCL, GNSS und UWB hängt dabei stark vom Einsatzgebiet (Innen - Übergang - Außen) ab. Während GNSS und UWB ihre Datenzuverlässigkeit durch ihre Kovarianzen angeben, versucht AMCL immer, eine Position innerhalb der vorgegebenen Karte zu finden, unabhängig vom Einsatzgebiet. Hier greift der dynamische Zustandsautomat ein, der AMCL im Außenbetrieb vorübergehend deaktiviert, abhängig von der Ortung des globalen EKF und der digitalisierten Einsatzumgebung. Beim Wiedereintritt in einen Innenbereich mit entsprechender Karte wird AMCL um die aktuelle globale Schätzung der Position neu initialisiert. Dabei ist zu beachten, dass alle Module unabhängig wie voneinander agieren. Dies kann die Genauigkeit der einzelnen Module selbst reduzieren, vermeidet aber mit Ausnahme von AMCL eine Fehlerfortpflanzung von einem Modul zum anderen, um die Gesamtrobustheit des Systems zu verbessern.

4.2.6 Evaluierung der Ansätze der Lagekopplung basierend auf kosteneffizienten Sensoren

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die Testläufe und Evaluation der übergangslosen Ortung basierend auf den unterschiedlichen Methoden und den exemplarischen, kosteneffizienten Sensoren. Die Auswertung der unterschiedlichen Lagekopplungen wurden dabei mit dem

Labordemonstrator Robotino durchgeführt, während die Fusion aller Teillösungen und die übergangslose Ortung mit dem Labordemonstrator P50Ion umgesetzt wurden.

4.2.6.1 Evaluation der linearen und rotatorischen Genauigkeit der Lagekopplung unter Nutzung kosteneffizienter Sensoren

In einem ersten Experiment der Evaluation wurden die Verfahren der Lagekopplung aus dem Konzept hinsichtlich ihrer linearen und rotatorischen Genauigkeit untersucht. Das Ziel war hierbei, die entsprechende Modellierung der Kovarianzen für diese beiden Arten der Bewegung zu validieren und den Einfluss auf die fusionierte Lagekopplung zu bewerten.

Dazu wurde der Labordemonstrator Robotino mehrmals in einer eingemessenen, geraden Linie über eine Länge von 19 Metern unter Beibehaltung seiner Orientierung gesteuert. Das Umfeld der Testläufe war eine Laborhalle mit entsprechenden Roboteranwendungen und Rechnerarbeitsplätzen, weshalb die Struktur und Anzahl der erfassbaren Merkmale mit einer Industrieanwendung vergleichbar zu bewerten sind. Die resultierenden Posen durch die unterschiedlichen Ansätze der Lagekopplung mit gleicher Startreferenz sind als Maxima in der folgenden Tabelle 7 dargestellt:

Tabelle 7: Evaluation der Genauigkeit unterschiedlicher Verfahren für die Lagekopplung bei linearer Bewegung

Art der Lagekopplung	Position X	Position Y	Orientierung
Realität	19.000 m	0.000 m	0°
Drehzahlsensor	18.560 m	-1.584 m	-12.63°
Optischer Fluss	18.516 m	0.191 m	3.42°
LiDAR-ICP	19.997 m	-0.499 m	-0.76°
EKF-Fusion	19.934 m	-0.001 m	1.08°

Die resultierenden Trajektorien sind in Abbildung 20 dargestellt. Wie in der Trajektorie basierend auf den Drehzahlsensoren zu sehen ist, propagieren sich Fehler in der Erfassung der Orientierung des Roboters in der Lagekopplung schnell zu absoluten Fehlern in der Positionsschätzung. Zur Veranschaulichung des kumulierten Fehlers zeigt Tabelle 8 den prozentualen Fehler pro Meter Linearbewegung in x- und y-Richtung sowie die absolute Positionsabweichung anhand des euklidischen Abstands zur Ist-Position. Diese Werte sind nicht als repräsentative Genauigkeiten für den Langzeitbetrieb mit kosteneffizienten Sensoren zu sehen, sondern als Hinweis darauf, wie genau die Lagekopplungen sein können, sofern keine starken nichtdeterministischen Fehler auftreten.

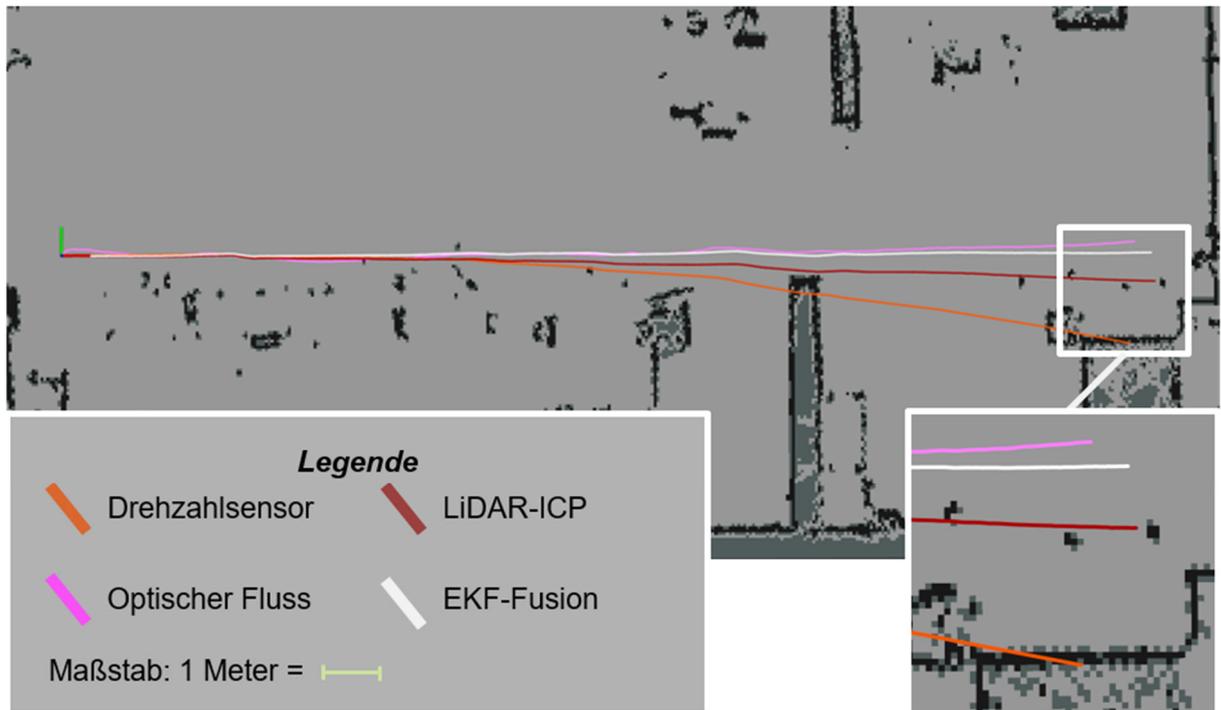


Abbildung 20: Resultierende Trajektorien für die Lagekopplung unter Nutzung kosteneffizienter Sensoren

Ein ähnlicher Versuch wurde durchgeführt, um die Fähigkeiten der unterschiedlichen Methoden zur Lagekopplung während der Rotation zu testen. Dazu wurde die Testplattform fünfmal im Uhrzeigersinn gedreht. Die Messungen als maximale Abweichung der unterschiedlichen Durchläufe sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 8: Prozentualer Fehler pro zurückgelegtem Meter

Art der Lagekopplung	Abweichung in X-Richtung pro Meter	Abweichung in Y-Richtung pro Meter	Absolute Abweichung pro Meter
Drehzahlsensor	2.32 %	8.34 %	8.65 %
Optischer Fluss	2.55 %	1.01 %	2.74 %
LiDAR-ICP	0.02 %	2.62 %	2.62 %
EKF-Fusion	0.34 %	0.04 %	0.35 %

Während fast alle Quellen der Lagekopplung bei Rotationen nur leichte Abweichungen aufweisen, weist die Lagekopplung mittels Drehzahlsensoren den mit Abstand größten Fehler auf. Die Lagekopplung mittels optischem Fluss zeigt bei rotatorischen Bewegungen die größte Zuverlässigkeit.

Tabelle 9: Rotatorische Genauigkeit der Lagekopplung

Art der Lagekopplung	Absolute Rotation in deg	Orientierung nach der Drehung	Prozentualer Fehler
Realität	-1.800°	0°	–
Drehzahlsensor	-1628.36°	171.65°	9.54 %
Optischer Fluss	-1814.56°	-14.56°	0.81 %
LiDAR-ICP	-1830.61°	-30.61°	1.70 %
EKF-Fusion	-1823.84°	-23.84°	1.32 %

Die Auswertungen der beiden Testszenarien bestätigte die korrekte Wahl der Kovarianzen für die unterschiedlichen Sensoren und somit deren Pose-Schätzungen im Rahmen der Fusion.

4.2.6.2 Evaluation der Lagekopplung in einem dynamischen Bewegungsszenario

Um die Genauigkeit der Lagekopplung in einem dynamischen Bewegungsszenario zu testen, wurden vier Punkte, die ein Rechteck bilden, auf dem Boden vermessen und markiert. Abbildung 21 zeigt diesen Aufbau mit der Positionierung des Labordemonstrators in der vorgesehenen Start- und Endpose. Diese Pose ist in den nachfolgenden Abbildungen Abbildung 23 und Abbildung 24 als Koordinatenreferenz für die Lagekopplung zu sehen.

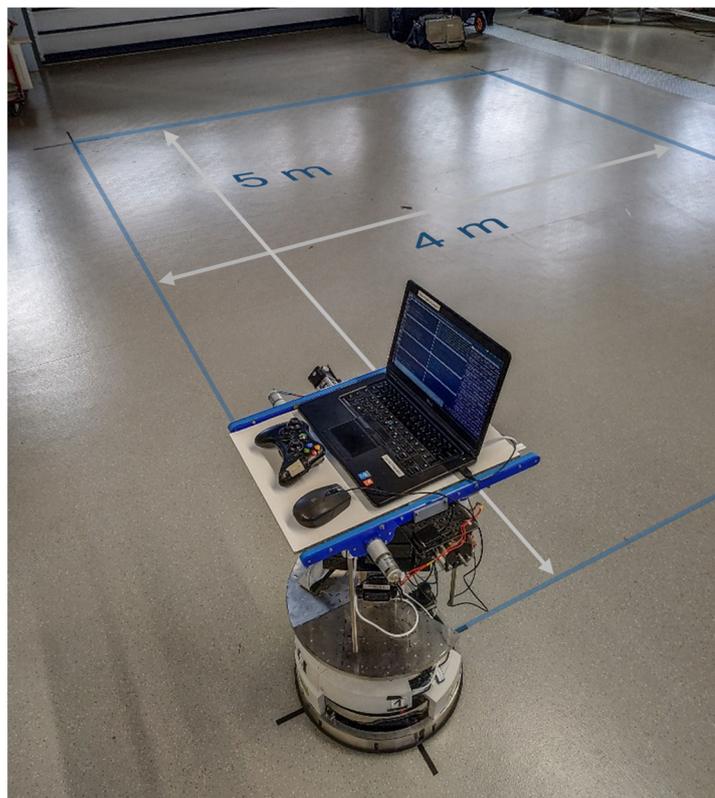


Abbildung 21: Testaufbau für die Evaluierung des Closed Loop-Test

Wie in der folgenden Abbildung 22 dargestellt, wird der Roboter von der Startposition 4 Meter gerade zum nächsten Kontrollpunkt gesteuert, um 90° gedreht und dann wieder 5 Meter gerade gesteuert. Vom dritten zum vierten Kontrollpunkt fährt der Roboter seitwärts, bevor er sich um 180° gegen den Uhrzeigersinn dreht und zurück in die Ausgangsposition fährt. Dort dreht er sich erneut um 90° .

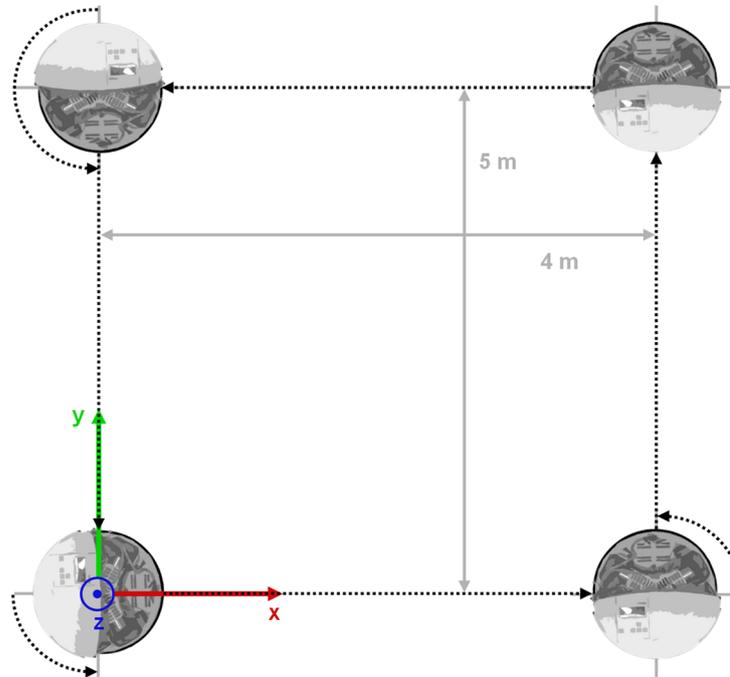


Abbildung 22: Schematische Darstellung des dynamischen Bewegungskonzeptes

Dieser Vorgang wird pro Testdurchlauf insgesamt fünfmal durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 visualisiert. Es ist festzustellen, dass sich die Rotationsfehler der Lagekopplung basierend auf Drehzahlsensoren in Abbildung 23 addieren und somit die Trajektorie bei jeder Umdrehung kreisförmig driftet. Die visuelle Lagekopplung berücksichtigte nicht die gesamte lineare Bewegung an einem Punkt, was zu einer nachträglichen Verschiebung der Trajektorie führte. Die Lagekopplung unter Verwendung des LiDAR zeigte in diesem Fall die höchste Genauigkeit von aller Systeme. Im Rahmen eines dynamischen Bewegungsszenarios lässt sich somit feststellen, dass eine Fusion der einzelnen Methoden der Lagekopplung unter Berücksichtigung der Kovarianzen zielführend ist. Solange ein Sensorsystem im Rahmen der spezifischen Umgebung zuverlässige Informationen erfasst und die entsprechenden Kausalitäten über die Kovarianzen berücksichtigt werden, ist eine Fusion der unterschiedlichen Methoden mit signifikantem Mehrwert für die Genauigkeit der geschätzten Pose möglich.

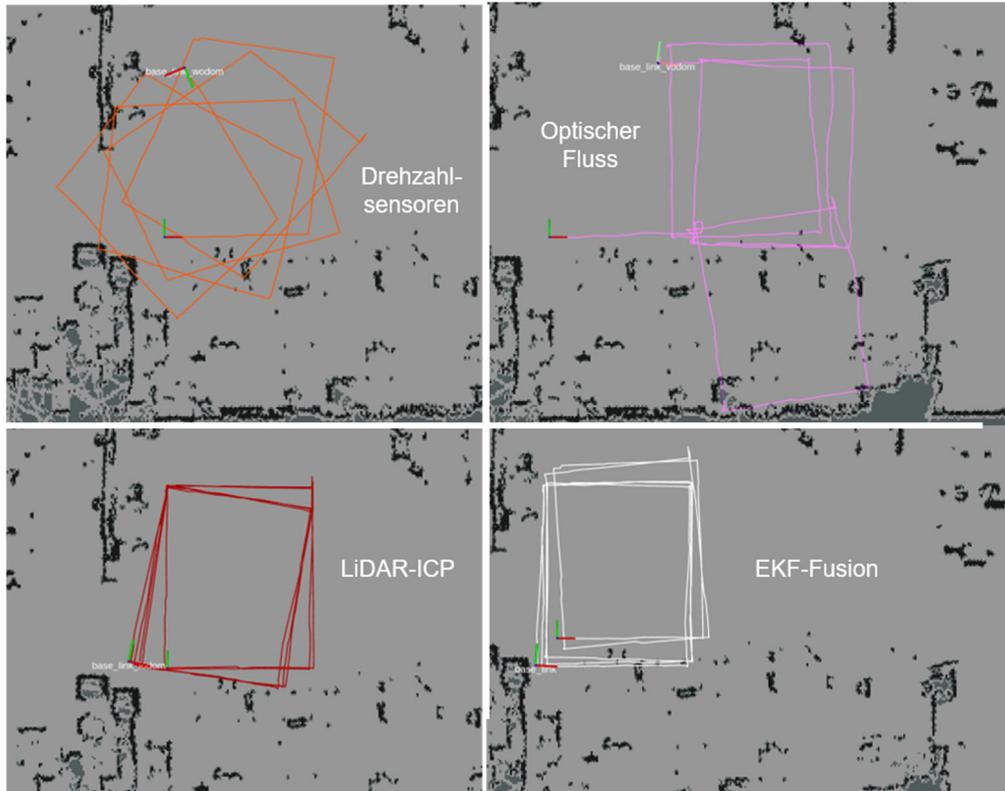


Abbildung 23: Darstellung der einzelnen Trajektorien der Lagekopplung für einen repräsentativen Testlauf des dynamischen Bewegungsszenarios

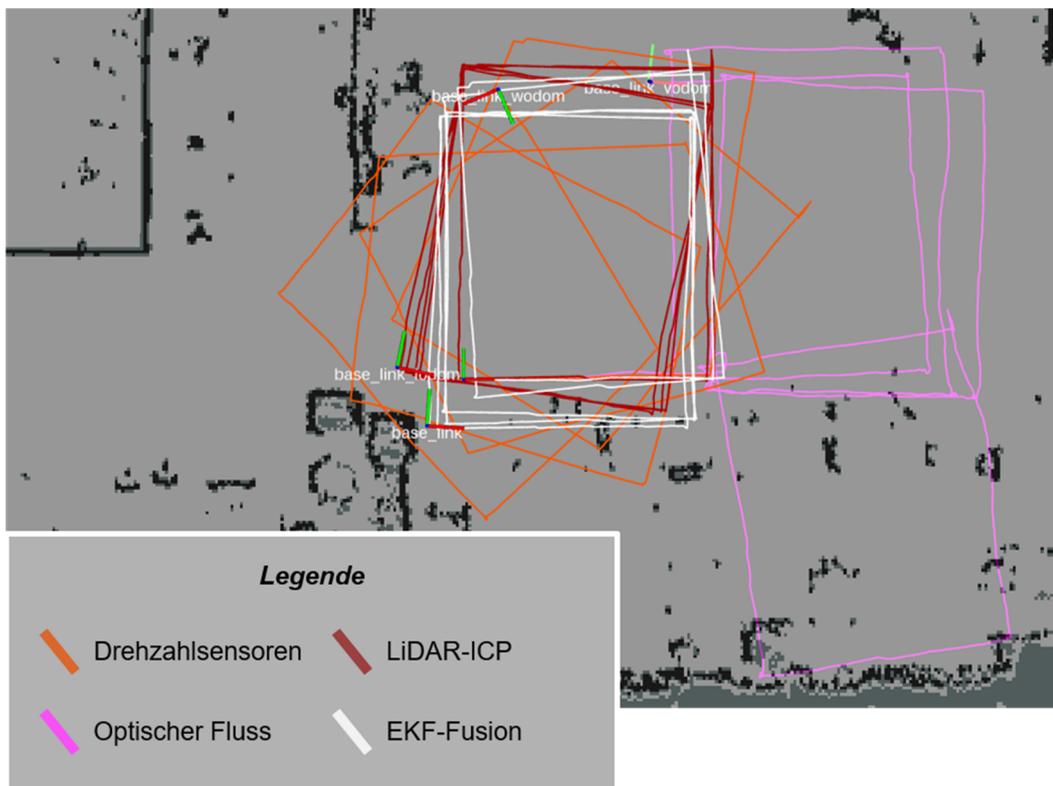


Abbildung 24: Darstellung der Trajektorien eines repräsentativen Testlaufes als überlappendes Gesamtbild

Die Pose nach der Ausführung von fünf Schleifen ist in der folgenden Tabelle 10 als Maxima der Testläufe mit den größten Abweichungen detailliert. Da die reale Start- und Endpose nach

der Durchführung gleich sind, stellen die Positions- und Orientierungs-Werte auch die Abweichung der einzelnen Pose-Schätzungen dar.

Tabelle 10: Ergebnisse der Lagekopplung im Closed-Loop Test

Art der Lagekopplung	Position in X-Richtung	Position in Y-Richtung	Euklidischer Abstand	Orientierung
Realität	0.000 m	0.000 m	–	0°
Drehzahlsensor	0.547 m	4.675 m	4.706 m	-157.08°
Optischer Fluss	2.823 m	4.810 m	5.577 m	-6.74°
LiDAR-ICP	-1.061 m	0.190 m	1.077 m	-11.44°
EKF-Fusion	-0.582 m	-0.749 m	0.949 m	-3.98°

4.2.7 Validierung der Ansätze der Lagepeilung basierend auf kosteneffizienten Sensoren

Für die Implementierung und Evaluierung der unterschiedlichen Ansätze der Lagepeilung basierend auf kosteneffizienten Sensoren wurde der zweite Labordemonstrator genutzt. In den folgenden Experimenten wurde für eine detaillierte Evaluation aller Verfahren eine dedizierte Startpose festgelegt und mit einer festen Transformation deklariert. Dadurch wurde verhindert, dass die Trajektorien der Lagekopplung durch Adaption der Relation des Startpunktes und der statischen Referenz in der Visualisierung auseinanderdriften. Des Weiteren werden Kacheln von Satellitenbildern in die Visualisierung integriert, um eine bildliche Übersicht zu erhalten. Diese Visualisierung zeigt auch alle weltfixierten Frames und den dedizierten Übergangsbereich, durch den der Roboter zwischen Innen- und Außenbereich verfahren kann

Da der zweite Labordemonstrator ein anderes Bewegungsmodell als die erste Applikationsplattform aufweist, wurden die zuvor vorgestellten und im Rahmen der omnidirektional agierenden Systeme evaluierten Verfahren zu Lagekopplung noch einmal für den hallenübergreifenden Einsatz evaluiert. Im Rahmen der Evaluierung der Lagekopplung mittels der zuvor genannten Verfahren zeigte sich die Empfindlichkeit kosteneffizienter Sensoren gegenüber Umweltbedingungen. Insbesondere die Ergebnisse der Lagekopplung mittels LiDAR-ICP erwiesen sich an bestimmten Stellen mit gering strukturierter Umgebung als instabil. Im Outdoor-Bereich fiel dieses Modul aufgrund der geringen Anzahl an Merkmalen bei starker Sonneneinstrahlung komplett aus. Die Lagekopplung nach diesem Verfahren war somit nur im Innen- und Transitbereich möglich. Wie aus Abbildung 25 ersichtlich wird, kann der Ausfall der LiDAR-basierten Lagekoppelung bei der Berücksichtigung innerhalb der Kovarianzen bei der Fusion kompensiert werden. Hierzu müssen die Kovarianzen bei Befahren des Außenbereiches in geeigneter Weise erhöht und somit manipuliert werden. Dies kann durch den im Rahmen des Konzeptes beschriebenen rekonfigurierbaren Agenten Umgebungsspezifisch realisiert werden.

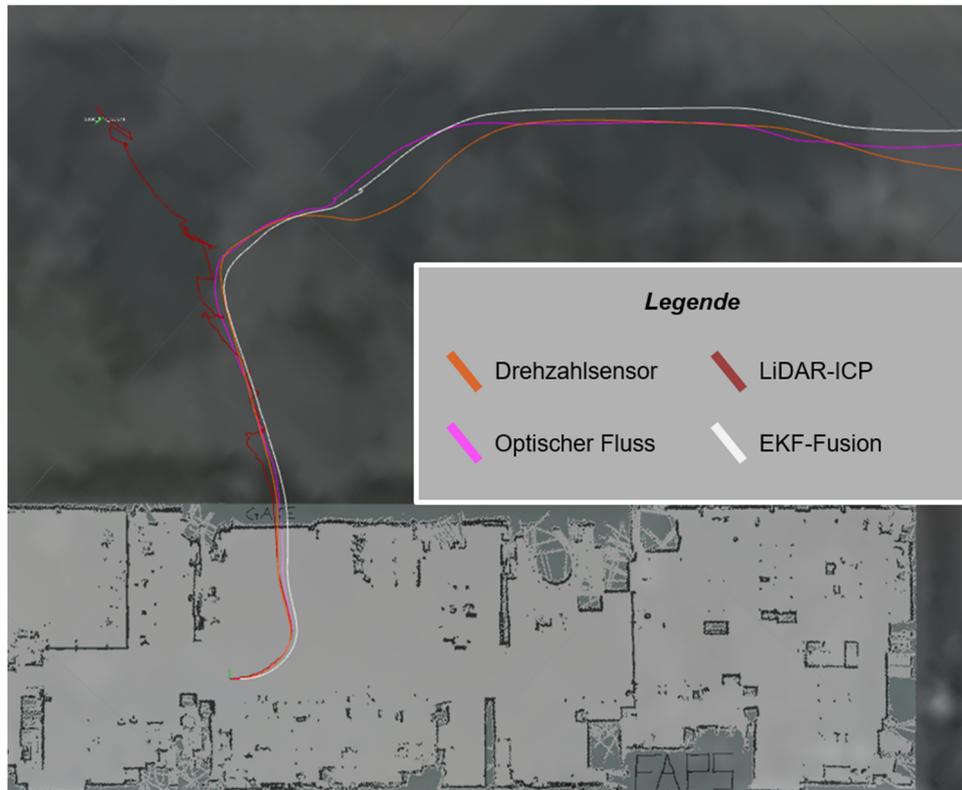


Abbildung 25: Qualitative Ergebnisse des hallenübergreifenden Einsatzes der Lagekopplung ohne Zurücksetzen der Referenz mit stark erhöhter Kovarianz der LIDAR-ICP-Schätzung im Kontext des Außenbereiches

4.2.7.1 Evaluierung der Lagepeilung mittels AMCL und einem kosteneffizienten LiDAR

In weiteren Experimenten wurden die Fähigkeiten und Einflussfaktoren der Ortung basierend auf den unterschiedlichen Ansätzen für die Lagepeilung evaluiert. Für die Nutzung des AMCL-Algorithmus wurde der Partikelfilter global initialisiert, wobei die Anzahl der Partikel in einem Bereich von 100 bis 1.000 begrenzt wurde. Nur für dieses Experiment wurde der Alpha-Wert, der das erwartete Rauschen in dem Bewegungsmodell beschreibt, auf 0,8 erhöht. Die folgenden vier Ausschnitte des Ortungsprozesses zeigen das resultierende Verhalten im zeitlichen Verlauf für ein repräsentatives Szenario innerhalb der Laborhalle. Abbildung 26 veranschaulicht den Anfangszustand des Filters. Alle Partikel, dargestellt als Pfeile in roter Farbe, wurden in zufälligen Posen auf der Karte verteilt.



Abbildung 26: Kovarianz der Ortung mit AMCL für $t=0$ s

Abbildung 27 zeigt den Partikelfilter zum Zeitpunkt $t = 13$ s. Die meisten Partikel haben sich am linken Rand der Karte akkumuliert, während einige andere Partikel in einem anderen Sektor der Karte verbleiben. Der markierte Kreis ist der Bereich, in dem sich der Roboter zu diesem Zeitpunkt tatsächlich befand. Es kann also festgestellt werden, dass der Filter divergiert und die Pose des Roboters zu diesem Zeitpunkt an einer falschen Stelle geschätzt wird.



Abbildung 27: Kovarianz der Ortung mit AMCL für $t = 13$ s mit tatsächlicher Pose des Labordemonstrators (oran-ger Kreis)

Bis zum Zeitpunkt $t = 32$ s kreiste der Roboter um den markierten Bereich in Abbildung 28. Zu diesem Zeitpunkt befinden sich die Partikel in einer von drei Gruppen. Die meisten Partikel befanden sich noch im linken Bereich der Karte. Es entstanden jedoch neue Partikel rund um die wahre Position des Roboters im markierten Bereich.



Abbildung 28: Kovarianz der Ortung mit AMCL für $t = 32$ s mit tatsächlicher Pose des Labordemonstrators (oran-ger Kreis) sowie dem Sektor der Bewegung (hellgraues Rechteck)

In Abbildung 29, die den Zustand bei $t = 40$ s zeigt, verließ der Roboter den markierten Bereich in Abbildung 28 und bewegte sich auf der Karte nach links. Die Partikel konvergierten nun um die wahre Position des Roboters, während sich der Cluster links davon aufzulösen beginnt. Dieses Experiment wurde durchgeführt, um das Verhalten der Lagepeilung über Abgleich einer Karte mit dem AMCL-Algorithmus in einer repräsentativen Innenumgebung unter Nutzung eines kosteneffizienten LiDARs zu evaluieren.

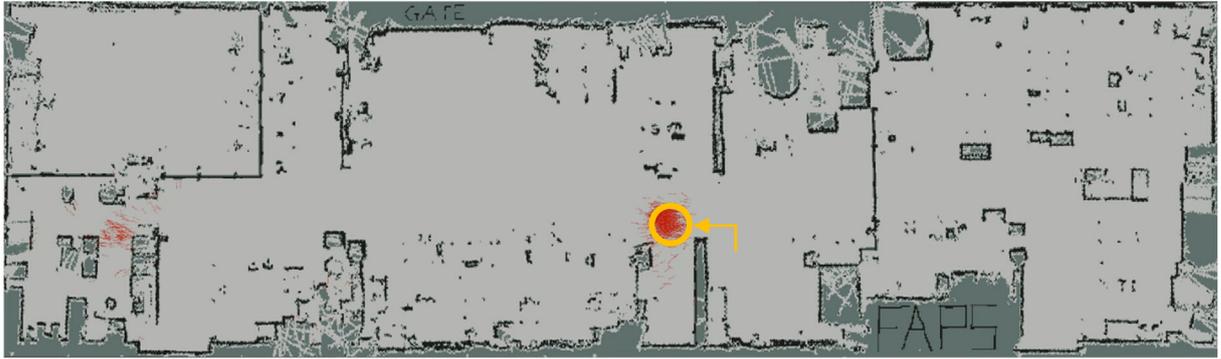


Abbildung 29: Kovarianz der Ortung mit AMCL für $t = 40$ s mit der tatsächlichen Pose des Labordemonstrators (oranjer Kreis) und der schematischen Darstellung der Trajektorie

Während des Experiments lag die höchste beobachtete Frequenz des Partikelfilters bei ca. 1,5 Hz. Der Test wurde unter zwei herausfordernden Voraussetzungen durchgeführt:

- keine Vorab-Informationen über die Position des Roboters sowie
- ein hohes Misstrauen in das Bewegungsmodell des Roboters,

was zu einer größeren Streuung der Partikel in jedem Vorhersageschritt führte. Zusätzlich konnte bei der AMCL-Initialisierung in einer bestimmten Pose auch in dieser Konfiguration gelegentlich ein divergentes Verhalten des Partikelfilters beobachtet werden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die erfassten Merkmale eines kosteneffizienten LiDAR, die in Qualität und Anzahl geringer sind, als bei teureren LiDAR-Systemen, für die Lagepeilung eines Schleppers mittels AMCL im Innenbereich ausreichen. Insbesondere in Verbindung mit der Fusion der Lagepeilung mit anderen Ortungslösungen kann eine Divergenz der geschätzten und realen Pose des Schleppers effektiv unterbunden werden.

4.2.7.2 Evaluierung der Lagepeilung mittels UWB und einem kosteneffizienten Sensor-System

Zur UWB-basierten Lagepeilung wird das Modul DWM1001 der Firma Decawave eingesetzt. Die entsprechende Software in ROS, die die Entfernungen eines Empfängers zu den Sendern als Reichweite ausgibt, verfügt selbst über keine Einschätzung der Genauigkeit der erfassten Pose. Daher wurde für die Angabe der Kovarianz der Lagepeilung mittels kosteneffizienten UWB-Komponenten ein eigener Algorithmus zur Berechnung einer Kovarianz entwickelt, der in 4.2.4.3 beschrieben ist. Um die empirische Metrik für die Kovarianz-Aussage zu erhalten, wurde der UWB-Empfänger an acht bestimmten Positionen entlang einer Geraden in der Institutshalle platziert. An jeder Position wurden 100 Messungen aufgezeichnet, um den Zusammenhang zwischen dem Abstand zum Zentrum des UWB-Ankersystems und der Positionierungszuverlässigkeit des Systems untersuchen zu können. An jeder Position wurden Messungen mit drei und vier angeschlossenen Anker durchgeführt, um zusätzlich den Einfluss der Anzahl der Sender zu erfassen. Abbildung 30 zeigt eine schematische Draufsicht der Anordnung der Sender sowie die Ergebnisse der Lagepeilung des Empfängers mit Positionsangaben in der Kartenreferenz. Punkte in grüner Farbe definieren die Positionen der installierten Anker. Graue Datenpunkte markieren die eingemessenen Positionen, an denen die 100 Messungen auf Basis von drei angeschlossenen Anker (orange Farbe) und die 100 Messungen auf Basis von vier angeschlossenen Anker (blaue Farbe) durchgeführt wurden.

Für jede Messreihe ist die Standardabweichung in x- und y-Richtung angegeben; zur besseren Lesbarkeit mit dem Faktor 10 skaliert.

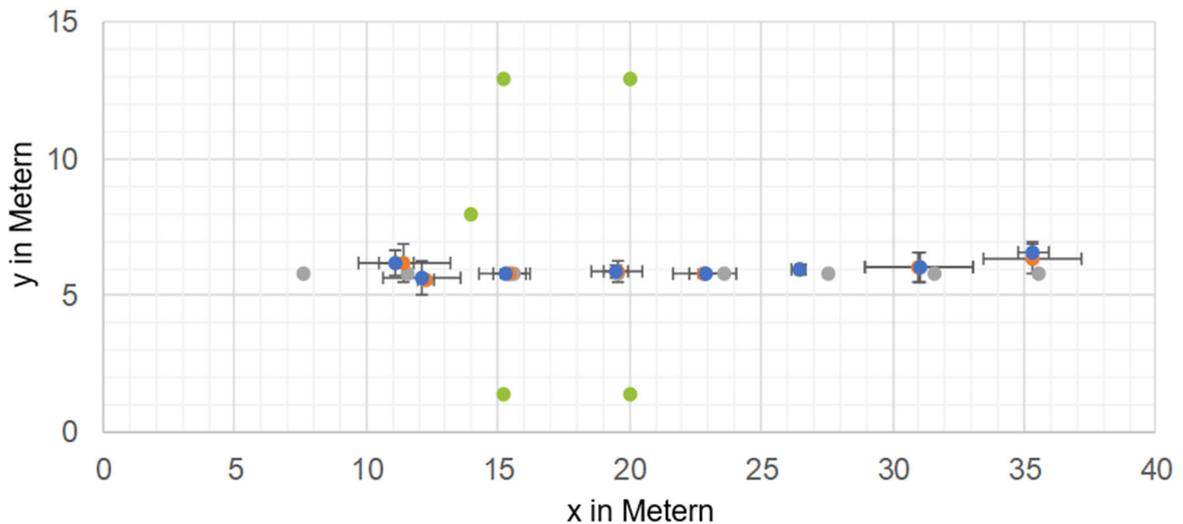


Abbildung 30: Empirische Bestimmung der Metrik für die Kovarianz der Ortungslösung basierend auf UWB mit den eingemessenen Positionen (grau), den Messungen mit 3 Empfängern (orange) und vier Empfängern (blau), jeweils mit Standardabweichungen in x- und y-Richtung

Abbildung 31 zeigt eine detaillierte Übersicht der gemessenen Positionen mit einem größeren Maßstab der y-Achse. Die beiden Datenreihen links sind eingekreist, um die Datenzugehörigkeit zu verdeutlichen. Die Messungen an diesen beiden Positionen wurden durchgeführt, während die Sichtlinie zu einigen Ankern verdeckt war. Diese Messungen unter Abschattung wiesen den größten Positionsfehler im Experiment auf. Es konnte beobachtet werden, dass der Fehler in der Lagepeilung mit zunehmender Entfernung zu den UWB-Ankern ansteigt. Im Gegensatz hierzu konnte kein substanzieller Abfall der Ortungsgenauigkeit mit Messungen, die auf nur drei Bezugspunkten basieren, in Verbindung gebracht werden. Aus jeder der 100 Messungen wurde die Standardabweichung der x- und y-Komponente berechnet. Im Durchschnitt war die Standardabweichung der x-Position, die zwischen 0,029 m und 0,416 m lag, größer als die Standardabweichung der y-Position, die zwischen 0,013 m und 0,139 m lag. Dies konnte auf den größeren Versatz der Empfänger in y-Richtung des Validierungsaufbaus zurückgeführt werden, da dieser die höhere Aussagekraft der Triangulation ermöglicht.

Die Evaluierung der Lagepeilung mit dem eingesetzten UWB zeigt, dass mit einem kosteneffizienten System eine ausreichende Genauigkeit für die Lagepeilung fahrerloser Schleppersysteme möglich ist. Die Anzahl der Sender, die das Signal eines Empfängers erhalten, ist hierbei für die Genauigkeit der Ortung nachrangig. Als besonders relevant hat sich hingegen der Einfluss von Abschattungen einzelner Sensoren ergeben, die anwendungsabhängig identifiziert und durch geeignete Maßnahmen gelöst werden müssen.

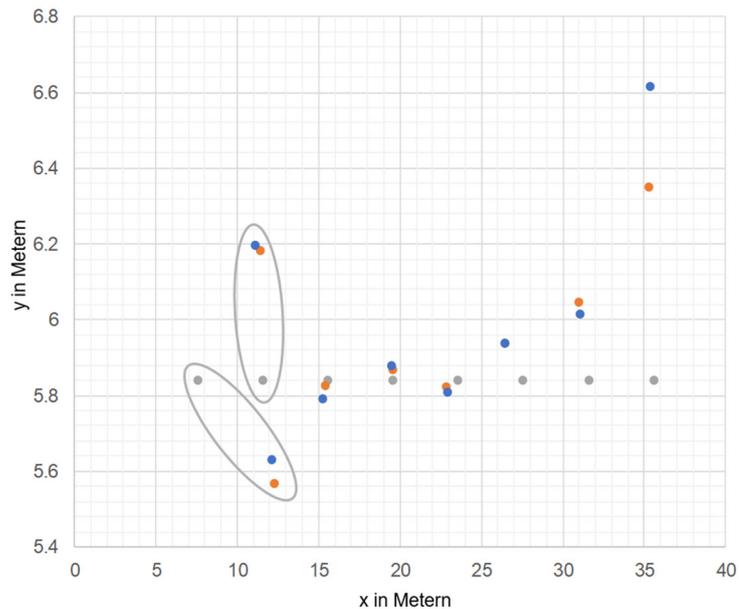


Abbildung 31: Genauigkeit der Ortung mittels UWB für 8 Abstände zum Zentrum des Abdeckungsbereiches. Graue Punkte stellen die eingemessenen Positionen des Senders dar, blaue Punkte die Lagepeilung mit 3 Empfängern und orangefarbene Punkte die Lagepeilung mit 4 Empfängern

Abbildung 32 zeigt die ausgegebene Pose-Schätzung, wenn sich ein dynamisches Hindernis, in diesem Fall eine sich bewegende Person, in der Nähe des UWB-Senders befindet, verglichen mit einem statischen Szenario. Es ist ein drastischer Abfall der Messgenauigkeit zu beobachten.

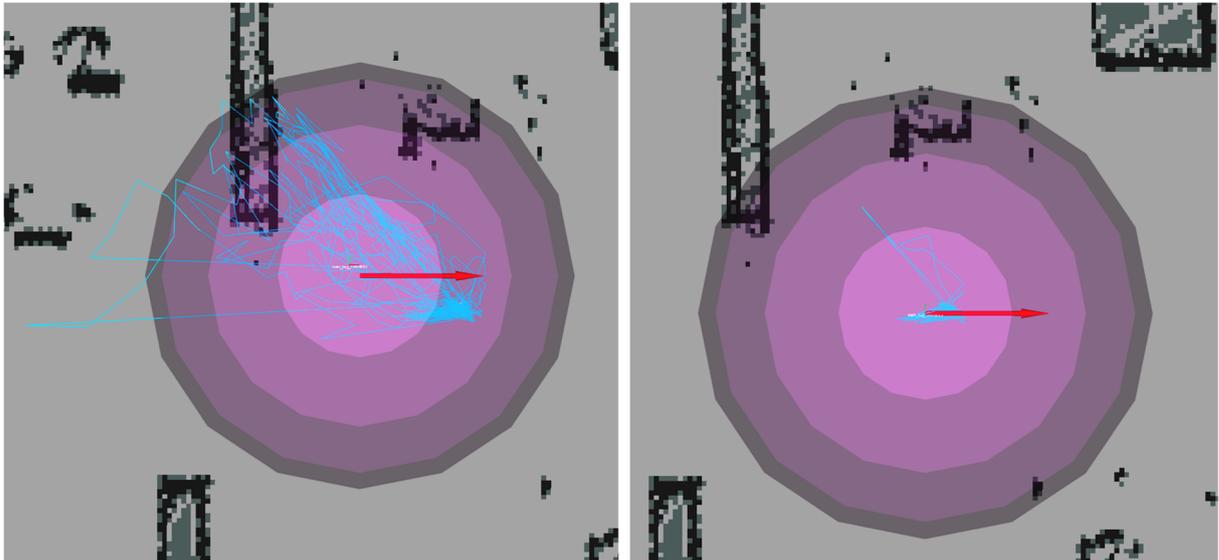


Abbildung 32: Verhalten der Ortung mittels UWB bei Störeinflüssen durch eine Person (links) und ohne (rechts)

Im nächsten Schritt der Evaluierung wurde die Lagepeilung mittels kostengünstigem UWB mit der fusionierten Lagekopplung verglichen, um die Genauigkeiten der infrastrukturegebundenen Ortung mit der fahrzeuggebundenen vergleichen zu können. Zu diesem Zweck wurde der zweite Labordemonstrator manuell entlang eines eingemessenen Pfades gesteuert und die Ortung mittels fusionierter Lagekopplungen sowie der Lagepeilung des kostengünstigen UWB-Systems aufgezeichnet. Abbildung 33 zeigt die Trajektorien auf dem ersten Teil des Kurses. Zu sehen sind die Ortungen basierend auf der Lagepeilung des UWB-Systems (blaue

Linie) und die Ausgabe der fusionierten Lagekopplungen (weiße Linie). Eine exemplarische Fusion der beiden Ansätze mittels separatem EKF ist ebenfalls gegeben (gelbe Linie), um den Einfluss des UWB bei einer Fusion zu evaluieren. Es lässt sich beobachten, dass die Ortung durch UWB mit zunehmender Entfernung zu dem abgedeckten Bereich der Empfänger (hellgraues Rechteck) weniger zuverlässig wird. Sobald eine kritische Entfernung überschritten ist, lässt sich keine Ortung über die Lagepeilung des UWB-Systems mehr realisieren. Bei einer Rückkehr in die Nähe des abgedeckten Bereiches wird der Sender wieder sproadisch von Empfängern erfasst, was eine temporäre Ortung ermöglicht. Aufgrund des hohen Abstandes zu dem erfassten Abdeckungsbereich ergibt sich für die Ortung mittels Lagepeilung des kostengünstigen UWB-Systems eine entsprechend hohe Kovarianz der Pose-Schätzungen, weshalb diese nur mit einem geringen Einfluss in die fusionierte Pose eingeht.

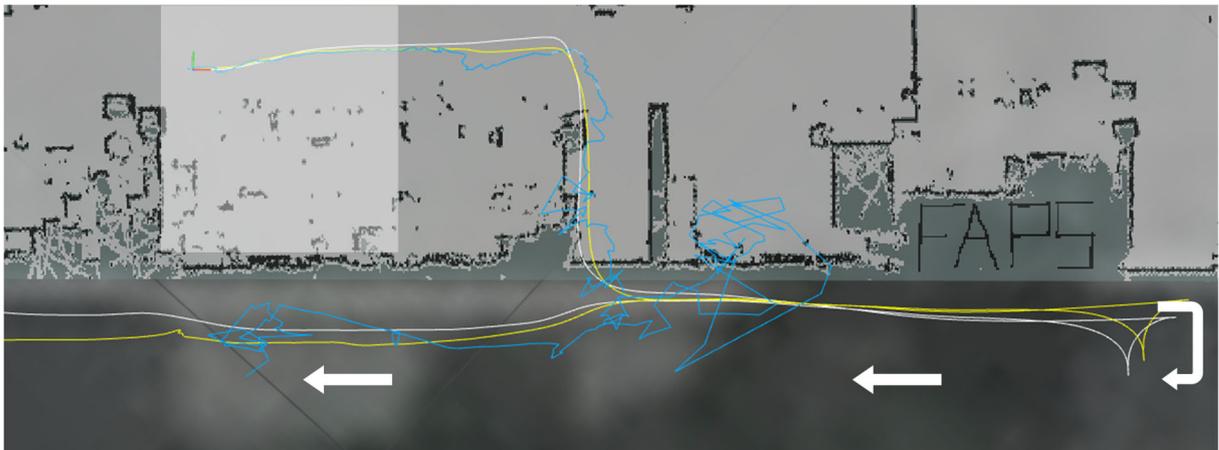


Abbildung 33: Trajektorien der Ortung basierend auf Lagekopplung und UWB für einen exemplarischen Testlauf

Abbildung 34 veranschaulicht diesen Sachverhalt für den vollständigen Referenzkurs der Evaluierung. Die Kreise entlang der Trajektorie der fusionierten Pose stellen die Positionskovarianz der Lagepeilung basierend auf dem UWB-System dar und visualisieren somit deren Einfluss im Rahmen der Fusion zu jedem Zeitpunkt. Am Punkt des Wiedereintritts in die Institutshalle erfolgten Fehlmessungen des UWB-Systems, die aufgrund von Reflexionen als Erfassungen in der Nähe des abgedeckten Bereiches gewertet wurden. Aus diesem Grund sprang die fusionierte Ortung des EKF gegen die erste verfügbare, fehlgemessene absolute Positionsmessung. Als zunehmend UWB-basierte Messungen verfügbar wurden, die aufgrund des Abstandes zum abgedeckten Bereich korrekt mit hohen Kovarianz gemeldet wurden, driftete der Filter wieder in Richtung der tatsächlichen Pose des Roboters und zeigte am Ende des Kurses nur kleine Positionsabweichungen an. Die Genauigkeit der Ortung am Ende des Referenzkurses ist in Tabelle 11 aufgeführt

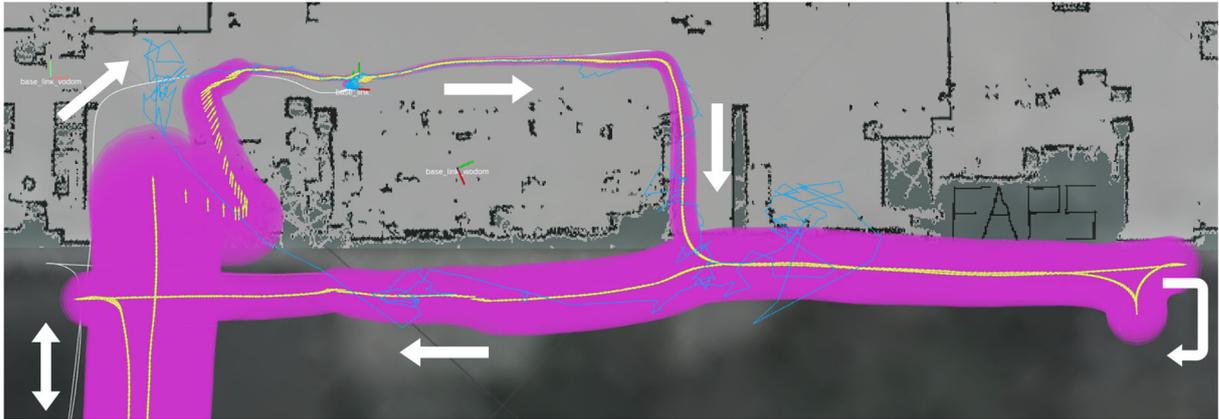


Abbildung 34: Vollständige Trajektorie sowie die Kovarianzen der Ortung basierend auf der Lagepeilung des UWB-Systems

Es zeigt sich, dass die dynamische Kovarianz des UWB-Systems tatsächlich eine adäquate Umsetzung der abstandsbezogenen Ortungsgenauigkeit des kosteneffizienten Sensor-Systems ist. Zudem wurde im Rahmen dieser exemplarischen Evaluation aber auch die Gefahr einer Überbewertung falscher Positionsschätzungen in der ganzheitlichen Fusion ersichtlich. Dies bestätigt die Annahme des Konzeptes, dass eine Vielzahl von Teillösungen für das Ortungsproblem einen signifikanten Mehrwert bilden, da somit mehr Eingangsgrößen für den Filter verfügbar werden.

Tabelle 11: Evaluation der Lagepeilung mit einem kosteneffizienten UWB-System: Versatz zwischen der realen Pose, der Lagepeilung und der Ortung basierend auf den fusionierten Lagekopplungen

Art der Ortung	Abweichung in x-Richtung	Abweichung in y-Richtung	Euklidischer Abstand	Orientierung
Lagepeilung mittels UWB	-0.195 m	0.033 m	0.198 m	–
Fusionierte Lagekopplung	-0.350 m	-0.525 m	0.631 m	-4.43°

4.2.7.3 Evaluierung der Lagepeilung mittels GNSS und kosteneffizienten Sensoren

Die Lagepeilung unter Verwendung eines kosteneffizienten GNSS-Sensors wurde anhand des NEO-M8N der Firma ublox evaluiert. Im Rahmen der Evaluierung konnte dabei festgestellt werden, dass auch in Innenbereichen eine geringe Anzahl an Verbindungen mit Satelliten aller erfassbaren GNSS-Systeme hergestellt werden konnte. Die erhaltenen Daten reichen aufgrund von Abschwächungen und Interferenzen jedoch nur für die grobe Identifikation des befahrenen Gebäudes, nicht aber für eine Ortung in relevanter Genauigkeit aus. Mit einem Wechsel in den Außenbereich steigt die Konfidenz des Sensors kontinuierlich an. Nach durchschnittlich 20 Sekunden wurde die Position der Lagepeilung mittels GNSS mit einer Kovarianz von weniger als 1,5 Metern in x- und y-Richtung bereitgestellt. Die beste gemeldete Kovarianz im Rahmen der Evaluierung wurde mit 0,74 Metern erreicht.

4.2.8 Evaluierung der gesamten übergangslosen Ortung im Innen- und Außenbereich anhand des Labordemonstrators

Die finale Evaluierung der übergangslosen Ortung betrachtete alle Verfahren der Lagepeilung (AMCL, GNSS und UWB) sowie der Lagekopplung, um Interferenzen der einzelnen Ortungslösungen bei der Nutzung kosteneffizienter Sensoren ausschließen zu können. Zudem wurden jeweils separate Fusionen für die Verfahren der Lagepeilung und der Lagekopplung untersucht sowie ein ganzheitlicher Fusionsansatz. Somit konnte die dynamische Fusion basierend auf der tatsächlichen Einsatzumgebung evaluiert und bewertet werden.

Die Pose-Schätzungen über Verfahren der Lagekopplung, der Partikelfilter für die Lagepeilung mittels AMCL und die beiden fusionierten EKF wurden für die Testszenarien in dedizierten Startpose initialisiert. Abbildung 35 zeigt die ersten Meter einer exemplarischen Testfahrt des zweiten Labordemonstrators mit manueller Steuerung. Zu sehen sind die relevanten Trajektorien, die Partikel des AMCL sowie die Kovarianzen um die aktuelle Schätzung der Lagepeilung mittels AMCL (1), UWB (2) und GNSS (3) in der Darstellung als lila gefärbte Kreise. Je größer der Kreis visualisiert wird, desto höher ist die Kovarianz. Zu sehen ist links die Positionierung des Roboters kurz vor und rechts kurz nach der Durchfahrt des Hallentors in den Außenbereich. Dort wird die Lagepeilung mittels AMCL durch den Zustandsautomaten deaktiviert, da keine Karte für den Außenbereich existiert. Zudem lässt sich eine wachsende Kovarianz der Lagepeilung des UWB-Systems (2) beobachten, da sich der Roboter weiter vom Abdeckungsbereich des UWB-Systems entfernt. Gleichzeitig wird die Schätzung der Lagepeilung mittels GNSS (3) zuverlässiger.

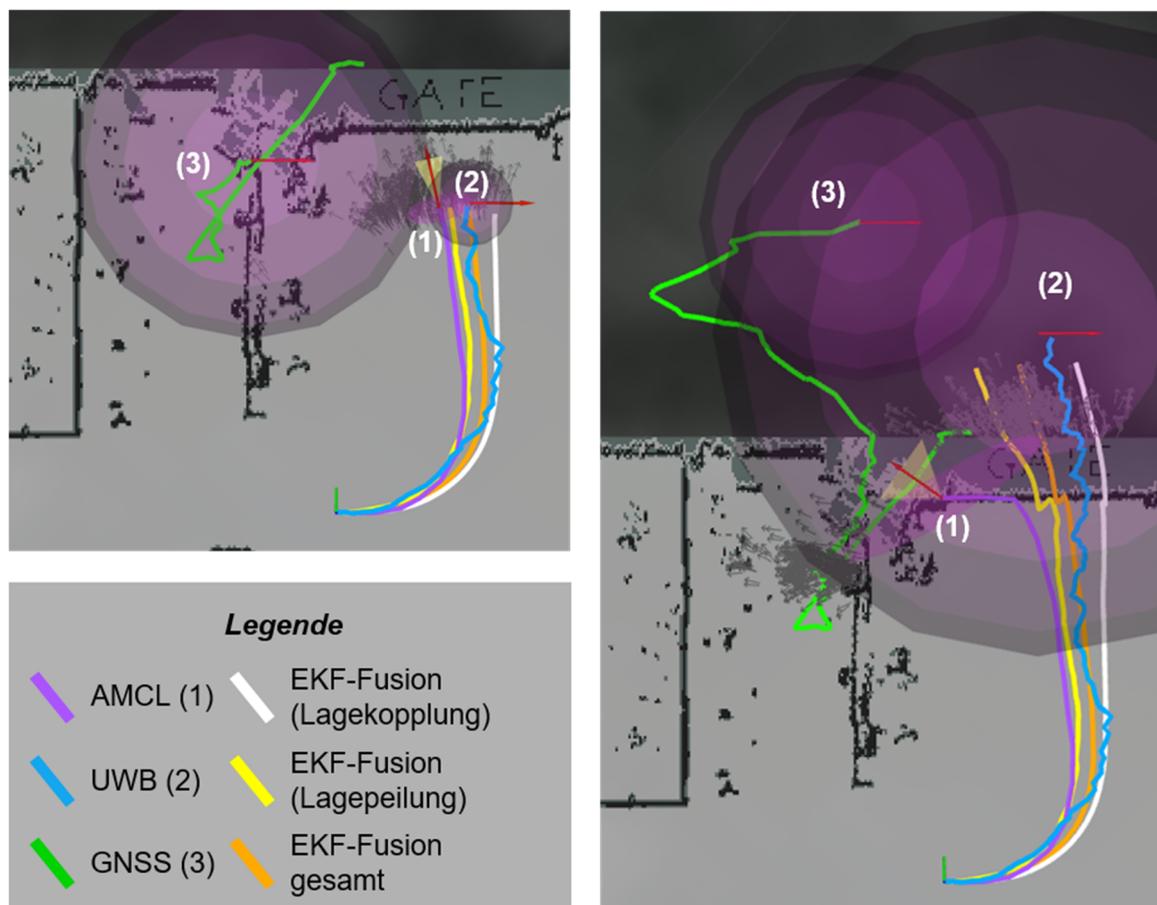


Abbildung 35: Visualisierung der übergangslosen Ortung beim Übergang in den Außenbereich



Abbildung 36: Visualisierung der übergangslosen Ortung im Außenbereich (Legende wie Abbildung 35)

Während sich der Roboter vom Tor wegbewegt, verringert sich die Kovarianz der Lagepeilung über GNSS kontinuierlich. Das UWB-System meldet nach einer bestimmten zurückgelegten Distanz zum abgedeckten Bereich keine Pose-Schätzung mit relevanten Kovarianzen mehr, sodass der entsprechende Einfluss für die Fusion der Lagepeilung verschwindend gering wird. Im Außenbereich konvergiert die fusionierte Pose der Lagepeilungen somit gegen die Schätzung des GNSS-Systems. Die Fusion der Lagekopplungen liefert davon unabhängig eine robuste Lokalisierung, wie Abbildung 37 zeigt. Die Fusion der Teilortungen aus den fusionierten Lagekopplungen und Lagepeilungen weist nur eine geringe Abweichung von der tatsächlich befahrenen Trajektorie auf. Signifikant hierfür ist die Ortung mittels GNSS, welches in dem offenen Außenbereich eine Kovarianz in der Größe von 1,0 Meter erreicht.

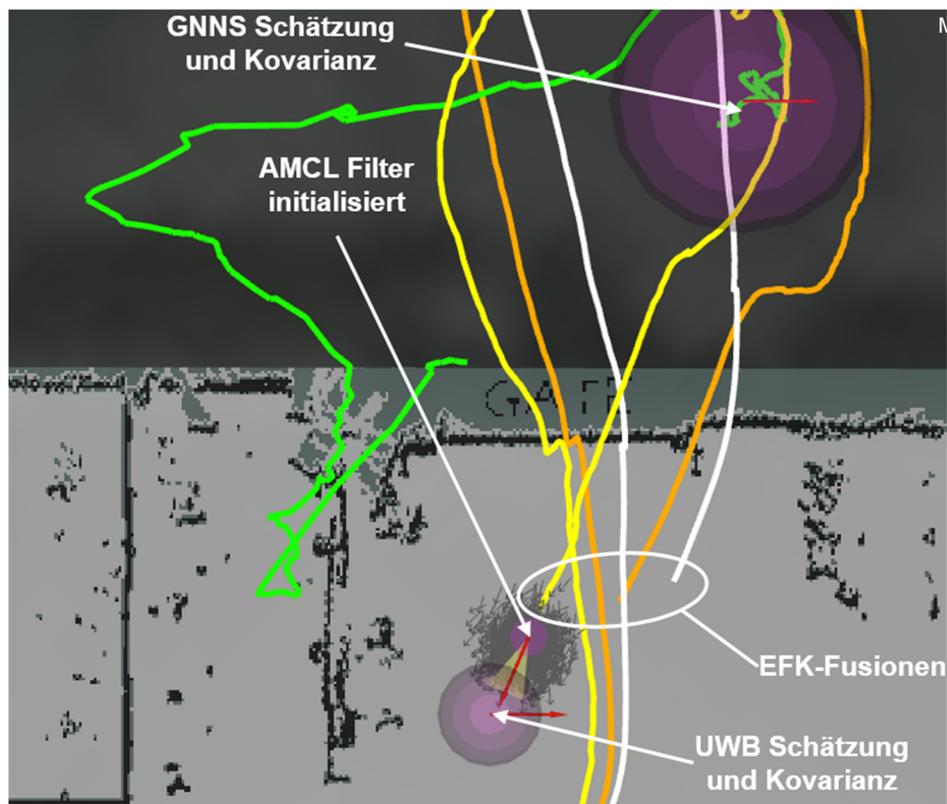


Abbildung 37: Visualisierung der übergangslosen Ortung nach Rückkehr und Durchfahren des Transitbereiches

Bei dem Transit vom Außen- in den Innenbereich greifen die unterschiedlichen Ansätze für die Ortung über Lagepeilung in entgegengesetzter Reihenfolge ineinander. Bei der Anfahrt auf den Transitbereich erfasst der Labordemonstrator die Anker des UWB-Systems und kann diese Signale für die Lagepeilung nutzen. Mit dem Befahren des Transitbereiches beginnt in der Folge das GNSS-Signal durch Abschattungen und Reflexionen ungenauer zu werden. Entsprechend verlagert sich die Ortung basierend auf der Fusion der einzelnen Ansätze der Lagepeilung zu der Schätzung basierend auf dem UWB-System. Selbst bei der Nutzung kosteneffizienter Sensoren wurde im Rahmen der Evaluierung festgestellt, dass sich UWB und GNSS geeignet ergänzen, wie Abbildung 37 zeigt. Nachdem der Labordemonstrator das Tor manuell durchfahren und den Übergangsbereich verlassen hat, wird der Partikelfilter um die aktuelle Pose-Schätzung der fusionierten Ortung initialisiert. Dieser Initialisierungsprozess dauerte etwa eine Sekunde, bis die Karte durch den Zustandsautomaten geladen und die ersten LiDAR-Scans verfügbar waren. In der Folge fließt auch die Lagepeilung basierend auf AMCL wieder in die Ortung durch Fusion der Lagepeilungen ein.

Die Ortung basierend auf der fusionierten Lagekopplung unter Nutzung der Raddrehzahlen, des optischen Flusses und des LiDAR-ICP liefert unabhängig von den Verfahren der Lagepeilung eine durchgängig zuverlässige Pose-Schätzung des Systems. Dieser Umstand fließt positiv in die Gesamt-Pose-Schätzung ein, bei der alle Teillösungen einbezogen werden. Tabelle 12 stellt die Abweichungen der einzelnen Verfahren als Grundlage für die Ortung des Systems am Ende der repräsentativen Testfahrt dar.

Tabelle 12: Ergebnisse der übergangslosen Ortung im Innen und Außenbereich nach Rückkehr zum definierten Startpunkt

Art der Ortung	Abweichung in X-Richtung	Abweichung in Y-Richtung	Euklidischer Abstand	Orientierung
Lagekopplung basierend auf Drehzahlsensoren	-2.046 m	58.202 m	58.238 m	-38.36°
Lagekopplung basierend auf optischem Fluss	3.482 m	-2.533 m	4.306 m	-1.08°
Fusionierte Lagekopplung	4.414 m	3.834 m	5.847 m	-3.41°
Lagepeilung basierend auf AMCL	0.343 m	-0.150 m	0.374 m	0.69°
Lagepeilung basierend auf UWB	-0.381 m	-0.038 m	0.374 m	–
Lagepeilung basierend auf GNSS	7.797 m	2.238 m	8.112 m	–
Fusionierte Lagepeilung	0.331 m	-0.132 m	0.356 m	1.41°
Fusion aller Ortungslösungen	0.331 m	-0.133 m	0.357 m	1.41°

Es wird ersichtlich, dass durch die dynamische und kontextbezogene Fusion der einzelnen Pose-Schätzungen basierend auf kosteneffizienten Sensoren eine übergangslose Ortung fahrerloser Schleppersysteme umgesetzt werden kann. Die relevanten Informationen über die aktuelle Einsatzumgebung stehen durch die inhärente Informationscodierung der digitalisierten Einsatzumgebung und den rekonfigurierbaren Softwareagenten im Rahmen des ganzheitlichen Konzeptes zur Verfügung. Die Genauigkeit der fusionierten Ortung ist im Kontext fahrerloser Schlepperfahrzeuge ausreichend, um mit entsprechenden Ansätzen der Navigation und Absicherung des Systems einen Betrieb im hallenübergreifenden Einsatz mit kosteneffizienten Sensor realisieren zu können.

4.2.9 Zusammenfassung der Realisierung der übergangslosen Ortung innerhalb eines Labordemonstrators

In Kapitel 4.2 wurde das Konzept für eine übergangslose Ortung unter Verwendung kosteneffizienter Sensoren detailliert beschrieben und anhand zweier Labordemonstratoren umgesetzt. Die verwendeten Sensoren decken eine Vielzahl von physikalischen Messprinzipien ab und ermöglichen durch eine dynamische Fusion der Teilortungslösungen basierend auf den Umgebungsbedingungen eine ausreichen genaue Ortung der Labordemonstratoren. Für die Evaluierung der Lagekoppelung wurden die entsprechenden Sensoren und Ansätze für eine omnidirektional fahrende Plattform umgesetzt und in verschiedenen Bewegungsszenarien evaluiert. Ein Labordemonstrator mit differentiellm Antrieb und ausreichender Bodenfreiheit wurde für die Evaluation der einzelnen Verfahren der Lagekopplung, der Lagepeilung sowie der dynamischen Fusion im übergangslosen Kontext eingesetzt. Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes ist der erfolgreiche Nachweis der Funktionalität des Konzeptes der übergangslosen Ortung unter Verwendung von kosteneffizienten Sensoren im hallenübergreifenden Kontext.

4.3 Sondierung potentiell sicherer Sensorik und Konzeptionierung eines ökonomischen, sicheren Gesamtsystems

Parallel zu der Detaillierung und Evaluation des Konzeptes der übergangslosen Ortung wurde an der Forschungsstelle 1 ein Konzept für ein sicheres Gesamtsystem unter Nutzung potentiell sicherer Sensoren erstellt. Zunächst wurden hierbei die relevanten Normen im Kontext der Sicherheit von fahrerlosen Schleppersystemen analysiert und die entsprechenden Anforderungen aggregiert. Anschließend wurde ein Sensorkonzept unter Nutzung potentiell sicherer Sensoren abstrahiert, mit den entsprechenden Anforderungen abgeglichen und in Abstimmung mit den Erkenntnissen der Forschungsstelle 2 in ein ökonomisches Gesamtsystem überführt.

4.3.1 Analyse der sicherheitsrechtlichen Anforderungen an den Einsatz fahrerloser Schleppersysteme

Die Anforderungen an ein ökonomisches Gesamtkonzept für fahrerlose Schlepper ergeben sich aus einer Analyse der relevanten Normen und Richtlinien für den Betrieb gemäß dem aktuellen Stand der Technik. In den folgenden Unterkapiteln werden daher die in Kapitel 3.3 genannten Normen und Vorschriften, welche relevanten Aspekte für die Sicherheit beinhalten, betrachtet und in den Kontext der kosteneffizienten Sensorik für fahrerlosen Schlepper

überführt. Als Grundlage der jeweiligen Aussagen wird angenommen, dass ein Schlepper, der als Plattform für die übergangslose Ortung und Navigation dient, die Anforderungen der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG sowie die EN ISO 3691-1 erfüllt.

4.3.1.1 EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen

Die EN ISO 12100 bildet die Grundlage für die allgemeine Risikobeurteilung in der Anwendung von Maschinen und setzt sich aus einer Risikoanalyse sowie einer Risikobewertung zusammen. Für die Risikoanalyse ist es notwendig, den Einsatzrahmen der Maschine, die Identifikation von potentiellen Gefährdungen und deren Risikoeinschätzung zu bestimmen. Für jede Gefährdung wird dabei die Risikoeinschätzung in Bezug auf die Schwere von Schäden und die Auftrittswahrscheinlichkeit gefordert.

Die Risikoanalyse im Rahmen fahrerloser Schlepperfahrzeuge konzentriert sich auf die Kernaspekte, die durch eine übergangslose Ortung und Navigation fahrerloser Schleppersysteme entstehen. Grundlegend handelt es sich dabei um einen automatisierten Transport durch eine Maschine auf Verkehrsflächen und Wegen im hallenübergreifenden Kontext mit einer sensorisch automatisierten Umgebungswahrnehmung, die über die Unterstützung eines personengeführten Schleppers hinausgeht. Potentielle Risiken ergeben sich dabei aus dem Schlepper an sich, der eingesetzten Sensorik und den relevanten Betriebsszenarien. Die Risikoeinschätzung erfolgt in Konformität mit der EN ISO 13849, die ein Vorgehensmodell für die Bestimmung des Ausmaßes von Schäden und deren Auftrittswahrscheinlichkeit enthält.

4.3.1.2 EN ISO 13849: Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen

Die EN ISO 13849 setzt fest, welche Kriterien Sicherheitsfunktionen erfüllen müssen, um das Risiko eines Eintritts schwerwiegender Zwischenfälle auf ein vertretbares Maß zu reduzieren. Hierfür wird eine Klassifikation angewendet, die entsprechende Performance-Klassen definiert. Basierend auf der Schwere der Verletzungen, der Häufigkeit/Dauer der Exposition und der Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung wird festgelegt, welche Anforderungen an die Sicherheitsfunktion des fahrerlosen Schleppersystems gestellt werden.

Die nach der EN ISO 12100 durchzuführende Festlegung der Grenzen der Maschine ergibt sich anwendungsfallbezogen in Form der bestimmungsgemäßen Verwendung und legt die Erkennungsfähigkeit und Verlässlichkeit des Systems fest.

Ein fahrerloser Schlepper im hallenübergreifenden Einsatz agiert in seinem natürlichen Betriebszustand nicht direkt mit Personen oder anderen Maschinen mit Ausnahme der zu transportierenden Anhänger. Aufgrund des Mischverkehrs ist dennoch mit einer indirekten Interaktion mit Personen und weiteren Fahrzeugen zu rechnen. Personen können sich dabei im Fahrweg des fahrerlosen Schleppers befinden oder diesen auf ihrem Pfad kreuzen. Auch im Fahrweg sitzende oder liegende Personen können beispielsweise im Rahmen eines medizinischen Notfalls auftreten. Führt das Fahrzeug Lenkbewegungen aus, können Menschen, die sich bei Geradeausfahrt neben dem Fahrweg befänden, in Gefahr geraten.

Neben Personen begegnet der fahrerlose Schlepper im Mischverkehr auch anderen Fahrzeugen, mit denen es ebenfalls zu einer Kollision kommen kann. Grundsätzlich ist durch den Einsatz auf Betriebsgelände davon auszugehen, dass Personen im Einsatzbereich des Schleppers über dessen Betrieb unterwiesen sind und sich gegenüber dem fahrerlosen

Schlepper in einer angemessenen Weise verhalten. Darunter wird verstanden, dass Personen – auch Fahrzeugführer – zu fahrerlosen Schleppern Abstand halten, nicht bewusst in den Fahrweg von fahrerlosen Schleppern eintreten und sich aufmerksam bewegen.

Eine sichere Erkennung von Personen, die von der Seite in den Fahrweg des Fahrzeugs eintreten, kann nicht unbedingt gewährleistet werden. Um dies umzusetzen, müsste der Sicherheitsbereich eines Schleppers so groß sein, dass sämtliche Personen, welche sich theoretisch in Gefahr begeben könnten, sicher erkannt werden. Abgesehen von den Schwierigkeiten in der technischen Umsetzung würde dies auch sehr breite und praxisuntaugliche Wegbreiten erfordern. Durch den Einsatz von fahrerlosen Schleppersystemen auf einem Betriebsgelände ist von vorhandenem Gefahrenbewusstsein der Personen auszugehen und durch bauliche Maßnahmen wie Deckenspiegel an Ecken können Gefahrenstellen weiter entschärft werden. Die technische Regel für Arbeitsstätten (ASR) A1.8 „Verkehrswege“ [58] beschreibt unter anderem nötige Wegbreiten, bei denen der sichere Betrieb von Flurförderzeugen, zu denen auch fahrerlose Schlepper zählen, gewährleistet ist. Von ihrer Einhaltung ist im Betriebsumfeld auszugehen. Auch der dort und in der EN ISO 3691-4 vorgegebene Seitenabstand von mindestens 50cm zu festen Objekten kann in betrieblichen Einsatzbereichen als erfüllt angesehen werden.

Der fahrerlose Schlepper muss durch Signalleuchten und akustische Signale vor seiner Annäherung warnen. Es ist daher nicht mit Personen zu rechnen, die sich im Fahrweg auf den Schlepper zubewegen, da er sich dann grundsätzlich im Sichtfeld der entsprechenden Person befindet. Relevant für die sichere Erfassung und Reaktion sind deshalb nur Bewegungen von Personen quer zur Fahrtrichtung oder in Fahrtrichtung. Zusammenfassend bleibt als Risiko die Kollision mit Personen in folgenden Szenarien bestehen:

- Personen, die im Fahrweg des Fahrzeugs stehen,
- Personen, die sich quer oder in Fahrtrichtung innerhalb des Fahrwegs bewegen,
- Personen, die neben dem Fahrzeug stehen,
- Personen, die sich parallel zum Fahrzeug bewegen.

Bei den möglichen Gefahrenszenarien weicht die Bewertung potentiell sicherer Sensorik für fahrerlose Schlepper im hallenübergreifenden Einsatz bei Mischverkehr somit von der EN ISO 3691-4 ab und erweitert den Betrachtungsbereich entsprechen. Dort werden nur im Fahrweg des Fahrzeugs stehende Personen für relevant erachtet. [45] Des Weiteren geht durch Ausscheren oder Zwischentreten auch von Anhängern des Schleppers eine Gefahr aus. Eine entsprechende Absicherung ist bei marktverfügbaren Systemen vorzusehen oder durch eine entsprechende Gestaltung der Anhänger zu vermeiden.

Für fahrerlose Schlepper im hallenübergreifenden Einsatz ergibt sich die Risikoanalyse des Systems wie folgt gemäß [59]:

- **Schwere der Verletzung:** Bei einer Kollision eines fahrerlosen Schleppers mit vergleichbaren physischen Eigenschaften wie verfügbare, personengeführte Systeme kann eine schwerwiegende Verletzung von Personen aufgrund des hohen Eigengewichtes nicht ausgeschlossen werden.
- **Häufigkeit und Dauer der Gefährdungsexposition:** Fahrerlose Schlepper bewegen sich auf einem Betriebsgelände im Innen- und Außenbereich bei Mischverkehr, weshalb von häufigen Begegnungen mit anderen Verkehrsteilnehmern gerechnet werden muss.

- **Möglichkeiten zur Vermeidung der Gefährdung:** Fahrerlose Schlepper werden von geschulten Fachkräften in Betrieb genommen und überwacht. Ihre Geschwindigkeit ist dabei begrenzt und beträgt durchschnittlich maximal 3 m/s. Aufgrund des Einsatzes von optischen und akustischen Signalen wird angenommen, dass Personen im Umfeld gewarnt sind. Die Anforderungen an die Gestaltung der Einsatzbereiche für Schleppersysteme setzen Verkehrswege voraus, die breit genug sind, dass sich Personen aus dem Fahrbereich des fahrerlosen Schleppers entfernen können. Zudem sind Personen auf dem Betriebsgelände über den Betrieb eines entsprechenden Systems informiert und Interaktion zwischen dem Schlepper und Personen während der Fahrt nicht vorgesehen,

Unter diesen Annahmen ergibt sich als Anforderung an die Sicherheits-Sensorik des Schleppers somit ein nötiger Performance Level d (PL_d). Diese Einordnung deckt sich mit den Forderungen der DGUV für die Sicherheit von fahrerlosen Schleppern [60] und der relevanten Norm DIN EN ISO 3691-4 [45].

4.3.1.3 DIN EN ISO 3691-4: Flurförderzeuge – Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung – Teil 4: Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme

Die EN ISO 3691-4 „legt Sicherheitsanforderungen und die Mittel zu deren Verifizierung für fahrerlose Flurförderzeuge [...] fest.“ [45]. Somit betrachtet sie ebenfalls die Anforderungen an Einrichtungen zur Personenerkennung und somit der Sicherheit von fahrerlosen Schleppern. Bei widersprüchlichen Aussagen hat sie als Typ-C-Norm einen Geltungsvorrang gegenüber allgemein gefassten Normen wie der EN ISO 12100 und der EN ISO 13849.

Für berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen verweist die DIN EN ISO 3691-4 auf die beiden Normen IEC 61496-2 und IEC 61496-3. Da Kontaktsensoren aufgrund der geforderten Geschwindigkeiten für einen wirtschaftlichen Einsatz fahrerloser Schlepper nicht effektiv eingesetzt werden können und somit das ökonomische Gesamtkonzept primär auf kontaktlose Sensoren zurückgreift, werden diese beiden Normen in den folgenden Unterkapiteln noch detaillierter betrachtet. In der EN ISO 3691-4 werden die Anforderungen an die Erkennung von Personen im Fahrweg sowie damit zusammenhängende Tests für die Verifikation der Systeme definiert. Die Norm legt fest, dass Einrichtungen zur Personenerkennung eines fahrerlosen Schleppers diesen vor Kontakt der festen Teile des Systems oder der Ladung mit einer stehenden Person im Fahrweg vor dem Schlepper zum Stillstand bringen müssen. [45] Zudem werden der Betriebsbereich und der Betriebsgefahrenbereich definiert sowie eine Festlegung von offenen und geschlossenen Einsatzbereichen getroffen. [45]

Die Gestaltung der Betriebsbereiche orientieren sich dabei an den Anforderungen des Einsatzbereiches für Schleppersysteme gemäß ASR A1.8 „Verkehrswege“. Es gilt, dass auf beiden Seiten des Fahrweges zu festen Hindernissen ein Freiraum von mindestens 0,5 Metern mit einer lichten Höhe von 2,1 Metern gegeben sein muss. [45] Werden diese Anforderungen nicht erfüllt oder ist die Verwendung einer geeigneten Personenerkennungseinrichtung nicht möglich, kann ein fahrerloser Schlepper entsprechende Bereiche nur mit Einschränkungen in Hinblick auf die maximale Geschwindigkeit oder organisatorische Maßnahmen befahren. [45]

4.3.1.4 EN IEC 61496: Sicherheit von Maschinen – Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen

Wie bereits erwähnt, behandelt die Normenreihe EN IEC 61496 in ihrem ersten Teil die Anforderungen an den Entwurf und die Leistung von berührungslos wirkenden Schutzeinrichtungen. [61] Werden Messprinzipien nicht abgedeckt, so sind die Ausführungen der IEC TS 62998 zu berücksichtigen [62]

Die auf dem Markt primär genutzten Sensortechnologien für berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen werden dabei spezifisch durch die einzelnen Teile der Reihe EN IEC 61496 abgedeckt. Laserscanner werden dabei in der auch von der EN ISO 3691-4 referenzierten EN IEC 61496-3 behandelt, welche „besondere Anforderungen an aktive optoelektronische diffuse Reflexion nutzende Schutzeinrichtungen (AOPDDR)“ [61] vorgibt. Einzelne Prüfungen zum Nachweis des Detektionsvermögens und der Resilienz gegenüber Umwelteinflüssen für berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen werden dabei in der EN IEC 61496-3 beschrieben. [61]

4.3.2 Relevante Normen für fahrerlose Schlepperfahrzeuge ohne Bezug auf die Detektion von Personen

Neben den Anforderungen an die Gestaltung von Betriebsbereichen und die sichere Personenerkennung existieren weitere Vorschriften bezüglich fahrerloser Schlepper im hallenübergreifenden Einsatz. Diese werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

4.3.2.1 ISO 6292: Kraftbetriebene Flurförderzeuge und Schlepper – Bremsleistung und Komponentenfestigkeit

Die ISO 6292 legt fest, welche Eigenschaften zertifizierte Schlepper in Bezug auf die Bremsleistung, die Betätigungskräfte und Stellteile ihrer Bremssysteme aufweisen müssen. Die Norm legt mit Ihren Anforderungen somit den maximalen Bremsweg fest, der von einem fahrerlosen Schlepper nach Einleitung einer Bremsung in Innen- und Außenbereichen zurückgelegt werden kann. Dies steht in direktem Zusammenhang mit der Dimensionierung des Schutzfeldes der sicherheitsrelevanten Sensorik eines fahrerlosen Schleppers.[63]

4.3.2.2 EN 60721: Klassifizierung von Umweltbedingungen

Die relevanten Umweltbedingungen sowie die Grenzen für den Einsatz von fahrerlosen Schleppern werden in der Normenreihe EN 60721 festgelegt. Für die Sensorik zur Wahrung des sicheren Betriebes ist die EN 60721-3-5 mit dem Titel „Klassifizierung von Umweltbedingungen Teil 3: Klassen von Umwelteinflußgrößen und deren Grenzwerte Hauptabschnitt 5: Einsatz an und in Landfahrzeugen“ [64] relevant. Die Norm legt fest, unter welchen Umwelteinflüssen elektrotechnische Systeme eingesetzt werden.[64] Einflüsse lassen sich dabei in die Klassen „klimatische Umweltbedingungen (K), biologische Umweltbedingungen (B), chemisch-aktive Stoffe (C), mechanisch-aktive Stoffe (S), Kontaminationsmittel (F) und mechanische Umweltbedingungen (M) [...]“ [64] einordnen. Die in der Norm definierten Grenzen für Umweltbedingungen legen die Grenzen des potentiell möglichen Einsatzes fahrerloser Schlepper fest.

4.3.2.3 EN ISO 7250: Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung

Die EN ISO 7250 gibt Werte für die Körpermaße erwachsener Personen an und dient somit der Definition von zu erfassenden Objekten im Kontext der Personendetektion mittels sicherer Sensorik. [65]. Im Kontext des Einsatzes fahrerloser Schlepper ist in Deutschland auch die Detektion von noch nicht ausgewachsenen Personen relevant. Hier ergänzen die „Referenzperzentile für anthropometrische Maßzahlen und Blutdruck aus der Studie zur Gesundheit von Kindern und Jugendlichen in Deutschland (KiGGS)“ [66] die entsprechenden Anforderungen an die zu detektierenden Personen.

4.3.3 Auswertung der definierten Sensorkonzepte im Kontext der Sicherheitsanforderungen

Die grundlegende Anforderung an Sensorik für den sicheren Betrieb fahrerloser Schlepper stellt somit die korrekte, rechtzeitige und zuverlässige Erfassung von Personen und Hindernissen im Pfad des fahrerlosen Schleppers unter allen Betriebsbedingungen und relevanten Umwelteinflüssen dar. Unter Berücksichtigung der Anforderungen, die sich aus den Kollisionsszenarien und den Ausführungen der entsprechenden Normen ergeben, wurden alle aktiven Messprinzipien kontaktloser Sensoren des Konzeptes aus Kapitel 4.1.2 untersucht und deren Messprinzipien in Bezug auf die potentielle Eignung als sichere Sensoren im Betrieb von fahrerlosen Schleppern bewertet. Durch die Verwendung sehr kosteneffizienter Sensoren konnte hierbei sichergestellt werden, dass die entsprechenden Messprinzipien ohne Nachverarbeitung oder etwaige Vorauswertung zur Verfügung standen. Die entsprechenden Sensoren sind:

Tabelle 13: Verwendete Sensoren sowie deren Spezifikationen für die Überprüfung relevanter Messprinzipien

HC-SR04	Ultraschallsensor
Messprinzip	Ultraschall (40 kHz) (Reflexion)
Messbare Distanz	2 cm – 4 m
Genauigkeit	0,3 cm
Messintervall	20 ms (f = 50 1/s)
Erfassungskegel	< 1 m: +-22,5°; 3m: +-15°

RSM2650	RADAR
Messprinzip	Mikrowellen (24 GHz) (Reflexion)
Messbare Distanz	20 m
Betriebstemperatur	-20 - +60 °C
Erfassungskegel	+80°

Realsense D435i	Tiefenbildkamera
Messprinzip	Elektromagnetische Wellen (850 nm IR, 400-865 nm) (Emission & Reflexion)
Messbare Distanz	0,3 m – 10 m
Betriebstemperatur	0 – 35 °C (kurzfristig -40 – 70 °C)
Erfassungskegel	86°

VL53L1X	ToF-Laser Matrix
Messprinzip	Gepulstes Infrarot (940 nm) (Reflexion)
Messbare Distanz	- 4 m (bei starkem Umgebungslicht max. 1,3 m)
Betriebstemperatur	-20 - +85 °C
Erfassungskegel	27°

VL53L0X	ToF-Laser Matrix
Messprinzip	Gepulstes Infrarot (940 nm) (Reflexion)
Messbare Distanz	- 1,2 m (bei starkem Umgebungslicht max. 1 m)
Betriebstemperatur	-20 - +85 °C
Erfassungskegel	25°

RPLidar A2M8	ToF-LiDAR
Messprinzip	Infrarot (785 nm) (Reflexion)
Messbare Distanz	- 18 m (bei starkem Umgebungslicht max. 12 m)
Betriebstemperatur	-20 - +85 °C
Erfassungskegel	360°

Unter Berücksichtigung der relevanten Normen wird ersichtlich, dass die Sensorik für den sicheren Betrieb im gemischten Innen- und Außeneinsatz Kollisionen mit Personen innerhalb des Sicherheitsbereiches detektieren muss. Da sich der Schlepper gemäß den getroffenen Annahmen in Fahrtrichtung bewegt und Beschränkungen für den maximalen Lenkwinkel gemäß [67] getroffen werden können, ist dieser Sicherheitsbereich primär an die Geschwindigkeit des Systems gekoppelt. Auch die Auswerte- und Reaktionszeit des Systems bilden hier den kritischen Zeitfaktor ab.

Aus diesem Grund eignen sich Sensoren mit hoher Informationsdichte oder der Notwendigkeit der Interpretation von Daten nicht für eine Realisierung der Sicherheitsfunktion im kosteneffizienten Kontext. Dies betrifft insbesondere die optischen Sensoren, die konzeptionell im Rahmen der Navigation des fahrerlosen Schleppers verwendet werden, wie beispielsweise die Realsense D435i und die T265. Sie eignen sich zwar für die Detektion und Umfahrung von Hindernissen im normalen Betrieb, können aber bei unvorhergesehenen Szenarien nicht schnell genug ausgewertet werden. Für die potentiell sichere Sensorik muss daher auf die grundlegenden Messprinzipien der Time of Arrival-Messung mittels Ultraschall, Infrarot, LiDAR und RADAR zurückgegriffen werden. Diese Sensoren werden über geeignete Messschaltungen ausgewertet und können im Rahmen normierter Prüfungen auf Detektionsfähigkeit geprüft werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden hierzu anwendungsnahe Versuche durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse einer evaluierten Testreihe findet sich in Abbildung 38.

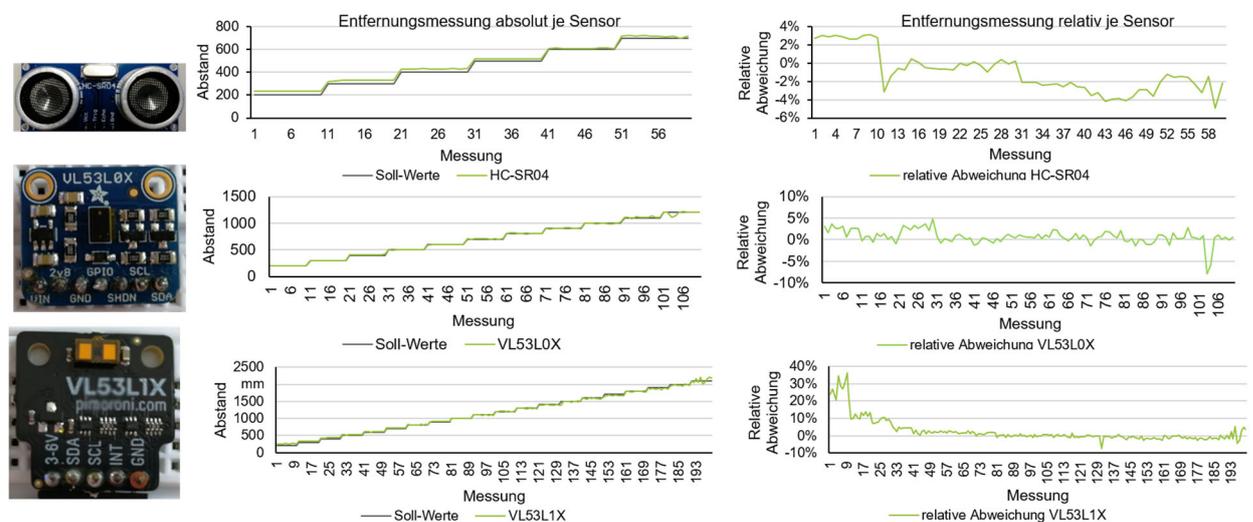


Abbildung 38: Exemplarische Evaluierung unterschiedlicher Sensoren für die Detektion von Hindernissen im Fahrweg

Basierend auf der Einzelevaluation der unterschiedlichen Sensoren konnte bestätigt werden, welche Systeme in ihrer Anwendung unter welchen Umgebungsbedingungen als potentiell sichere Sensoren geeignet sind. Die Erkenntnisse decken sich mit zertifizierten Sensoren, die bereits außerhalb der Anwendung von fahrerlosen Transportfahrzeugen für die Absicherung von Maschinen in unterschiedlichen Anwendungsszenarien eingesetzt werden. So finden sich beispielsweise:

- Sichere Ultraschallsensoren USi (ISO13849-1:2015 K3 PL d) der Firma Mayser/Pep-
perl+Fuchs
- Sichere RADAR-Sensoren z.B. SBV-01 (SIL2, PL d) der Firma Inxpect
- Sichere LiDAR-Sensoren z.B. OS32C (IEC61496-1/-3 Typ 3) der Firma Omron

Sensoren der notwendigen Leistungsklasse (PLd oder vergleichbar) für den sicheren Betrieb fahrerloser Schlepper sind dabei nicht kosteneffizient erhältlich. Einen Ansatz, welcher dennoch den potentiell sicheren Betrieb von fahrerlosen Schleppern mit kosteneffizienter Sensoren ermöglicht, stellt die gemeinsame Nutzung unterschiedlicher Messprinzipien in Verbindung mit der IEC TS 62998. Die IEC TS 62998 ist dabei eine anwendungsspezifische Norm, die einen potentiell sicheren Betrieb durch die Nutzung mehrerer Sensorsysteme in einem definierten Anwendungsfall ermöglicht.

Unter Berücksichtigung der IEC TS 62998 kann der Einsatz kosteneffizienter Sensoren in einem ganzheitlichen Sensorsystem potentiell die notwendige Sicherheitsklasse für den sicheren Betrieb fahrerloser Schlepper in spezifischen Anwendungsfällen erreichen. Daher wurden die identifizierten Messprinzipien ganzheitlich als potentiell sichere Sensorik bezogen auf einen spezifischen Anwendungsfall konzeptioniert. Zur gemeinsamen Beurteilung wurden daher die verbliebenden Messprinzipien in einer gemeinsamen Sensorbox an der Front des Systems angebracht, wie Abbildung 39 zeigt.



Abbildung 39: Sensorbox für die Fusion unterschiedlicher Sensoren im Kontext der IEC TS 62998 (oranger Kreis)

Die entsprechenden Sensoren für den potentiell sicheren Betrieb wurden verschiedenen Tests unterzogen, um die Eignung der einzelnen Messprinzipien zu evaluieren. Unter ökonomischen Gesichtspunkten zeigte sich, dass durch eine geschickte Anordnung und hardwarenahe Ansteuerung der Komponenten eine potentiell sichere Realisierung durch Ultraschallsensoren und den kosteneffizienten Infrarotlaser anwendungsspezifisch möglich scheint. Der Einsatz eines Radar-Sensors zeigte vorerst keine Vorteile, die den zusätzlichen Aufwand für die Integration und Auswertung des Sensors gerechtfertigt hätten. Er wurde somit aus der Sensorbox entfernt.

Zusammengefasst wurde im Rahmen des Arbeitspaketes potentiell sichere Sensorik sondiert und mit der IEC TS 62998 eine Norm für die ökonomisch sinnvolle und sichere Fusion unterschiedlicher Messprinzipien identifiziert. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde eine potentiell sichere Sensorkombination identifiziert und spezifiziert. Abbildung 40 zeigt die Ergebnisse der Anforderungsanalyse in Form der geforderten Schutzfelder sowie der Erfassungsbereich der entsprechenden Sensoren festgehalten.

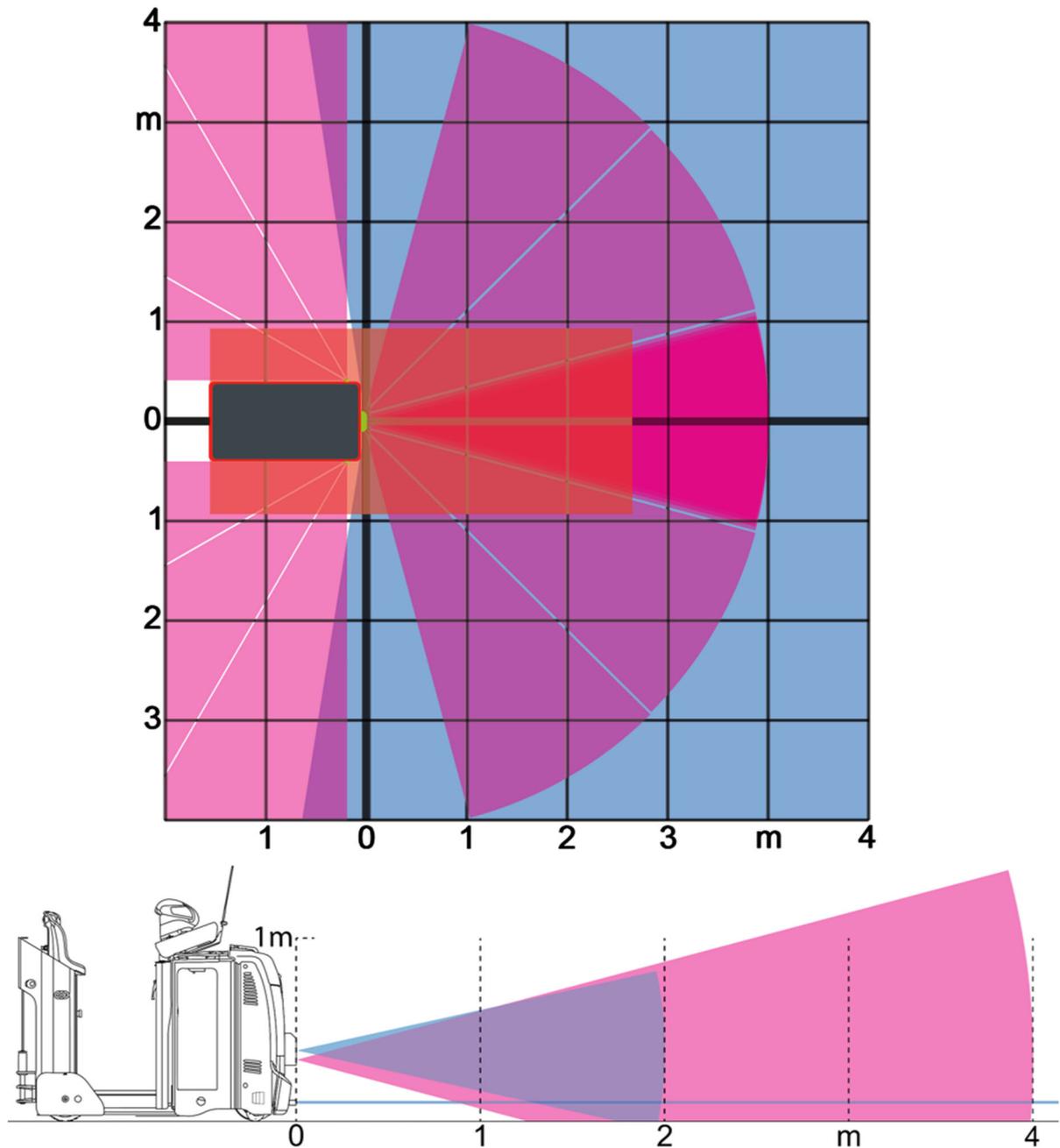


Abbildung 40: Sicherheitsbereich (rot) sowie die Erfassungsbereiche der ultraschallbasierten- (pink) und infrarotbasierten (blau) Sensoren

4.4 Fusion des „unsicheren“ Ortungskonzeptes mit der potentiell sicheren Personendetektion zu einem sicheren Gesamtsystem

Die Evaluation der kosteneffizienten Sensorik für den potentiell sicheren Betrieb des fahrerlosen Schleppersystems hat gezeigt, dass eine ganzheitliche Überwachung des sicherheitskritischen Bereiches möglich ist. Hierbei ist jedoch unabdingbar, dass der fahrerlose Schlepper nur Einsatzszenarien befährt, die im Rahmen der Bewertung der Sicherheitsfunktion gemäß der IEC TS 62998 betrachtet werden. Hier findet sich die Schnittstelle der potentiell sicheren Sensorik und der „unsicheren“ Ortung und Navigation, welche basierend auf der vollständigen Digitalisierung der Einsatzumgebung feststellen kann, welche Eigenschaften eine aktuell befahrene Umgebung aufweist. Im folgenden Kapitel wird daher die Fusion der Kollisions-Sensorik sowie der Ortungs- und Navigationslösung basierend auf dem ganzheitlichen Konzept näher beschrieben.

4.4.1 Vorbereitung der potentiell sicheren Sensorik zur Verknüpfung mit der Ortungslösung

Die Fusion der potentiell sicheren Sensorik zur Personendetektion sowie der Sensoren für die übergangslose Ortung- und Navigation erfolgte einerseits auf der physischen und andererseits auf der logischen Ebene. Die physische Ebene beschäftigte sich mit der Einbindung der einzelnen Sensoren in die Applikationsplattform unter Berücksichtigung von eventuellen Beeinträchtigungen durch andere Sensoren oder deren Messprinzipien. Als Integrationspunkt der potentiell sicheren Sensorik im Kontext der tatsächlichen Bewegung wurde die hardwarenahe Ansteuerung der entsprechenden Aktoren ausgewählt. Die potentiell sichere Sensorik fungiert hierbei als physischer Totmannschalter, der direkt die finale Ansteuerung des fahrerlosen Schleppers steuert. Bei der Detektion eines Hindernisses innerhalb des Sicherheitsbereiches des fahrerlosen Schleppers durch die potentiell sichere Sensorik sowie bei der Feststellung eines Systemausfalles wird eine Notbremsung initiiert und die fahrerlose Ansteuerung durch die übergangslose Navigation hierarchisch blockiert.

In der logischen Ebene der Verknüpfung wurde eine Möglichkeit zur Kommunikation zwischen der Ortungs- und der potentiellen Sicherheits-Sensorik konzipiert. Über diese teilt die Navigation der Auswerteeinheit der potentiell sicheren Sensoren mit, welche Soll-Geschwindigkeit und Soll-Lenkwinkel an die Aktoren des fahrerlosen Schleppersystems gesendet wurden und welche tatsächlichen Fahrbefehle dieses ausgeführt hat.

4.4.2 Zusammenführung der potentiell sicheren Sensorik sowie der digitalisierten Einsatzumgebung zu einem potentiell sicheren Gesamtsystem

Die Zusammenführung der Lösungen für die potentiell sichere Kollisionsdetektion und –vermeidung sowie die hallenübergreifende Navigation durch eine vollständige Digitalisierung der Einsatzumgebung erfolgte auf der Applikationsplattform Linde P50Ion wie in der Abbildung 41 dargestellt.



Abbildung 41: Zusammenführung des Konzeptes der vollständigen Digitalisierung der Einsatzumgebung sowie der Sensoren für die übergangslose Ortung und Navigation und der potentiell sicheren Sensorik

Auf der logischen Ebene wurde die potentiell sichere Sensorik an die Pfadplanung sowie die Navigation des Systems gekoppelt. In regelmäßigen Abständen sowie bei dem Eintritt eines Wetterphänomens, welches festgelegte Grenzwerte überschreitet, wird der geplante Pfad des fahrerlosen Schleppers in Hinblick auf die Fähigkeiten der Sicherheitslösung evaluiert. Tritt kein sicherheitskritischer Wechsel von Umgebungsbedingungen ein, so führt das Fahrzeug die Navigation gemäß der in 4.1 beschriebenen Algorithmen und Verfahren für die drei definierten Bereiche weiter aus. Im Rahmen dieser Navigation wird das Umfeld des fahrerlosen Schleppers durch die Sensoren der Navigation und übergangslosen Ortung erfasst und ein Pfad entsprechend ausgeführt. Die potentiell sichere Sensorik überwacht dabei den entsprechenden Sicherheitsbereich in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und dem Lenkwinkel des Systems und führt bei der Verletzung dieses Bereiches einen Nothalt aus.

Der Betrieb eines fahrerlosen Schleppers erfolgt allgemein auf befestigten Wegen, die industriell geräumt und gereinigt werden. Wie in dem Konzept definiert, wird der Betrieb eines fahrerlosen Schleppers in allen Bereichen durch einen rekonfigurierbaren Softwareagenten orts- und kontextbezogen gesteuert und überwacht. Bei der Überschreitung definierter Grenzwerte für Umweltbedingungen, bei denen eine Einschränkung der Sicherheit des Systems nicht ausgeschlossen werden kann, verhindert dieser Agent den Betrieb als organisatorische Sicherheitsmaßnahme entsprechend dem ganzheitlichen Sicherheitskonzept. Die relevanten Umweltbedingungen sind anwendungsspezifisch und müssen dem Fahrzeug in kurzen zeitlichen Abständen durch ein zuverlässiges System mitgeteilt werden, was exemplarisch im Rahmen der Umsetzung des Systems als Funktionsdemonstrator weiter erläutert wird. Die für ein kontaktloses Sicherheitssystem relevanten Umwelteinflüsse wurden generalisiert in 4.1.2 erläutert. Die Art der Reaktion auf das Eintreten jeglicher Umgebungseinflüsse durch den rekonfigurierbaren Softwareagenten ist ebenfalls anwendungsspezifisch, wird in der Folge aber exemplarisch für die als potentiell sicher eingeschätzte Sensorlösung aus 4.3.3 weiter ausgeführt. Relevante Parameter für die Definition der Umweltbedingungen, die Einfluss auf die potentiell sichere Sensorik nehmen, sind im allgemeinen Kontext die Temperatur in °C,

Luftfeuchte in %, Kondensation der Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit in km/h und Helligkeit in Lux.

Abbildung 42 zeigt einen exemplarischen Entscheidungsbaum des Softwareagenten, der abhängig von den Umgebungseinflüssen die Fahrt in dem spezifischen Einsatzbereich als organisatorische Sicherheitsmaßnahme einschränkt. Es ist zu beachten, dass die spezifischen Grenzwerte basierend auf den Datenblättern der Sensoren sowie empirischen Daten definiert wurden und somit je Anwendungsfall bestimmt werden müssen.

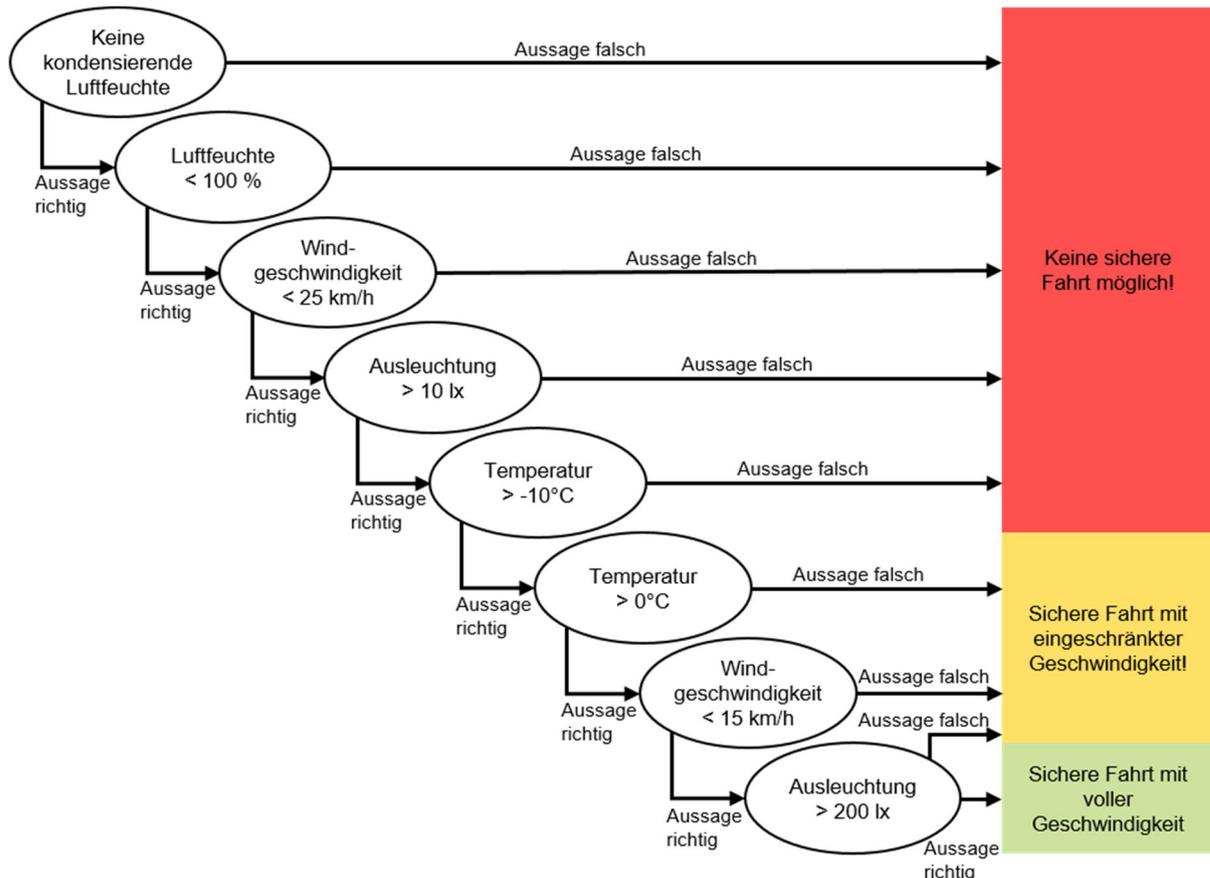


Abbildung 42: Exemplarischer Entscheidungsbaum zur organisatorischen Absicherung des sicheren Betriebs fahrerloser Schlepper in Abhängigkeit der aktuellen Umgebungsbedingungen

In Innenbereichen kann allgemein von geregelten Umweltbedingungen innerhalb eines vertretbaren Schwankungsbereiches ausgegangen werden, weshalb hier allgemein keine Einschränkungen durch den Softwareagenten vorgenommen werden. Für den Transitbereich muss anwendungsbezogen eine Geschwindigkeit gewählt werden, die den Anforderungen der übergangslosen Lokalisierung, Sicherheit und Navigation gerecht wird.

Für den Nachweis des sicheren Betriebs fahrerloser Schlepper muss anwendungsbezogen nachgewiesen werden, dass innerhalb der durch den Softwareagenten organisatorisch festgelegten Grenzen keine kritischen Umweltbedingungen für die potentiell sichere Sensorik auftreten können. Hierbei gelten die Referenz der für Landfahrzeuge vorgesehene IEC 60721-3-5 sowie die Umweltklassen der IEC TS 62998, welche in Anhang F einen identischen Anwendungsfall behandelt. Anhand der Einschätzungen der Norm und der IEC 60721-3-5 wer-

den die Klassen 5K3, 5B2, 5C2, 5S2, 5F1, sowie 5M2 als relevante Umweltbedingungen festlegt. In Tabelle 14 werden alle nach der EN 60721-3-5 auftretenden Umweltbedingungen aufgelistet.

Tabelle 14: Auftretende Umweltbedingungen, nach [64]

Klasse nach EN 60721-3-5	Umwelteinfluss	Werte
5K3	Lufttemperatur der Umgebung	Min. -10°C, Max. 40°C
	Temperaturänderung Luft/Luft	-10°C/+30°C
	Graduelle Temperaturänderung Luft/Luft, ausgenommen in Motorräumen	-10°C/+30°C, 5°C/min
	Relative Luftfeuchte, nicht kombiniert mit schneller Temperaturänderung	95%; +45°C
	Relative Luftfeuchte, kombiniert mit rascher Temperaturänderung	95%; 0°/+30°C
	Luftbewegung einschließlich Fahrtwind	<32 km/h
	Niederschlag oder Regen	Nein
	Sonnenstrahlung	1120 W/m ²
	Wasser (außer Regen)	1 m/s
	Nässe	Feuchte Oberflächen
5B1	Flora	Auftreten von Schimmel und Ähnlichem
	Fauna	Auftreten von Nagetieren und anderen tierischen Schädlingen, außer Termiten
5C2	Meersalz	Auftreten von Salznebel
	Streusalz	Auftreten von Streusalz und Salzwasser
	Weitere Schadstoffe	Sh. EN 60721-3-5
5S2	Sand (einschließlich Steinchen)	0,1 g/m ³
	Staub (Niederschlag)	3,0 mg/(m ² xh)

Klasse nach EN 60721-3-5	Umwelteinfluss	Werte
5F1	Kontaminationsmittel	Keine Kontamination durch Öle und weitere Flüssigkeiten
5M2	Sinusförmige Schwingungen	mm 3,3
		m/s ² 10 15
		Hz 2 bis 9 9 bis 200 200 bis 500
	Rauschförmige Schwingungen	m ² /s ³ 1 0,3 Hz 10 bis 200 200 bis 500
Stöße		S-A-Spektrum Typ I, m/s ² 100
		S-A-Spektrum Typ I, m/s ² 300
	Stöße von Fremdkörpern, Steine	5 J

Für jede dieser Umweltbedingungen muss im Anwendungsfall überprüft werden, ob Grenzwerte der entsprechenden Klassen vorliegen, welchen Einfluss diese auf die potentiell sichere Sensorik haben und ob das Auftreten etwaiger Umgebungsszenarien detektiert werden kann. Relevant sind im Rahmen der Betrachtung alle Sensoren, die gemeinsam die Sicherheitsfunktion des fahrerlosen Schleppers realisieren. Exemplarisch wird dies in der Folge für die potentiell sichere Sensorik des fahrerlosen Schleppers im hallenübergreifenden Einsatz bei Mischverkehr durchgeführt.

Ultraschallsensoren werden durch die Lufttemperatur der Umgebung beeinflusst, welche die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall verändert. Eine Korrektur ist bei vorliegenden Informationen über die aktuelle Umgebungstemperatur mathematisch möglich. Die rechnerische Abweichung des Messwerts beträgt bei einer Temperaturdifferenz von 20°C ca. 3,4%. [68]. Zusätzlich wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall durch hohe Windgeschwindigkeiten beeinflusst, auch wenn diese Beeinflussung im Kontext der Schallgeschwindigkeit verschwindend gering ausfällt. Dennoch ist eine Kompensation basierend auf aktuellen Umgebungsinformationen möglich. Einflüsse aus den Klassen B, C und F haben keinen unmittelbaren Einfluss auf die Ultraschallsensoren. Neben den von der EN 60721-3-5 definierten Umweltbedingungen bestehen weitere relevante Einflüsse. Andere Schallquellen können Messungen stören oder einschränken. [69]; [70] Hierbei eröffnet das ganzheitliche Konzept die Möglichkeit, basierend auf der vollständigen Digitalisierung der Einsatzumgebung Bereiche

zu definieren, in denen mit Einschränkungen zu rechnen ist. Dies können beispielsweise statische (z.B. Maschinen mit Emissionen im Ultraschallbereich) oder dynamische Definitionen (z.B. andere Fahrzeuge) sein. Somit ist der Softwareagent über etwaige Interferenzen informiert und kann entsprechend angemessen agieren.

Time of Flight-Sensoren basierend auf einer Laufzeitmessung eines Infrarotlichtimpulses werden von diffusen Partikeln in der Luft beeinflusst. Dies kann durch Wasserdampf oder Staubpartikel geschehen und muss anwendungsspezifisch analysiert werden. [71]; [72] Während die Einflüsse durch kondensiertes Wasser bereits durch den definierten Softwareagenten ausgeschlossen werden, kann Staub die Messungen beeinträchtigen. Sollte in einem Anwendungsfall eine kritische Grenze überschritten werden, bietet sich beispielsweise die Erfassung des Umgebungsparameters über eine geeignete Umgebungs-Sensorik an. Entsprechende Partikelfilter können die relevanten Staubkonzentrationen erfassen und im Kontext der vollständig digitalisierten Einsatzumgebung an den fahrerlosen Schlepper melden.

Dieselben Erkenntnisse gelten auch für den Laserscanner, wie den „RPLiDAR A2M8“ als kosteneffiziente Lösung. Es ist insbesondere mit einer Beeinflussung durch Licht zu rechnen. Je nach Messprinzip und Umsetzung der mehrdimensionalen Umwelterfassung kann zudem potentiell der Einsatzbereich eingeschränkt werden, wie beispielsweise bei der Nutzung von Schleifringen zur Datenübertragung, welche nur bei positiven Temperaturen eingesetzt werden können. [73] Eine Eignung ist daher zu prüfen und gegebenenfalls der Betriebsbereich des Fahrzeugs über den Softwareagenten und unter Anpassung von Tabelle 14 weiter einzuschränken.

Zusätzlich können alle Komponenten der Sicherheitsfunktion, insbesondere die Mikrocontroller durch Wasser geschädigt werden. Entsprechende Umwelteinflüsse müssen erfasst und organisatorisch eliminiert werden. Zusätzlich sind technische Lösungen denkbar, wie beispielsweise eine wasserfeste Versiegelung der elektronischen Komponenten mit Acryllack. Daher ist mit keiner wesentlichen Gefährdung durch Wasser zu rechnen.

Es kann somit für die exemplarische Umsetzung der potentiell sicheren Sensorik festgestellt werden, dass relevante Einflüsse durch die Einschränkung des Betriebs bei widrigen Umgebungsbedingungen vollständig eliminiert werden und die zulässigen Umweltbedingungen keine einschränkende Funktion auf die potentiell sicheren Sensoren des Systems ausüben. Durch die Sensordatenfusion im Rahmen der IEC TS 62998 können zudem die negativen Wettereinflüsse auf die Sensorik in Teilen ausgeglichen werden, auch wenn keine vollständige Redundanz erreicht wird. Für den notwendigen Performance Level D gibt die IEC TS 62998 einen Grenzwert für gefahrbringende Ausfälle aufgrund von Umweltbedingungen von in Summe maximal fünf Sekunden pro Jahr vor. Dieser muss für die potentiell sichere Sensorik anwendungsspezifisch erfüllt werden.

4.4.3 Validierung der Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit sowie Testläufe mit dem Funktionsdemonstrator

Die Validierung der potentiell sicheren Sensoren sowie der übergangslosen Ortung und Navigation erfolgt bei der Betrachtung der IEC TS 62998 anhand definierter Testszenarien sowie im Rahmen einer durch die Norm geforderten Betrachtung mittels Simulation.

4.4.3.1 Validierung des potentiell sicheren Gesamtsystems in der Simulation

Die Norm für die Fusion potentiell sicherer Sensoren fordert sowohl in der Entwicklung des Sensorsystems als auch bei der Umsetzung eine Betrachtung und Bewertung der Sicherheits-Sensorik mittels Simulation. Diese kann dabei numerisch oder unter Nutzung von entsprechenden Programmen umgesetzt werden. Im Rahmen des ganzheitlichen Konzeptes für die vollständige Digitalisierung der Einsatzumgebung, die eng mit der potentiell sicheren Sensorik und der Navigation sowie der Lokalisierung verknüpft ist, bietet sich eine integrierte Simulationsumgebung an. Anwendungsfallbezogen kann beispielsweise die physikalische Simulationsumgebung „Gazebo“ genutzt werden. „Gazebo“ ist eine Multiphysik-Simulation, die eng mit ROS interagieren kann. [74]. Somit lässt sich die Erfassung sowie das Verhalten des gesamten Systems mit physikalisch korrektem Verhalten evaluieren, wie in der Abbildung 43 dargestellt.

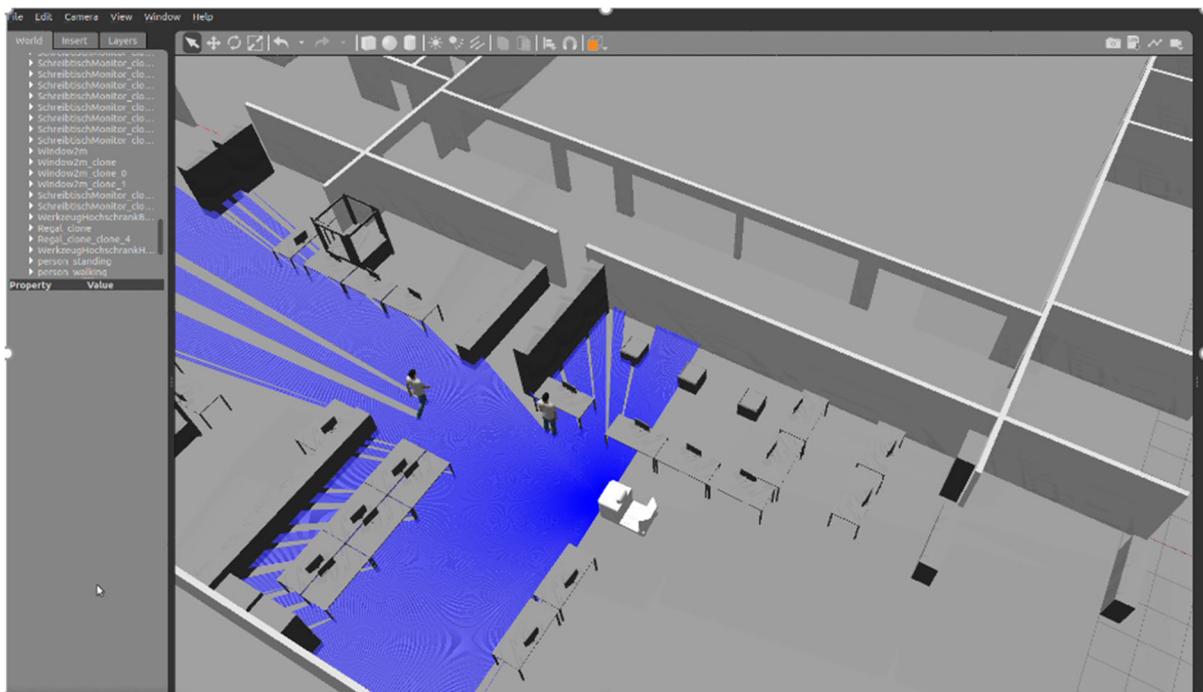


Abbildung 43: Simulation des Gesamtsystems in der Umgebung Gazebo zur Evaluation der Sicherheit

Zusätzlich ermöglicht die Simulation eine Bewertung von physischen Modifikationen der Anbringung potentiell sicherer Sensoren an dem Rahmen des fahrerlosen Schleppersystems. So kann sichergestellt werden, dass etwaige Prüfkörper in jeder Einsatzsituation erfasst und störende Interferenzen vermieden werden. In „Gazebo“ lassen sich beispielsweise auch die Reflexionseigenschaft von Oberflächen anpassen, um die Detektion von Glas oder durchsichtigem Acryl mit den einzelnen potentiell sicheren Sensoren zu validieren. Durch eine Modellierung des fahrerlosen Schleppersystems mit korrekten physikalischen Attributen können zudem Eigenschaften wie der Bremsweg des Systems auf unterschiedlichen Untergründen getestet und simulativ validiert werden.

Die Simulation eignet sich ebenfalls für die Analyse der Auswirkungen von physikalischen Phänomenen, wie beispielsweise Gefällen und Steigungen auf die sensorische Erfassung. Für das industrielle Umfeld lässt sich bei Steigungen von 5° feststellen, dass diese von der Sicherheits-Sensorik im Abstand von 1,86 m als Hindernis detektiert werden, bevor das Fahrzeug selbst die Steigung befährt. Bei einer Geschwindigkeit von 6 km/h würde diese Distanz

bereits einen Sicherheitshalt des fahrerlosen Schleppersystems auslösen, weshalb in der exemplarischen Sensorkonfiguration eine Reduktion der Geschwindigkeit bei der Anfahrt von Steigungen benötigt wird. Dies verkürzt den Sicherheitsbereich und das problemlose Befahren von Steigungen wird möglich. Ein weiterer kritischer Punkt sind Gefälle beziehungsweise das Ende einer Steigung. An diesen Stellen kann ein Hindernis hinter der Kante verschwinden und möglicherweise nicht rechtzeitig erkannt werden. Zur Prüfung dieser Situation wird ein Prüfkörper so platziert, dass die gedachte Verlängerung der Rampe den Prüfkörper streift. Dies entspricht dem Worst-Case. Auch hier zeigt sich exemplarisch für die gewählte Sensorkonfiguration, dass bei Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit keine sichere Erkennung gewährleistet ist. Um die Geschwindigkeit vor und während Steigungen präventiv reduzieren zu können, muss eine Steigungserkennung organisatorisch über die vollständige Digitalisierung der Einsatzumgebung und die inhärente Informationscodierung umgesetzt werden.

Für weitergehende Untersuchungen sind auch tiefergehende Simulationen in Betracht zu ziehen. Für eine detailliertere Simulation von mobilen Robotern auf ROS-Basis und unter Verwendung der Unity Engine wird auf [75] verwiesen. Einen weiteren interessanten Ansatz zur Simulation von Robotern bietet das NVIDIA Isaac SDK. [76] Zur Simulation von Sensoren bestehen vielfältige Ansätze im Kontext des autonomen Fahrens. Mat-Lab bietet Möglichkeiten zur Simulation von autonomen Fahrzeugen und der zugehörigen Sensorik wie Radar, LiDAR und Kamerasystemen (vergleiche hierzu [77]; [78]). Aufgrund der Ähnlichkeit der eingesetzten Sensorik ist eine entsprechende Übertragung auf den vorliegenden Anwendungsfall potentiell möglich. Eine Simulation speziell von optischen Sensoren ist in einer Umgebung von Zemax möglich. [79]; [80]. Für die Schaltungssimulation bieten sich LTspice [81] oder vergleichbare Programme an. Eine akkurate Simulation von Umwelteinflüssen erfordert große Ressourcen und ist nur schwer umsetzbar. Gegenwärtig wird daher auch an standardisierten Vorgehensweisen gearbeitet. [82]

4.4.3.2 Definition von Prüfkörpern für die reale Evaluation des potentiell sicheren Gesamtsystems

Die relevanten Normen für die Evaluierung der Sicherheits-Sensorik von fahrerlosen Schleppersystemen fordern die Verwendung von Prüfkörpern für den Nachweis der Detektion von Personen. Bei der Definition der Prüfkörper müssen laut der IEC TS 62998 die verwendete(n) Sensortechnologie(n), relevante Objekteigenschaften, die Art der geplanten Tests sowie der vorgesehene Einsatzzweck der Sicherheits-Sensorik berücksichtigt werden. [62]

Für die Prüfung der Personenerkennung definiert die EN ISO 3691-4 [45] zwei Prüfkörper, die sich gemäß den Anforderungen der IEC TS 62998 unter Berücksichtigung der entsprechenden Sensortechnologien nutzen lassen. Beide Prüfkörper sind zylinderförmig und unterscheiden sich lediglich in ihren Maßen. Prüfkörper A besitzt einen Durchmesser von 200mm sowie eine Länge von 600mm, Prüfkörper B besitzt einen Durchmesser von 70mm bei einer Länge von 400mm. Die Prüfkörper stehen stellvertretend für einen Arm beziehungsweise ein Bein [83]

Die Prüfkörper müssen nach der EN ISO 3691-4 „[...] einen äußeren Oberflächenreflexionsgrad von 2 % bis 6 % und eine optische Dichte von 1,22 (z. B. schwarz) aufweisen [45] Diese Anforderungen decken die kritischen Grenzwerte für den Einsatz von LiDAR-Systemen ab. Weitere Anforderungen an das Material werden von der EN ISO 3691-4 nicht gestellt. Um die spezifischen Eigenschaften der Schallreflexion beziehungsweise Dämpfung durch Menschen

nachzubilden, kann als Oberfläche der Prüfkörper schwarzer Baumwollstoff mit einer Dichte von 140 g/m^2 [84] in zwei Lagen genutzt werden.

Gemäß der EN IEC 61496-3 „[...] müssen die Probekörper ein Zylinder mit einem Durchmesser sein, der der minimalen detektierbaren Objektgröße entspricht und eine effektive Länge von mindestens $0,2 \text{ m}$ hat [...]“. Diese Anforderungen erfüllt einer der beiden definierten Prüfkörper. Weiterhin definiert die EN IEC 61496-3 diese Prüfkörper je mit schwarzer, weißer sowie retroreflektierender Oberfläche. Für den Prüfkörper wird weiterhin gefordert: „Die Oberfläche des [schwarzen] Probekörpers muss unter Normalbedingungen und unter Einschluss der Messgenauigkeit einen Koeffizienten diffuser Reflexion im Bereich von $1,6 \%$ bis $2,0 \%$ bei der ausgesendeten Wellenlänge haben. Dieser Wert muss durch Messung nachgewiesen werden.“ [61]. In der EN IEC 61496-3 wird eine „Untersuchung zur Bestimmung der Reflektivität des schwarzen Probekörpers“ [61] mit unterschiedlichen Materialien vorgestellt. Dort ergibt sich im für die Sicherheits-Sensorik relevanten Wellenlängenbereich bei schwarzem Samt und schwarzem Breitcord eine Reflektivität inner- oder unterhalb der geforderten Spanne. Auch Baumwollstoff erfüllt die Anforderungen, weshalb dieser für die Evaluation verwendet wird. Abbildung 44 zeigt eine Aufnahme von zwei Prüfkörpern, die für eine Vielzahl der geforderten Prüfungen genutzt werden können.



Abbildung 44: Aufnahme der Prüfkörper A und B

Die Prüfkörper besitzen zusammengefasst die folgenden Eigenschaften:

- **Prüfkörper A:** Aluminiumrohr, Länge 600 mm, Außendurchmesser 200 mm, Wandstärke 5 mm, bezogen mit 2 Lagen schwarzem Stoff mit einer Dichte von 140 g/m²
- **Prüfkörper B:** Aluminiumrohr, Länge 400 mm, Außendurchmesser 70 mm, Wandstärke 5 mm, bezogen mit 2 Lagen schwarzem Stoff mit einer Dichte von 140 g/m²

4.4.3.3 Prüfungen der Sicherheits-Sensorik in Fahrrichtung

Zur Verifizierung der Sicherheits-Sensorik in Kombination mit dem restlichen System werden diverse Prüfungen nach der EN ISO 3691-4 gefordert und exemplarisch am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik durchgeführt, wie in Abbildung 45 gezeigt. Alle durchgeführten Tests dienen zur Verifizierung der Erfüllung der Sicherheitsanforderungen an die potentiell sichere Sensorik und insbesondere der Verifizierung der Anhaltefunktion bei Präsenz einer Person im Fahrweg des Fahrzeugs. Die EN ISO 3691-4 sieht vor, dass die vorgestellten Prüfkörper je einmal mittig und an beiden Rändern des Fahrwegs des Schleppers platziert werden.



Abbildung 45: Durchführung der Prüfungen gemäß der EN ISO 3691-4 am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik in Erlangen

Die EN ISO 3691-4 fordert, dass diese Prüfungen „[...] unter den ungünstigsten Bedingungen (z. B. Beladung, Neigung, Drehung, Vorwärtsrichtung, Rückwärtsrichtung) in Kombination mit den für das Flurförderzeug vorgegebenen Parametern für diese Bedingungen [...]“ [45] und „[...] mit mindestens 110 % der vom Hersteller definierten Nenntagfähigkeit bei maximaler Geschwindigkeit für jede Personenerkennungseinrichtung und jede Einstellung, wie vom Hersteller vorgegeben (z. B. mehrere Felder), durchgeführt werden.“ [45]

Die entsprechende Anhängelast ergibt sich aus dem Aufbau des genutzten Schleppersystems und muss somit stets anwendungsspezifisch definiert werden. Die Anforderungen der ISO 6292 an den Bremsweg müssen dabei ebenfalls beachtet und erreicht werden, was bei der Umrüstung marktverfügbarer Systemen zutreffend sein sollte. Wird anwendungsspezifisch festgestellt, dass der vorgeschriebene Bremsweg mit entsprechender Beladung den Grenzwert überschreitet, so lässt sich die zulässige Anhängelast des Schleppers organisatorisch reduzieren, bis der angenommene Bremsweg eingehalten wird. Alternativ kann die maximale Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Anhängelast reduziert werden. Reichen diese Maßnahmen nicht aus, oder sind aus organisatorischen Gründen wie einer mindestens nötigen Fahrzeuggeschwindigkeit ungeeignet, so kann sich auch Formel zur Berechnung des Schutzfeldes angepasst werden. Der mögliche Bereich der Anpassung muss bereits vorab softwareseitig festgelegt sein.

Für die Prüfung der Detektion von Prüfkörpern im Fahrweg muss anwendungsbezogen ein geeigneter Testplan definiert werden. Dabei ist die Erkennung von Personen im Fahrweg und die gegebenenfalls geschwindigkeitsabhängige Anpassung des Schutzfeldes zu validieren. Für die Bewertung der kosteneffizienten Sensoren ist hierbei ein Einschreiten der Navigation zu unterbinden, wenn das Verhalten nicht garantiert werden kann. Die Prüfgeschwindigkeit muss der maximalen Geschwindigkeit entsprechen, falls keine organisatorischen Sicherheitsmaßnahmen für deren Reduktion getroffen werden. Ist eine geschwindigkeitsbezogene Anpassung des Schutzfeldes vorgesehen, so muss diese mit den relevanten Geschwindigkeiten evaluiert werden. Um die Prüfung zu bestehen, muss die Sicherheits-Sensorik einen Sicherheitshalt einleiten, der ohne Kontakt mit dem Prüfkörper abgeschlossen werden wird.

4.4.3.4 Prüfung der Sicherheits-Sensorik in Drehrichtung

Die EN ISO 3691-4 besagt: „In Wende- und Drehrichtung ist für die seitlichen Schutzmaßnahmen des Flurförderzeugs die Einhaltung [...] der Prüfung B [der EN ISO 3691-4] ausreichend.“ Diese Prüfung kann ergänzend zu der Detektion von Hindernissen neben dem Fahrbereich des Fahrzeuges betrachtet werden. Relevant ist diese Prüfung für Situationen, in denen das Fahrzeug aus dem Stand eine Drehung beginnt, während sich eine Person neben ihm befindet. Diese könnte ohne Detektion durch die Sicherheits-Sensorik vom Fahrzeug erfasst werden. Im Kontext des Betriebs fahrerloser Schlepper ist hierbei zu berücksichtigen, welche Bewegungen im Rahmen der Navigation möglich sind. Drehbewegungen, die über eine geeignete Parametrisierung sicher unterbunden werden, müssen nicht durch entsprechende Sensorik überwacht werden. Exemplarisch wird im Folgenden aber von einer Drehung aus dem Stand ausgegangen, wie Sie beispielsweise bei der Ausrichtung vor einem Anhänger realistisch ist.

Zur Prüfung der Personenerkennung mittels Ultraschall, wie er in Abbildung 46 dargestellt ist, können Prüfkörper seitlich neben dem Fahrzeug platziert werden. Dabei müssen sich diese jeweils am Rand eines vom Fahrzeug bei Drehung beschriebenen Kreises oder innerhalb dieses Kreises befinden. Für die Durchführung des Testes wird dem Fahrzeug bei jedem Testdurchlauf ein Drehbefehl gegeben, um einen Einfluss durch weitere Objekte in der Nähe auf die Navigation auszuschließen. Hierbei muss sich das Fahrzeug in Bewegung versetzen, sobald es den Drehbefehl erhält und das Schutzfeld noch nicht verletzt ist. Diese Vorgehensweise wird mit dem Prüfkörper an repräsentativen Positionen wiederholt, wobei sich das Fahrzeug in allen Fällen nicht bis zu einer Kollision bewegen darf.



Abbildung 46: Exemplarische Darstellung der Sensorik zur rotatorischen Absicherung mittels kosteneffizienter Sensoren

4.4.3.5 Prüfung auf Umwelteinflüsse

Ein zentraler Punkt der IEC TS 62998 ist die Verlässlichkeit unter Umwelteinflüssen. Für deren vollständigen Nachweis sind systematische Labortests nötig, die anwendungsbezogen mit der entsprechenden Sensorik durchgeführt werden. Exemplarisch wurde dies für einige Sensoren der potentiell sicheren Sensorik des Konzeptes durchgeführt. Eine Untersuchung des Temperatureinflusses auf die Ultraschallsensoren wurde beispielsweise in [85] beschrieben. Basierend auf den dort gemessenen Werten lässt sich zeigen, dass Temperaturänderungen signifikanten Einfluss auf die Abstandsmessung mit Ultraschallsensoren haben, sofern die Umgebungstemperatur nicht mit einem Korrekturfaktor beachtet wird, wie in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Mittlere prozentuale Messabweichung der Ultraschallsensoren zwischen 20,0°C und 5,0°C für Abstandsmessungen ohne Korrekturterm der Temperatur

Messdistanz	Mittlere prozentuale Messabweichung der Ultraschallsensoren zwischen 20,0°C und 5,0°C
1,0 m	3,5%
2,0 m	2,8%
3,0 m	8,7%
3,75 m	15,1%
Mittel aller Distanzen	7,5%

Auffällig ist, dass die Messabweichung höher ausfällt als theoretische Berechnungen ergeben. Bei einer Differenz von 15°C beträgt die theoretische Abweichung bei Berechnung anhand von [68] ca. 2,7%. Methoden zur Verhinderung einer gegenseitigen Beeinflussung von Ultraschallsensoren werden in [86] beschrieben.

Des Weiteren wurde eine Störung der optoelektronischen Sensoren durch Lichteinfluss als potentiell relevant identifiziert. Zur Prüfung des Einflusses bieten sich die in der EN IEC 61496-3 beschriebenen Untersuchungen an, die ebenfalls anwendungsbezogen durchgeführt werden müssen. Exemplarisch wird in der Folge eine der Prüfungen beschrieben, die besondere Relevanz für die Sicherheitsfunktion der in Funktionsdemonstrator gewählten Sensorlösung besitzt. Als Orientierung zur Prüfung der Beeinflussung des Laserscanners durch weiß strahlendes Licht dient Abschnitt 5.2.1.2.2 der EN IEC 61496-3. Für die Prüfung wird der Prüfkörper B an Positionen vor dem Fahrzeug in unterschiedlichen Abständen aufgestellt. In 0,1 m Distanz hinter dem Prüfkörper wird eine Lichtquelle in Richtung des Laserscanners platziert. (vgl. Abbildung 47)

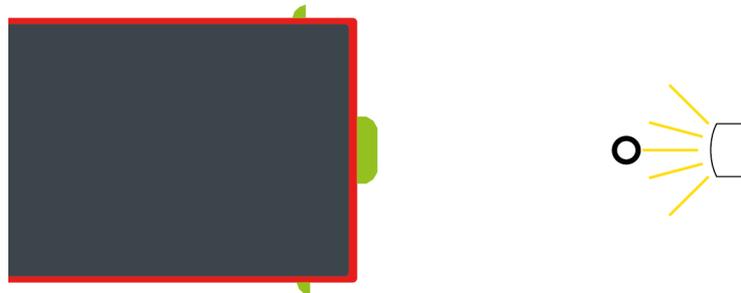


Abbildung 47: Prüfaufbau zur Prüfung der Detektionsfähigkeit unter Einfluss von weiß strahlendem Licht

Eine Lichtquelle dient eine Halogenlampe des Typs „Osram DULUX F 24 W/840 2G10“. Das Leuchtmittel liefert einen Lichtstrom von 1700lm bei einer Farbtemperatur von 4000K. [87] Der von der EN IEC 61496-3 vorgesehene Wert von 3000lx kann dabei nicht in allen Distanzen erreicht werden, es ergeben sich aber dennoch relevante Erkenntnisse.

Bei der Versuchsdurchführung wird der Probekörper im entsprechenden Abstand platziert, dann die Aufnahme der Messdaten gestartet und anschließend die Lichtquelle eingeschaltet. Auch bei dieser Prüfung werden je 1.000 Datenreihen aufgenommen. Der zu Prüfung E gehörige Testplan ist in Tabelle 16 dargestellt. Das Testergebnis gibt die Quote der Erkennung des Prüfkörpers durch mindestens einen Messpunkt des Laserscanners an.

Im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Blendung fällt eine Reduzierung der Erfassungsquote auf. In einer Distanz von 0,1 m beträgt sie noch 39,1%, in den weiteren Distanzen liegt sie bei knapp 100%. Die Standardabweichung unter Blendeinfluss steigt deutlich an. Den Vergleich mit der Standardabweichung unter normalen Bedingungen zeigt Tabelle 17. Dargestellt wird dabei die Standardabweichung aus der Kombination aller den Prüfkörper erfassenden Messpunkte.

Tabelle 16: Testplan zu Prüfung E

Geprüfte Anforderung	Testklassifizierung	Testbezeichnung	Position	Testergebnis
Prüfung der Detektionsfähigkeit unter Einfluss von weiß strahlendem Licht	Typtest	Prüfung E	A	39,1%
			B	99,7%
			C	99,1%
			D	100,0%
			E	98,5%

In den Distanzen 0,1 m und 1,0 m ist die Standardabweichung ohne und mit Blendung vergleichbar. Für größere Distanzen wächst die Standardabweichung unter Blendeinfluss bis auf das ca. 37-fache der Standardabweichung ohne Blendeinfluss an.

Tabelle 17: Vergleich der Standardabweichung des Laserscanners ohne und mit Blendung

Messdistanz	Standardabweichung ohne Blendung	Standardabweichung mit Blendung
0,1 m	0,0 mm	0,1 mm
1,0 m	10,8 mm	9,8 mm
2,0 m	14,1 mm	256,4 mm
3,0 m	17,0 mm	635,0 mm
4,0 m	35,9 mm	793,8 mm

Eine Überprüfung der Umwelteinflüsse muss dabei anwendungsbezogen mit der tatsächlichen Sensorik erfolgen. Die entsprechenden Grenzwerte, die einen sicheren Betrieb des fahrerlosen Schlepplers nicht mehr ermöglichen, müssen durch geeignete organisatorische Maßnahmen unterbunden werden.

4.4.3.6 Analyse des Komponenteneinflusses auf die Erkennungsfähigkeit sowie Konformität der Sicherheits-Sensorik mit der Sicherheitsanforderungsspezifikation

Die IEC TS 62998 fordert eine Analyse des Komponenteneinflusses auf die Erkennungsfähigkeit der Sicherheits-Sensorik. Die Komponenten können durch Umwelteinflüsse, aber auch durch Mängel der Komponenten oder Fehler während Entwurf und Entwicklung, beeinflusst werden und müssen anwendungsspezifisch betrachtet werden. Im Folgenden wird exemplarisch eine qualitative Analyse des Ausfalls von Komponenten auf die Erkennungsfähigkeit in Form eines „Design Reviews“ durchgeführt.

Bei Ausfällen von Komponenten muss mit einer Beeinträchtigung der Erkennungsfähigkeit des Gesamtsystems gerechnet werden. Die Sensoreinheiten der Sicherheits-Sensorik sind im Frontbereich grundsätzlich redundant ausgelegt, dort basiert die Erkennung sowohl auf

Ultraschallsensoren als auch auf einem Laserscanner. Die frontalen Ultraschallsensoren selbst sind vierfach ausgeführt, also physisch redundant ausgelegt. Die weiteren Komponenten der Sicherheits-Sensorik, der ToF-Sensor, der Laserscanner, die seitlichen Sensorboxen, die Verarbeitungseinheit und die Ein-/Ausgangseinheit sind nicht redundant ausgelegt.

Für die folgende Betrachtung wird angenommen, dass alle Sensoreinheiten die in den Datenblättern angegebenen Werte erreichen und für den Einsatz als Teil der Sicherheits-Sensorik geeignet sind. Ausfälle in der frontalen Sensorbox bis hin zum Komplettausfall der Sensorbox sind durch die redundante Auslegung für die Personenerkennung unkritisch, da durch den Laserscanner weiterhin eine Erkennung gewährleistet ist. Dies gilt jedoch nur, wenn sich die sicherheitsrelevanten Objekte, wie in diesem Anwendungsfall, auf Personen beschränken. Wird die Sicherheits-Sensorik zur Erkennung weiterer Objekte eingesetzt, können die Ultraschallsensoren an Relevanz gewinnen. Der Ausfall anderer Komponenten ist anwendungsabhängig ebenfalls als kritisch zu bewerten. Entscheidend für die Sicherheit bei Ausfall von Komponenten ist die Fehlerreaktionsfunktion der Sicherheits-Sensorik, welche anwendungsbezogen umgesetzt werden muss. Wenn eine entsprechende Fehlerreaktionsfunktion zuverlässig funktioniert, können Ausfälle als nicht gefahrbringend eingestuft werden. Neben der Fehlerreaktionsfunktion sorgt die Auslegung als Totmann-Schalter für einen Nothalt bei Ausfall des Sicherheits-Systems.

Teil der Verifikation der Sicherheits-Sensorik ist gemäß der IEC TS 622998 auch die Bestätigung der Konformität der Sicherheits-Sensorik mit der Sicherheitsanforderungsspezifikation. Werden alle Anforderungen des Anwendungsfalles erfüllt, stellt die potentiell sichere Sensorik eine Lösung für den sicheren Betrieb fahrerloser Schlepper im hallenübergreifenden Einsatz dar. Die Kombination der potentiell sicheren Sensorik mit der vollständigen Digitalisierung der Einsatzumgebung sowie der inhärenten Informationscodierung ermöglicht zudem die Nutzung von organisatorischen Maßnahmen für die spezifische Definition von Einsatzumgebungen.

4.4.4 Zusammenfassung der Fusion des unsicheren Ortungskonzeptes und der potentiell sicheren Personendetektion

Im Rahmen des vierten Arbeitspaketes wurde die potentiell sichere Personendetektion durch die Fusion kosteneffizienter Sensoren nach der IEC TS 62998 mit dem ganzheitlichen Konzept für die übergangslose Ortung und Navigation basierend auf einer ganzheitlichen Digitalisierung der Einsatzumgebung kombiniert. Durch die inhärenten Informationen der relevanten Einsatzumgebung verbunden mit dem rekonfigurierbaren Softwareagenten werden unsichere Betriebsbedingungen gemieden und der sichere Betrieb in den übrigen Bereichen ermöglicht. Andererseits schafft die sichere Personendetektion die notwendige Sicherheit für die Umsetzung des übergangslosen Betriebs fahrerloser Schlepper mit dem dynamischen Wechsel der Navigations- und Ortungsansätze. Insgesamt ergibt sich aus der Fusion ein ökonomisches und sicheres Gesamtkonzept für den Betrieb fahrerloser Schlepper im hallenübergreifenden Einsatzes bei Mischverkehr.

4.5 Realisierung und Test der Ortungslösung an einem Funktionsdemonstrator

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde der Labordemonstrator P50Ion, wie in Abbildung 48 dargestellt, zu einem vollständigen Funktionsdemonstrator für die übergangslose Lokalisierung und Navigation von fahrerlosen Schleppern im Innen- und Außenbereich bei Mischverkehr erweitert. Im folgenden Kapitel wird die Umsetzung des ganzheitlichen Ansatzes präsentiert sowie die Funktionsfähigkeit des Systems gezeigt.



Abbildung 48: Funktionsdemonstrator des Forschungsprojektes E|SynchroBot

4.5.1 Physischer Aufbau

Der Funktionsdemonstrator des Forschungsprojektes basiert auf einem handelsüblichen Schlepper P50Ion der Firma Linde, der manuell geführt bereits als Labordemonstrator in Kapitel 4.2.2 vorgestellt und eingesetzt wurde. Der Schlepper besitzt eine definierte Schnittstelle zur Ansteuerung der Antriebsmotoren und des Lenkwinkels sowie der Ausgabe entsprechender Sensorinformationen zu den beiden Komponenten. Über diese Schnittstelle kann der Schlepper somit fahrerlos betrieben werden, indem entsprechende Ansteuersignale für die Aktoren übermittelt werden. Die vollständige Interaktion zwischen der Intelligenz des fahrerlosen Schleppersystems und dem physischen Schlepper erfolgt über diese Schnittstelle. Die einzige Ausnahme bildet die Nothalt-Funktion, die mit dem händischen Not-Aus-Schalter in Reihe geschaltet ist. Der Schlepper kann jederzeit manuell gefahren werden, da manuelle Lenk- und Geschwindigkeitseingaben über den Lenker die digitale Ansteuerung überschreiben und in der Folge deaktivieren.

Die Funktionalitäten der übergangslosen Lokalisierung, der Navigation sowie der Sicherheits-Sensorik sind als unabhängige Module konzipiert, die den handelsüblichen Schlepper entsprechend erweitern und ohne signifikante Abhängigkeiten voneinander agieren. Abbildung 49 stellt die einzelnen Module sowie deren Anbringung an dem Schlepper dar.



Abbildung 49: Module für den übergangslosen Betrieb eines fahrerlosen Schleppers bei Mischverkehr

4.5.1.1 Modul 1: Rechenleistung:

Das zentrale Element des fahrerlosen Schleppers stellt ein Industrie-PC (DX-1100) auf der Basis eines Intel i7-8700T Prozessors mit 16 GB DDR4-2666 Arbeitsspeicher dar. Der Rechner nutzt als Betriebssystem Linux Ubuntu 18.04 sowie das Robot Operating System (ROS) in der Version Melodic. Innerhalb des ROS wird ein Großteil der Funktionalitäten der übergangslosen Ortung, Pfadplanung, Navigation und der Digitalisierung der Einsatzumgebung in der Form von Paketen umgesetzt. Auch der rekonfigurierbare Zustandsautomat ist in ROS implementiert und steuert somit das Verhalten des fahrerlosen Schleppers. Die einzelnen Sensoren sowie die Mikrocontroller für die Kommunikation mit der Sicherheits-Sensorik sowie dem Schlepper sind über insgesamt 12 USB-Anschlüsse und 2 Ethernet-Verbindungen mit dem Rechner verbunden.

Für den fahrerlosen Schlepper besonders relevante Aspekte, wie die Pfadplanung, die dynamische Fusion der Ortungsdaten und die Ansteuerung des Schleppers mit dem hinterlegten Bewegungsmodell wurden von Grund auf neu implementiert, während insbesondere im Bereich der Sensoren auf die bereitgestellten und gepflegten Pakete der Hersteller gesetzt wurde.

4.5.1.2 Modul 2: Navigation und Ortung:

Das zweite Modul umfasst die Sensoren sowie Algorithmen für die hierarchische Navigation des Systems, welche im Rahmen des Konzeptes vorgestellt wurden. Als Sensoren kommen hierbei zum Einsatz:

- **LiDAR:** Sick TiM571
- **Kamera:** Intel Realsense D535i und Intel T265

- **UWB:** Decawave DW1001 und Kinexon UWB
- **GNSS:** Ublox8 neo

Für die Digitalisierung der Einsatzumgebung wurde ein knotenbasierter Ansatz unter Verwendung des .osm-Standards entwickelt, der eine Darstellung und Adaption jeder Einsatzumgebung für die Ortung und Navigation von fahrerlosen Schleppersystemen ermöglicht. Die Nutzung von .osm-Daten ermöglicht zudem die Verwendung von frei verfügbaren Datensätzen für die Darstellung von Umgebungen, die aufgrund des Open Source-Ansatzes kostenfrei adaptiert und genutzt werden können. Abbildung 50 zeigt einen Ausschnitt des Umfeldes des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik in Erlangen, welcher aufgrund der coronabedingten Einschränkungen bezüglich des industriellen Anwendungsfalles alternativ als Validierungsszenario definiert werden musste.

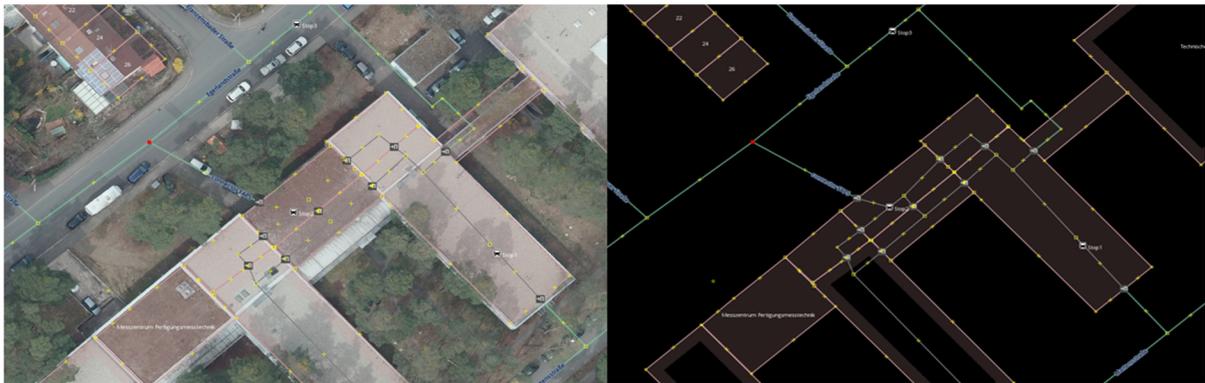


Abbildung 50: Umfeld des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik mit einem Satellitenbild hinterlegt (links) und als reine knotenbasierte Darstellung (rechts)

Innerhalb des .osm-Standards werden grundsätzlich drei Datentypen verwendet, um die Umgebung für fahrerlose Schlepper gemäß den Anforderungen des hallenübergreifenden Betriebs zu beschreiben. Knoten stellen die geografische Referenz eines Punktes auf der Karte dar, der mit einer eindeutigen ID innerhalb des Systems verknüpft wird. Die Verbindung zwischen zwei oder mehr Punkten wird als way bezeichnet und impliziert eine physikalische Verbindung zwischen diesen Punkten. Der dritte Datentyp sind die Referenzen, die jedem Knoten und jeder Kante basierend auf deren eindeutiger ID zugewiesen werden können. Die Referenzen lassen sich dabei als freie Schlüssel-Wert-Paare definieren, die zudem in maschinenlesbarer Form vorliegen. Dies ermöglicht die vollständige Digitalisierung der Einsatzumgebung durch die Wahl geeigneter Parameter.

Für jeden way wird über den Schlüssel „highway“ festgelegt, ob sich eine Verbindung zwischen zwei Knoten im Innen- Transit- oder Außenbereich befindet, indem entsprechende Werte definiert werden. Auch die Knoten können über einen entsprechenden, selbst gewählten Schlüssel beschrieben werden. Eine Anpassung und Erweiterung der freien osm-Daten ist problemlos mit einem der verfügbaren Tools möglich. Neue Routen im Kontext des Einsatzes fahrerloser Schlepper lassen sich unter Zuhilfenahme von Satellitenbildern oder eigenen Hallenlayouts planen und in der absoluten Referenz beschreiben. Karten für den Innenbereich können in Form ihres Speicherpfades auf dem System ebenfalls hinterlegt und dem System bekannt gemacht werden.

Nach der Digitalisierung der Einsatzumgebung mit allen relevanten Parametern und der damit realisierten Erstellung einer topologischen Karte der Einsatzumgebung wird diese durch den

fahrerlosen Schlepper aus dessen Dateisystem eingelesen und für die Pfadplanung und Ortung verwendbar gemacht. Dies wird in unserer Implementierung des Konzeptes durch das Tool `osm2pgrouting`, welches eine PostgreSQL-Datenbank um die Fähigkeit erweitert, `osm`-Daten zu nutzen und zu analysieren, umgesetzt. [88]

Resultierend liegt eine vollständige Datenbank mit allen relevanten Informationen über die Einsatzumgebung vor, die eine Definition der Einsatzumgebung während der Ortung, eine Modifikation der Metriken für die Berechnung eines optimalen Pfades sowie der Aktualisierung der Pfadplanung bei veränderten Anforderungen ermöglicht. Die Schnittstelle bilden hierbei Datenbankabfragen, die über Python-Skripte aus dem ROS und somit durch den Agenten des fahrerlosen Schleppers ausgeführt werden können.

Im Rahmen der Navigation existieren dabei für jede der 16 Konfigurationen, die sich bei der Definition der Einflussbedingungen auf die Sensorik ergeben haben (Kapitel 4.1) eigene Dateien mit entsprechenden Parametern für die erlaubte Maximalgeschwindigkeit auf den definierten Wegen sowie Fahrbeschränkungen, die sich aus den gewählten Sensoren ergeben. Wird in der obersten Hierarchiestufe der Pfadplanung ein Transportauftrag für den fahrerlosen Schlepper registriert, so stellt dieser eine Anfrage an den gewünschten Planer (A* oder Dijkstra) mit den relevanten Parametern (Koordinaten des Start- und Zielpunktes sowie Parameterdatei) der hierzu entsprechende Datenbankabfragen ausführt. Als Ergebnis erhält der fahrerlose Schlepper einen Pfad bestehend aus Zwischenpunkten der topologischen Karte mit Informationen zu der entsprechenden Einsatzumgebung, eventuell vorhandenen lokalen Karten sowie der notwendigen Sensorkonfiguration für die optimale Erfassung der Umgebung.

Basierend auf der Entscheidung, ob der nächste zu befahrende Pfad im Innen-, Transit- oder Außenbereich liegt, kann der fahrerlose Schlepper den entsprechenden Pfadplaner für die detaillierte Planung unter den Anforderungen der realen Einsatzumgebung wählen. Für den Außenbereich ist dies eine Definition der befahrbaren Bereiche basierend auf optischen Sensoren. Je nach Untergrundbeschaffenheit, die innerhalb der `osm`-Daten für Außenbereiche definiert wird, wurde hierbei je ein Verfahren basierend auf klassischen Bildverarbeitungsalgorithmen und ein Verfahren unter Nutzung von Algorithmen der künstlichen Intelligenz entwickelt. Beide Verfahren nutzen ein aktuelles Bild sowie die Punktwolke der Einsatzumgebung, um befahrbare Bereiche zu definieren. Diese werden in eine Kostenkarte übersetzt und dann gemäß der Potentialfeldmethode basierend auf dem Pfad der obersten Hierarchiestufe befahren. Die beiden Navigationsverfahren sind in Abbildung 51 dargestellt.

Die Navigationsverfahren eignen sich dabei bereits für die Vermeidung einer Vielzahl von Kollisionen, decken aber keine Sicherheitsfunktion ab. Diese wird durch das Modul 3 abgebildet und später beschrieben. Sicherheitsrelevant ist hingegen die organisatorische Maßnahme der Einschränkung der befahrbaren Einsatzumgebungen, die im Rahmen der höchsten Hierarchiestufe umgesetzt wird. Ist unter aktuell vorherrschenden Umgebungsbedingungen kein sichererer Betrieb möglich, so werden entsprechend markierte Pfade als nicht befahrbar bewertet. Ließe sich ein Zielpunkt nur über entsprechende Pfade erreichen, so schlägt die Pfadplanung fehl.

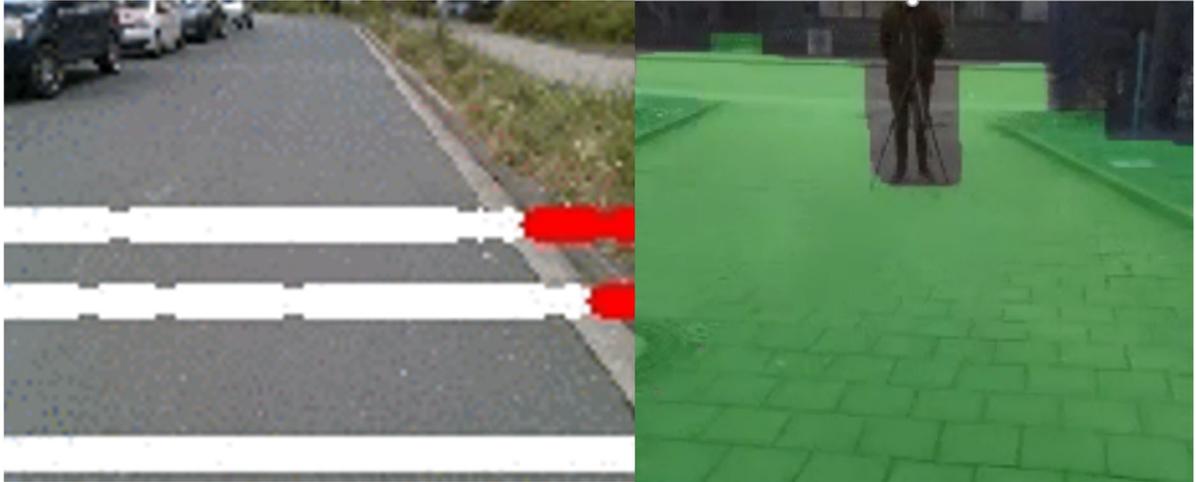


Abbildung 51: Definition der befahrbaren Bereiche für fahrerlose Schlepper basierend auf klassischen Bildverarbeitungsmethoden und dem Einsatz von KI-Algorithmen

Im Innenbereich ist aufgrund der höheren Anforderungen der Genauigkeit und der Granularität der Pfadplanung eine weitere Stufe zielführend. Aufgrund der quasistatischen Umgebung bietet sich hierbei der Einsatz einer probabilistischen Landkarte des Innenbereiches an. Über die Referenzierbarkeit einzelnen Punkte innerhalb dieser Landkarte und den globalen Kontext lässt sich eine feingranulare Pfadplanung ohne Overhead für die topologische Karte der obersten Hierarchiestufe schaffen. Für den Einsatz mit fahrerlosen Schleppern wurde dazu im Rahmen der Umsetzung in einem Funktionsdemonstrator ein bestehender Ansatz für fahrerlose Transportfahrzeuge [89] auf den Einsatz mit fahrerlosen Schleppern mit ihren physikalischen Einschränkungen appliziert, wie Abbildung 52 zeigt.

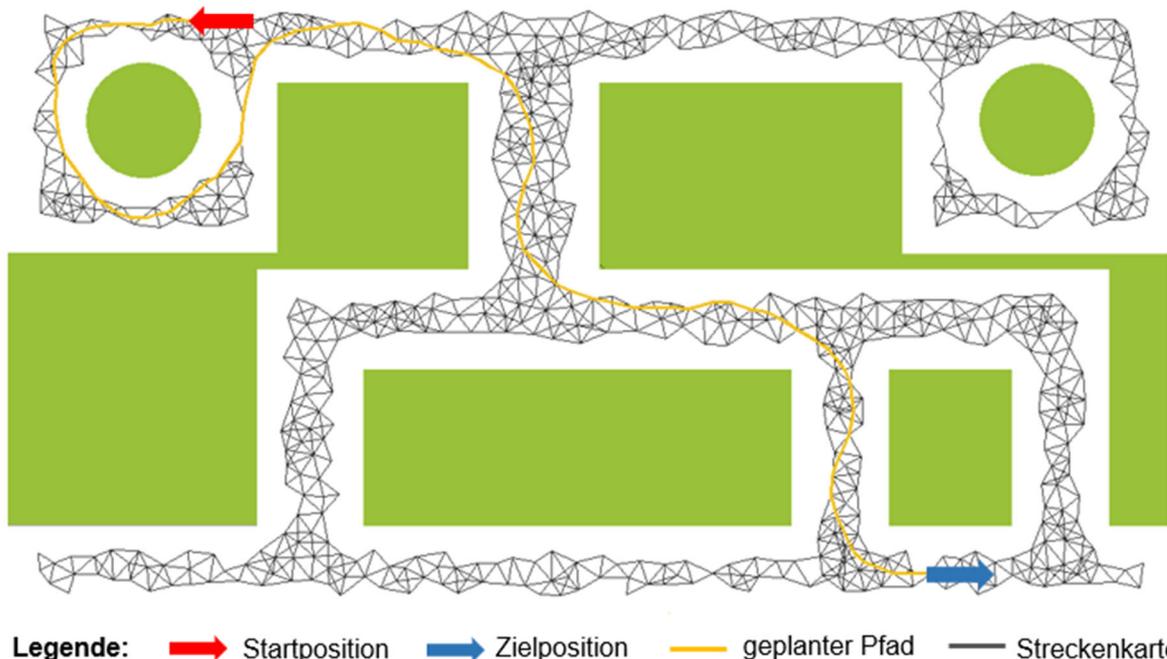


Abbildung 52: Darstellung der Pfadplanung der mittleren Hierarchiestufe im Innenbereich basierend auf einer probabilistischen Landkarte

Die eigentliche Navigation, also die Ausführung des Pfades im Innenbereich erfolgt als Umsetzung des Timed Elastic Band Algorithmus [90] sowie einer lokalen Kostenkarte unter Nutzung einer Abwandlung des originalen OctoMap-Algorithmus. [91] Dieser erstellt aus einer

Punktwolke der Umgebung, die aus zuvor fusionierten Sensorinformationen von LiDAR und Stereokamera besteht, eine planare Kostenkarte, die für die Ausführung und lokale Hindernisvermeidung genutzt wird. Die resultierende Navigation ist in Abbildung 53 dargestellt.

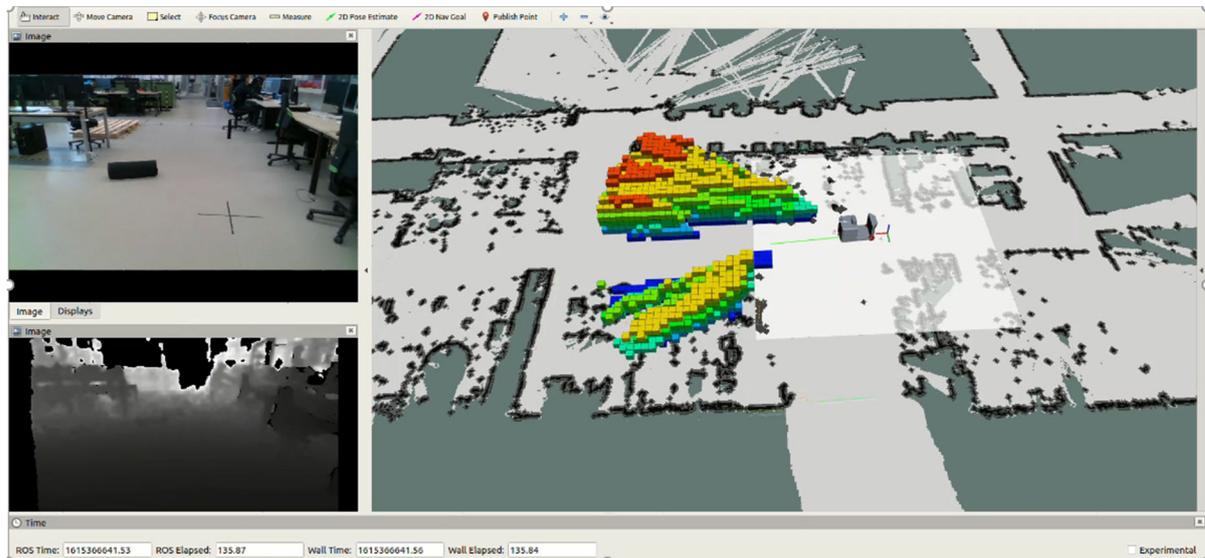


Abbildung 53: Navigation im Innenbereich, Links die Sensordaten der Realsense D435i, rechts die resultierende Hinderniskarte mit den farbigen Oktaedern basierend auf der Höhe der Hindernisse sowie der ausgeführten Trajektorie (grüne Linie)

In Transitbereichen erfolgt die Navigation mit einer Abwandlung des Carrot-Planers [92], welcher der vorgegebenen Trajektorie durch die oberste Hierarchiestufe mit minimalen Abweichungen folgt.

Die Ortung zu jedem Zeitpunkt erfolgt gemäß der Konzeption in Kapitel 4.2 in Abhängigkeit der entsprechenden Einsatzumgebung. Zu diesem Zweck wird für jede Kante des Pfades der obersten Hierarchiestufe entschieden, welche Konfiguration und somit auch welche Gewichtung der unterschiedlichen Sensoren angewandt wird.

4.5.1.3 Modul 3: Kollisionsdetektion

Die physikalische Umsetzung der Kollisionsdetektion und –vermeidung des Forschungsdemonstrators basiert auf den Ergebnissen der Validierung in 4.4. Die entsprechenden Sensoren wurden gemäß den Anforderungen der Sicherheitsbereiche sowie in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Simulation an dem fahrerlosen Schlepper angebracht.

Die Einbindung in das System erfolgt über einen Mikrocontroller ST32f446 der Firma STMicroelectronics mit einem entsprechenden Echtzeitbetriebssystem. Dieses steuert die einzelnen Sensoren an und wertet die Sensorinformationen aus. Über eine Totmannschaltung hat dieser Mikrocontroller die Möglichkeit, die fahrerlose Ansteuerung des Routenzuges zu unterbrechen.

4.5.1.4 Modul 4: Umgebungserfassung

Die Umgebungserfassung dient der Bestimmung der relevanten Umgebungsparameter für den fahrerlosen Betrieb des Schleppers. Die Erfassung findet dabei am Schlepper und in der

Infrastruktur statt. Die Umgebungserfassung über die Infrastruktur ermöglicht dabei die Aufnahme des aktuellen IST-Zustandes der Einsatzumgebung im Außenbereich, um die Pfadplanung des Fahrzeugs ohne die aktive Befahrung dieser Bereiche zu informieren.

Im Rahmen des Funktionsdemonstrators für den übergangslosen Betrieb im Innen- und Außenbereich bei Mischverkehr wurde eine Wetterstation WH4000SE der Firma Froggit modifiziert, um ohne Verbindung zu einem externen Server relevante Wetterdaten über WiFi zu übermitteln. Diese Informationen werden von einem Einplatinenrechner in der Nähe der Basisstation der Wetterstation empfangen, verschlüsselt und über das LoRa-Protokoll veröffentlicht. Dies ermöglicht es allen Fahrzeugen im Umkreis der Wetterstation, in einem Intervall von 16 Sekunden stets die aktuellen Informationen zu relevanten Parametern zu erhalten. Die Kommunikationskette sowie Beispiele für die erfassten Parameter sind in Abbildung 54 dargestellt.



Abbildung 54: Kommunikationskette für die Mitteilung externer Wetterparameter an den fahrerlosen Routenzug zur Definition der Umgebungseinflüsse

Der Empfänger auf dem fahrerlosen Schlepper legt die so empfangenen Wetterdaten in einer weiteren Datenbank innerhalb des ROS ab, sodass diese den Algorithmen für die Ortung und Navigation zur Verfügung stehen.

4.5.1.5 Modul 5: Signalgebung

Das Modul der Signalgebung dient der Erfüllung der Anforderungen der DIN 3691-4 an Warnsysteme. Das Warnsystem ist in der Form eines Blinklichtes an dem Fahrzeug realisiert, welches während der fahrerlosen Bewegung kontinuierlich mit fester Frequenz blinkt. Das Anfahren des Systems wird mit einem durchgängigen Leuchten des Blinklichtes für drei Sekunden signalisiert, eine Bewegung bei nicht aktiver Personenerkennung ist nicht möglich und wird somit nicht gesondert angezeigt.

Die Steuerung der Warneinrichtung wird durch den Mikrocontroller durchgeführt, der ebenfalls die Auswertung der Sicherheits-Sensorik durchführt. Erlischt das Blinklicht, so hat das System eine Person im Fahrweg identifiziert und einen Nothalt eingeleitet. Ein Wideranfahren ist aufgrund der Anforderungen an die Sicherheitskomponenten des Fahrzeugs nicht ohne vorherige Freigabe durch eine Person möglich. Das verwendete Blinklicht sowie seine Anbringung sind in Abbildung 55 dargestellt.

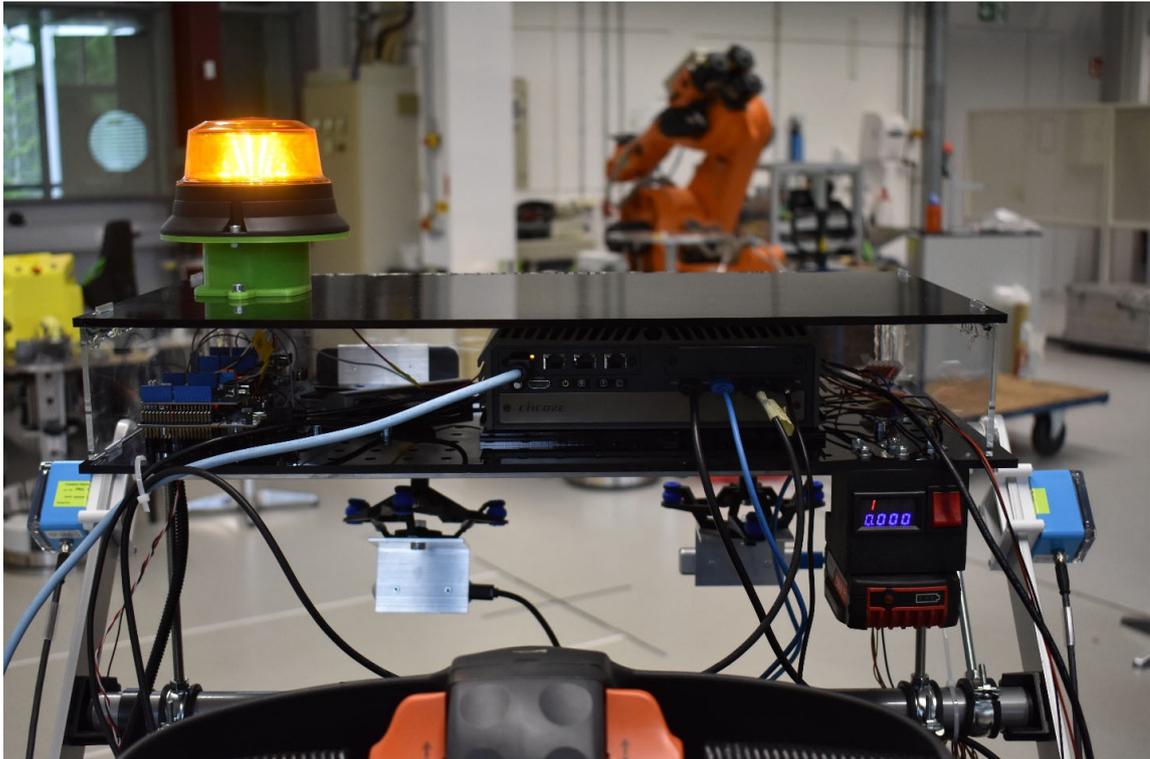


Abbildung 55: Anbringung der Warneinrichtung sowie der Notfall-Stromversorgung in der Form eines Bosch-Akkus

4.5.1.6 Modul 6: Energieversorgung

Die Energieversorgung des Funktionsdemonstrators erfolgt aufgrund des modularen Charakters unabhängig von der vorhandenen Energieversorgung des Schleppersystems. Durch eine Auslegung der Komponenten auf den Bereich der Versorgungsspannung von 16 bis 48 Volt ist dennoch eine Einbindung in alle relevanten Schleppersysteme unterschiedlicher Hersteller denkbar.

Zur Wahrung der Sicherheit befindet sich zudem ein redundanter Notfall-Akku im System des fahrerlosen Schleppers. Diese übernimmt unterbrechungsfrei die Energieversorgung der Sensoren sowie des Rechners und der Mikrocontroller, sobald die Versorgungsspannung den Wert von 16 Volt unterschreitet. Mit dem gewählten Notfall-Akku (18V, 4Ah), der in Abbildung 73 dargestellt ist, kann das System noch 8 Minuten betrieben werden. Aus Sicherheitsgründen wird aber bei Umschalten auf die alternative Energieversorgung ein Stopp des Schleppers initiiert und das System sicher zum Stillstand gebracht.

Eine Anpassung, die beispielsweise den Austausch der primären Energieversorgung bei gleichzeitiger Betriebsfähigkeit des fahrerlosen Schleppers ermöglicht, wäre aufwandsarm zu implementieren. Mit einer geeigneten Vorrichtung zum Austausch würde dies einen kontinuierlichen Einsatz eines fahrerlosen Schleppersystems ermöglichen.

4.5.2 Evaluation des Gesamtsystems

Bedingt durch die Einschränkungen bei den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses infolge der Corona-Pandemie konnte die ursprünglich geplante Validierung innerhalb eines Industrie-Umfeldes nicht wie geplant umgesetzt werden. Alternativ wurde ein

Rundkurs im Umfeld des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik definiert und der fahrerlose Schlepper im dortigen Einsatz evaluiert.

Zusätzlich wurde das Schleppersystem inklusive der entsprechenden Sensoren in der Simulations-Umgebung Gazebo umgesetzt, um hier weitere Aspekte des holistischen Ansatzes für den hallenübergreifenden Einsatz zu evaluieren.

4.5.2.1 Physische Evaluation des Gesamtkonzeptes

Im Rahmen der physischen Validierung am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik wurde der fahrerlose Routenzug auf einem Rundkurs mit mehreren Innen- und einem Außenbereich eingesetzt. Anhand dieser Evaluierung wurde die korrekte Funktionalität des kompletten Softwareframeworks sowie die Genauigkeit der Sensoren und die Funktionalität der Sicherheit des Systems getestet. Abbildung 56 zeigt einen Ausschnitt der Evaluierung mit der Sicht des Fahrzeugs sowie der Darstellung der Navigation und Ortung des fahrerlosen Schleppers

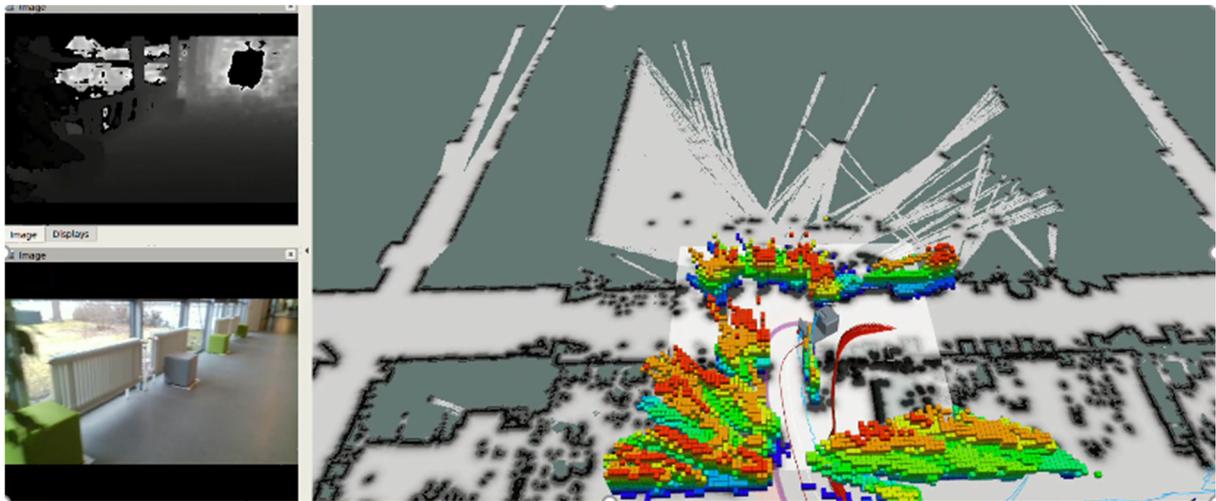


Abbildung 56: Ausschnitt einer exemplarischen Evaluierungsfahrt mit den Sensorinformationen sowie der Navigation und Ortung des Systems

Im Rahmen der ersten allgemeinen Evaluierung konnte die allgemeine Funktionalität des Systems mit mehreren erfolgreichen Fahrten sichergestellt werden. Die Abweichungen der einzelnen Ortungsquellen, die durch die kosteneffizienten Sensoren induziert wurden, konnten durch die dynamische Fusion basierend auf den Kovarianzinformationen der Einzellösungen zu einer guten Gesamtpose fusioniert werden. Eine detaillierte Auswertung der Einzel-Ortungslösungen findet sich in [93].

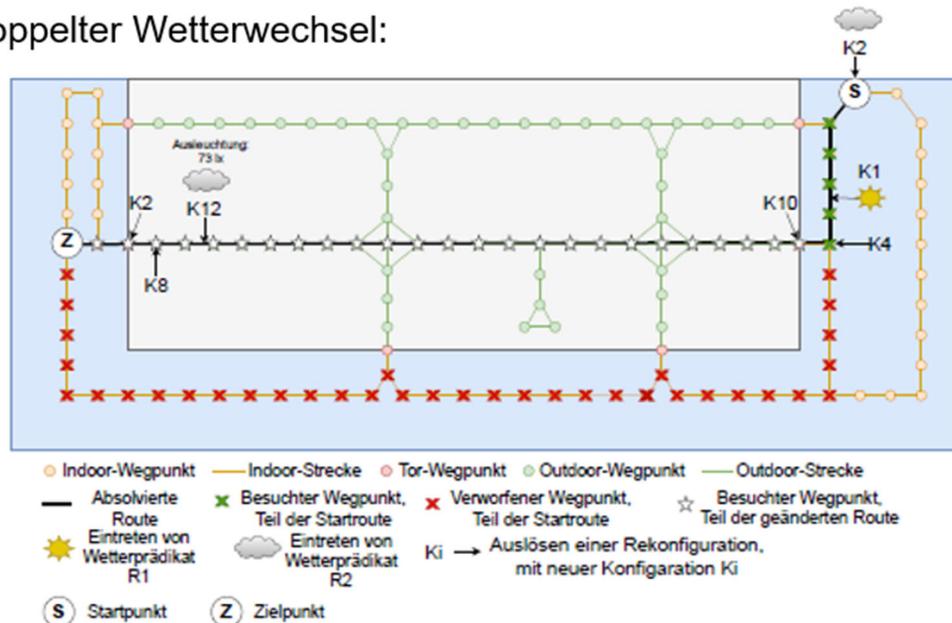
4.5.2.2 Simulative Evaluation

Im Rahmen der simulativen Evaluation wurden weitere Funktionalitäten des Systems evaluiert. Primär wurden hierbei Wettereinflüsse betrachtet, die im Rahmen der physischen Evaluation nicht berücksichtigt werden konnten. Für diese Szenarien wurden zwei repräsentative Umgebungen mit entsprechenden Innen-, Transit- und Außenbereichen definiert. Die Umgebungen bilden dabei einerseits den Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik in Erlangen sowie eine repräsentative Industrieumgebung ab. Eine originalgetreue

Nachbildung des Funktionsdemonstrators sowie eine digitale Umsetzung der Transportauftragsagenten wurden ebenfalls implementiert, um die gesamten Schnittstellen des Systems abdecken zu können.

Im Rahmen einer ersten Evaluation wurde untersucht, ob die Pfadplanung und die Rekonfiguration der einzelnen Sensoren korrekt durchgeführt wird. Hierzu wurden verschiedene Wetterumschwünge in zufälliger Ausgestaltung induziert und das Verhalten des fahrerlosen Systems beobachtet. Die Ergebnisse zweier Testläufe sind in Abbildung 57 dargestellt.

Beispiel doppelter Wetterwechsel:



Beispiel dreifacher Wetterwechsel:

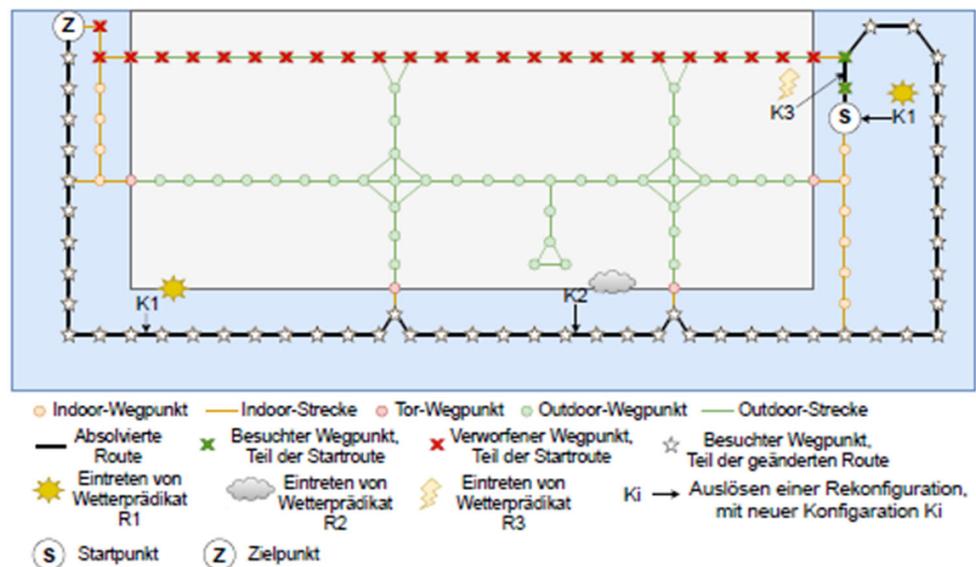


Abbildung 57: Evaluation des Systemverhaltens bei mehreren Wetterwechseln

Auch bei der simulativen Evaluation konnte die korrekte Funktionsweise des holistischen Ansatzes bestätigt werden. Mit den Teilevaluationen der Funktionalitäten wurde so eine ganzheitliche Bestätigung der Funktionsweise des definierten Konzeptes sichergestellt.

5 Verwendung der Zuwendungen

Die Projektbearbeitung erfolgte im Zeitraum von Oktober 2018 bis März 2021, welcher eine sechsmonatige kostenneutrale Laufzeitverlängerung beinhaltet, durch insgesamt fünf wissenschaftliche Mitarbeiter an den beiden Forschungsstellen. Durch Ihr abgeschlossenes Hochschulstudium (M. Sc.) waren die Mitarbeiter der Forschungsstellen als wissenschaftlich-technisches Personal qualifiziert. Aufgrund einer längeren Stellenvakanz an der Forschungsstelle 2 sowie dem Wunsch des Projektbegleitenden Ausschusses, insbesondere die Wetterbedingungen des Winters in die Evaluation einfließen zu lassen, wurde eine entsprechende kostenneutrale Laufzeitverlängerung beantragt.

Entsprechend dem Projektantrag wurden bei der Forschungsstelle 1 24 Personenmonate während der Projektlaufzeit für wissenschaftlich-technisches Personal (A1) aufgewendet. Die 10 Personenmonate für Studentische Hilfskräfte (A3) wurden zur Aufstockung des wissenschaftlich-technischen Personals genutzt. An der Forschungsstelle 2 wurden ebenfalls 24 Personenmonate gemäß dem Antrag für wissenschaftlich-technisches Personal (A1) aufgewendet. Zusätzlich unterstützten an der Forschungsstelle 2 zwei Techniker mit entsprechender Qualifikation das Projekt für insgesamt 14 Personenmonate (A2). Studentische Hilfskräfte waren insgesamt für 4,5 Personenmonate bei der Forschungsstelle 2 an dem Projekt beteiligt (A3).

Die angefallenen Tätigkeiten entsprechen den Arbeitsschwerpunkten der beteiligten Forschungsstellen, wobei die entsprechenden Mitarbeiter gemäß der besten Eignung für die einzelnen Aufgabenpakete eingesetzt wurden. Zu besserer Abstimmung und zur Realisierung des Arbeitspaketes 6 führten die Mitarbeiter die einzelnen Aufgabenpakete in enger Abstimmung untereinander aus. Den wissenschaftlich-technischen Mitarbeitern kamen dabei die Aufgaben der intensiven Recherche kosteneffizienter Sensoren, Analyse der rechtlichen Anforderungen an den fahrerlosen Schlepperbetrieb, die Kommunikation mit Marktteilnehmern in den projektrelevanten Bereichen, die Konzeption der Gesamtlösung sowie die Validierung der Annahmen sowie der Gesamtlösung zu. In der technischen Umsetzung des Konzeptes in der Form des Labor- und Funktionsdemonstrators wurden die wissenschaftlich-technischen Mitarbeiter von den Technikern unterstützt, die den physischen Aufbau betreuten, kosteneffiziente Sensoren in Betrieb nahmen und Vorrichtungen fertigten. Die Hilfskräfte unterstützten bei der Archivierung und Aufbereitung von Messreihen sowie einzelner Funktionstests der kosteneffizienten Sensoren.

Ausgaben für Geräte (B) sowie Leistungen Dritter (C) waren nicht vorgesehen und sind auch im Laufe des Projektes nicht angefallen.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewendeten Ressourcen an beiden Forschungsstellen waren notwendig und angemessen. Sie entsprachen den im Antrag beschriebenen Aufgaben und decken die Vorgaben des Projektantrages in vollem Umfang ab.

Aufgrund der umfangreichen Anforderungen an die Sicherheit fahrerloser Schleppersysteme und die hohen Hürden einer übergangslosen Ortung mit kosteneffizienten Sensoren war eine umfangreiche Analyse der Literatur sowie des Standes der Technik notwendig. Aus der Aufnahme der relevanten Messprinzipien für die Ortung sowie die Absicherung fahrerloser Systeme konnten kosteneffiziente Sensoren identifiziert und evaluiert werden. In Rücksprache mit den Teilnehmern des Projektbegleitenden Ausschuss wurden die Sensoren bezüglich ihrer Eignung evaluiert und in Bezug auf ihre Relevanz für normungsrechtliche Vorgaben bewertet. Parallel wurden die Messprinzipien auf Ihre Eignung für die übergangslose Ortung und Navigation untersucht.

Die dabei aufgedeckten Abhängigkeiten der kosteneffizienten Sensoren von den spezifischen Umweltbedingungen des Einsatzes erforderten die Konzeptionierung einer inhärenten Informationscodierung, um den Einsatz kosteneffizienter Sensoren zielführend zu ermöglichen. Im Rahmen der ganzheitlichen Umgebungsrepräsentation sowie der empirischen Definition von Sensorkonfigurationen konnten eine potentiell sichere Sensorik sowie Lösungen für die Navigation ermittelt und zusammengeführt werden. Die Umsetzung und Evaluation der einzelnen Lösungen wurden in der Folge gegen unterschiedliche Anforderungen durchgeführt und innerhalb eines Labordemonstrators bestätigt. Final bildete die Umsetzung der Ergebnisse der Konzeptionierung und Evaluation kosteneffizienter Sensoren innerhalb eines Funktionsdemonstrators die Möglichkeit der vollständigen Bewertung der Gesamtlösung in verschiedenen Umgebungsszenarien.

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete sowie des Forschungsprojektes wurden den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses in vollem Umfang im Rahmen von Projektbegleitenden Ausschusstreffen und regelmäßigen Berichten kommuniziert und mit ihnen diskutiert. Die Ergebnisse schaffen die Grundlage für einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatz von fahrerlosen Schlepperfahrzeugen unter Verwendung kosteneffizienter Sensoren und Algorithmen für die dynamische Navigation und Lokalisierung in Abhängigkeit der realen Umgebungsbedingungen. Die Betrachtung potentiell sicherer Sensorik eröffnet neue Möglichkeiten der Absicherung von fahrerlosen Schleppern und die zeitnahe Umsetzung marktverfügbarer Systeme.

7 Bewertung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU und ihre Anwendungsmöglichkeiten

Trotz der zunehmenden Anwendung von fahrerlosen Transportsystemen in Unternehmen aller Größenordnungen ist der Einsatz von fahrerlosen Schleppersystemen im hallenübergreifenden Einsatz bei Mischverkehr noch sehr selten zu beobachten. Hohe Kosten für die sicherheitszertifizierten Laserscanner bei gleichzeitigen Einschränkungen durch feste, eingelegte Routen, die nur durch Expertenwissen geändert werden können, machen verfügbare Systeme nur in einzelnen Anwendungsfällen wirtschaftlich sinnvoll. Durch die im Rahmen des Forschungsprojektes identifizierten und evaluierten Konzepte sowie Sensoren in einem potentiell sicheren Gesamtsystem, das in einem breiten Anwendungsfeld getestet wurde, ist der Weg zur Integration einer entsprechenden Schlepperlösung in operativen Bereichen von KMU bereitet. Durch die exemplarische Anwendung von relevanten Normen zur Standardisierung und Fusion der Sicherheits-Sensorik für spezifische Anwendungsfälle wie dem kombinierten In- und Outdoor-Betrieb, ist mit einer signifikanten Degression der Implementierungs- und Inbetriebnahmekosten für Hersteller und Anwender zu rechnen. Vor allem bei KMUs stellen die Projektierungskosten eine Einführungsbarriere dar, da sie sich aufgrund der fehlenden Duplizierung auf weitere Projekte übermäßig in den Gesamtkosten niederschlagen. Durch eine Standardisierung der Systemlösungen aufgrund ausgereifter und getesteter Sensorlösungen, die auf verschiedenen Plattformen integriert werden können, ist bei der Projektierung von autonomen Routenzügen eine Kostenreduktion zu erwarten. Weiterhin ist für KMUs ein Retrofit zur Automatisierung bereits in Betrieb befindlicher manueller Routenzugsysteme von hohem Interesse. Durch die modulare und anwendungsfallbezogene Kombination der Sensorsysteme, unabhängig von der Zielplattform, wird auch diesem Punkt entsprochen. Eine weitere Intention von KMUs zur Automatisierung von Routenzügen im In- und Outdoor-Betrieb ist die Reduzierung von Personalkosten im Bereich der Intralogistik. Vor allem am Hochlohnkostenstandort Deutschland stellt dies einen Wettbewerbsvorteil dar. Es ist zu erwarten, dass sich die durch die Standardisierung zu erwartenden Projektierungs- und Inbetriebnahmekosten aufgrund der sehr geringen laufenden Betriebskosten von fahrerlosen Schleppern zukünftig noch schneller amortisieren werden.

Neben der Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Anwender, eröffnen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zudem wirtschaftliche Entwicklungspotenziale sowohl für die Hersteller von flurgebundenen Transportsystemen als auch für die Hersteller von Sensoren. Aufgrund des modularen und nachrüstbaren Ansatzes der Sicherheits-Sensorik, ist ein Vertrieb der Fahrzeuge und der Sensorapplikationen unabhängig voneinander möglich. Durch die höhere Marktdurchdringung der fahrerlosen Systeme bedingt von den sinkenden Anschaffungskosten vor allem bei KMUs ist mit einer signifikanten Steigerung der Absatzzahlen zu rechnen. Die exemplarische Anwendung der relevanten Normen für die Fusion unterschiedlicher Sensoren für die Navigation und Sicherheit von fahrerlosen Schleppern in spezifischen Anwendungsfeldern bedingt zudem eine Standardisierung der Schnittstelle zwischen der Sensorik

7 Bewertung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU und ihre Anwendungsmöglichkeiten

und der applizierten Plattform. Aufgrund der Verwendung von standardisierten Schnittstellen sind getestete Sensorlösungen auf unterschiedlichen Zielfahrzeugen anwendbar. Die damit verbundene Stückzahlsteigerung mit reduziertem Engineering-Anteil führt zu einer Degression der Sensor- und Entwicklungskosten. Hierdurch werden die Markteintrittsbarrieren für den Bereich kosteneffizienter Sensoren vor allem für KMUs reduziert. Durch die Anwendung relevanter Normen wurde gezeigt, dass die Sicherheitsfunktion eines fahrerlosen Schleppersystems auch durch die Fusion unterschiedlicher Sensoren realisiert werden kann. Dies ermöglicht insbesondere KMU den Einstieg in diesen Markt als Teilkomponentenanbieter. Zudem ermöglicht die Fusion den Einstieg von Systemintegratoren in den Markt der anwendungsbezogenen Konfiguration unterschiedlicher Sensoren und Methoden für die übergangslose Ortung.

Der Transfer der Ergebnisse dieses Forschungsprojektes in andere Kategorien der fahrerlosen Transportsysteme ist ohne großen Aufwand realisierbar. Selbst Teillösungen, wie die Nutzung eines knotenbasierten Ansatzes zu Umgebungsrepräsentation und inhärenten Informationscodierung lassen sich problemlos auf andere Bereiche übertragen. Denkbar wären hier auch Gabelstapler, Reinigungsfahrzeuge oder fahrerlose Personenbeförderungssysteme. Die Nutzung des Robot Operating Systems als industrieweit anerkanntes Robotik-Framework stellt die Transferbarkeit der einzelnen Funktionen uneingeschränkt sicher.

Kleine und mittlere Unternehmen als Anwender von fahrerlosen Schleppersystemen werden durch die Potentiale kosteneffizienter Sensoren sowie deren Fusion unabhängig von einzelnen Herstellern spezifischer Sicherheitssensoren, was ebenfalls zu sinkenden Preisen und weiteren wirtschaftlichen Anwendungsfeldern führt. Die breite Anwenderbasis im projektbegleitenden Ausschuss bestätigt das Interesse von Unternehmen aller Größenordnungen an entsprechenden Lösungen für die kosteneffiziente Intralogistik mit Schleppersystemen.

Einhergehend mit den oben genannten Optimierungspotentialen leisten die Ergebnisse des Forschungsprojektes einen Beitrag zur Erreichung volkswirtschaftlicher und gesellschaftlicher Ziele. Durch die verbesserte, bedarfsgerechtere Vernetzung der Produktionsschritte können Einsparungen im Ressourcenverbrauch und Energieeinsatz für die Transporte erzielt werden, insbesondere im Vergleich zu Individualtransporten in der Intralogistik. Die Möglichkeit, vorhandene Routenzugsysteme mit geeigneter Sensorik zu automatisieren reduziert die Aufwände bei einer flächendeckenden Einführung und kommt somit dem verantwortungsvollen Einsatz von Ressourcen zugute. Ebenso wirkt sich der Fokus des Forschungsprojektes auf größtenteils infrastrukturlose Sensorik positiv auf den Ressourceneinsatz aus.

8 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Der Transfer der im Projekt erzielten Ergebnisse erfolgte bereits teilweise zur Laufzeit des Forschungsprojektes und wurde sowohl mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschuss als auch der Öffentlichkeit präsentiert und diskutiert. Die Transferstrategie fokussierte sich dabei auf regelmäßige Zwischenberichte über den Fortschritt des Projektes sowie bilaterale Treffen zwischen den Forschungseinrichtungen und beteiligten Unternehmen. Im Rahmend er vier Projektbegleitenden Ausschusstreffen wurden die einzelnen Themenschwerpunkte detailliert vorgestellt und intensiv mit den Projektbegleitenden Ausschuss diskutiert. Der Fokus lag dabei stets auf der Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse in einem industrienahen Kontext. Der folgende Abschnitt 8.1 beinhaltet eine detaillierte Darstellung der Transfermaßnahmen, die bereits zur Projektlaufzeit durchgeführt wurden, während der Abschnitt 8.2 die aktuell in Umsetzung befindlichen Maßnahmen aufführt.

8.1 Transfermaßnahmen in der Laufzeit des Forschungsprojektes

Während der Projektlaufzeit wurden bereits folgende Maßnahmen für den Transfer und die Diskussion der Ergebnisse durchgeführt:

Tabelle 18: Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Projektes

Maßnahmen	Ziele	Rahmen / Inhalt	Zeitraum
Kurzbericht	Kurzinformation für alle Intralogistik-Unternehmen, hier werden alle KMU der Intralogistik-Branche erreicht.	Während der Laufzeit werden den beteiligten Unternehmen die jeweiligen Zwischenergebnisse als Kurzbericht zur Verfügung gestellt.	<ul style="list-style-type: none"> • März 2019 • Mai 2019 • August 2019 • Februar 2020 • Dezember 2020
Beratungsgespräche	Unternehmensspezifische Informationen für alle interessierten Unternehmen, insbesondere KMU	Persönliche detaillierte Beratung von Intralogistik-Unternehmen zum aktuellen Stand des Forschungsprojektes	fortlaufend auf Anfrage und initiativ
Teilnahme an Vortragsveranstaltungen	Informationen für die Fachöffentlichkeit	Beitrag über die aktuellen Forschungsergebnisse <ul style="list-style-type: none"> • auf der 26th CIRP Life Cycle Engineering Conference • im Rahmen des FAPS Alumni Networking Events 2019 • auf der 30th CIRP Conference on Design • auf dem Kongress der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik • auf der digitalen Netzwerkveranstaltung des BayWISS_Kollegs Mobilität und Verkehr 	Mai 2019 Oktober 2019 Mai 2020 September 2020 November 2020

Maßnahmen	Ziele	Rahmen / Inhalt	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Fortlaufende Information des PA über die Forschungsergebnisse und Lenkung des weiteren Projektfortschritts	Vorstellung der Untersuchungsergebnisse und Abgleich mit den Belangen der Produktionspraxis	<ul style="list-style-type: none"> • Feb 2019 • September 2019 • Mai 2020 • März 2021
Proaktive Ansprache interessierter Unternehmen außerhalb des PA	Verbreitung des Projektfortschritts in der Intralogistik-Branche, insbesondere KMU	Direkte Kontaktaufnahme zu Sensor- und Fahrzeughersteller im Rahmen verschiedener Branchenveranstaltungen	fortlaufend
Lehrtätigkeit an Hochschulen	Ergebnistransfer in die Lehre	Diverse Vorlesungen an der THI und der FAU	seit WS 2018 in Lehre aufgenommen
Sitzungen des Wissenschaftlichen Beirats der IFL	Ergebnisdiskussion und Evaluation im Expertenkreis der IFL	Statusbericht und Ergebnisdiskussion mit weiteren forschenden Stellen	fortlaufend
Veröffentlichung des Projektes auf der Website der Forschungseinrichtung	Information interessierter Unternehmen	Während der Laufzeit wurden die Inhalte und Ziele des Projektes auf der Homepage der IFL veröffentlicht	April 2020

Im Rahmen der Forschung wurden zudem im Zeitraum des Forschungsprojektes die folgenden Fachartikel veröffentlicht:

- Michael Scholz, Maximilian Zwingel, Peter Schuderer, Jörg Franke, Sustainable Intralogistics due to Uniform Software and Modular Transport Entities, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.033>.
- Michael Scholz, Jan Steinkamp, Maximilian Zwingel, Florian Hefner, Jörg Franke, Distributed Camera Architecture for Seamless Detection and Tracking of Dynamic Obstacles <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.186>
- Maximilian Zwingel, Meike Herbert, Markus Lieret, Peter Schuderer, Jörg Franke, An Economic Solution for Localization of Autonomous Tow Trucks in a Mixed Indoor and Outdoor Environment Using a Node Based Approach https://doi.org/10.1007/978-3-662-62138-7_46

8.2 Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Nach dem Abschluss des Vorhabens sind weitere Transfermaßnahmen geplant. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 19: Geplante Transfermaßnahmen nach Abschluss des Projektes

Maßnahmen	Ziele	Rahmen / Inhalt	Zeitraum
Ausführlicher praxisnaher Forschungsbericht, Fachbrochure	Detaillierte Information der Intralogistikbranche sowie der gesamten Fachöffentlichkeit	Forschungsbericht für alle interessierten Kreise	aktuell
Homepage der Forschungseinrichtungen	Informationen für die Fachöffentlichkeit	Beitrag zum Forschungsprojekt	aktuell
Beratung der Industrie einschließlich Demonstration der Forschungsergebnisse	Maßgeschneiderter Transfer der Forschungsberichte	Persönliche, detaillierte Beratung von Intralogistik-Unternehmen, auch für alle KMU	aktuell
FAPS-IPC Seminare	Ergebnistransfer in produzierende Unternehmen, vor allem KMU	Darstellung der Forschungsergebnisse anhand von Vorträgen und Demonstratoren	Juli 2021
Veröffentlichungen	Informationen für die Fachöffentlichkeit	Beitrag über die Forschungsergebnisse: <ul style="list-style-type: none"> • auf dem Kongress der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik • auf der 2nd Conference on Production Systems and Logistics 	September 2021 August 2021

9 Zusammenfassung und abschließende Bewertung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein ganzheitliches Konzept für den sicheren Einsatz fahrerloser Schlepper im hallenübergreifenden Kontext unter Verwendung kosteneffizienter Sensoren erforscht und als modulares Gesamtsystem exemplarisch umgesetzt. Die einzelnen Domänen einer vollständigen Digitalisierung der Einsatzumgebung, der übergangslosen Navigation und Ortung sowie der Absicherung fahrerloser Schlepper greifen dabei ziel führend ineinander und lassen sich dennoch modular oder gesamt auf bestehende und neue Schleppersysteme übertragen. Durch die Verwendung von verfügbaren und dokumentierten Schnittstellen sowie industrieweit anerkannter Software ist dabei eine Einbindung in Systeme sowie eine Modifikation mit geringem Aufwand und auch ohne vertieftes Fachwissen möglich.

Entsprechende Sensorkonzepte sowie Ansätze für die Fusion der einzelnen Sensoren wurden unter den Aspekten der Ortung, Navigation und Sicherheit des Systems betrachtet und in Abhängigkeit Ihrer Beeinflussung durch Umgebungsparameter für verschieden Anwendungsszenarien qualifiziert.

Die Nutzung von inhärenten Informationen der Einsatzumgebung ermöglicht ein optimales Systemverhalten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fähigkeiten von fahrerlosen Schleppern sowie der Sensoren für die Umgebungsperzeption. Mit der Beachtung der aktuellen Umgebungsbedingungen ergibt sich ebenfalls das Potential der intelligenten Sensordatenfusion für die Datenquellen der Ortung und Absicherung der Fahrzeuge. Anwendungsbezogene Normen ermöglichen dabei die Zertifizierung der Fusion der unterschiedlichen Sensoren als gemeinsames Sicherheitssystem im spezifischen Einsatzszenario.

Durch die enge Abstimmung mit den Teilnehmern des Projektbegleitenden Ausschusses sowie weiteren Unternehmen aus dem Umfeld der sicherheitszertifizierten Sensorik und dem autonomen Fahren werden sich die Erkenntnisse des Forschungsprojektes potentiell bald in anwendungsnahen Entwicklungen deutscher Unternehmen wiederfinden. Die detaillierte Ausarbeitung der Ergebnisse sowie die Veröffentlichung der relevanten Aspekte in entsprechenden Fachzeitschriften ermöglichen die weitere Diskussion und beständige Verbesserung der gewählten Ansätze. Nach der Einschätzung der beteiligten Forschungseinrichtungen sowie der beteiligten Praxispartner wurden die Ziele des Forschungsvorhabens somit vollständig erreicht.

10 Literatur

- [1] IFR statistical department: *World Robotics : Service Robots*. URL <https://ifr.org/worldrobotics/>
- [2] ULLRICH, G. ; ALBRECHT, T.: *Fahrerlose Transportsysteme*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019
- [3] SCHOLZ, M.: *Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten*. FAU University Press. 2019
- [4] VDI-Richtlinie 2510. 2005. *Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*
- [5] VDI-Richtlinie 4451 (Blatt 6). 2003. *Sensorik für Navigation und Steuerung*
- [6] STACHNISS, C. ; LEONARD, J. J. ; THRUN, S.: Simultaneous Localization and Mapping. In: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Cham : Springer International Publishing, 2016, S. 1153–1176
- [7] FISCHLER, M. A. ; BOLLES, R. C.: *Random sample consensus*. In: *Communications of the ACM* 24 (1981), Nr. 6, S. 381–395
- [8] Zekavat (Hrsg.); Reza (Hrsg.); Buehrer (Hrsg.); MICHAEL, R. (Hrsg.); BUEHRER, R. M. (Hrsg.); ZEKAVAT, S. A. (Hrsg.): *Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances : Theory, practice and advances*. Hoboken, New Jersey, [Piscataway, New Jersey] : Wiley-IEEE Press; IEEE Xplore, 2019 (IEEE Press series on digital & mobile communication)
- [9] SIEGWART, R. ; NOURBAKHSH, I. R. ; SCARAMUZZA, D.: *Introduction to autonomous mobile robots*. 2nd ed. Cambridge Mass. : MIT Press, 2011 (Intelligent robotics and autonomous agents)
- [10] MAUTZ, R.: *Indoor Positioning Technologies* : ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2012 (Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz)
- [11] SICILIANO, B. (Hrsg.); KHATIB, O. (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Cham : Springer International Publishing, 2016
- [12] LIU, S. ; TANG, J. ; GAUDIOT, J.-L. ; LI, L. ; WU, S.: *Creating autonomous vehicle systems*. San Rafael, California : Morgan & Claypool Publishers, 2018 (Synthesis lectures on computer science)
- [13] THRUN, S. ; BURGARD, W. ; FOX, D.: *Probabilistic Robotics*. Cambridge, Massachusetts, London, England : MIT Press, 2005 (Intelligent robotics and autonomous agents series)
- [14] KUBELKA, V. ; OSWALD, L. ; POMERLEAU, F. ; COLAS, F. ; SVOBODA, T. ; REINSTEIN, M.: *Robust Data Fusion of Multimodal Sensory Information for Mobile Robots*. In: *Journal of Field Robotics* 32 (2015), Nr. 4, S. 447–473
- [15] WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); LOTZ, F. (Hrsg.); SINGER, C. (Hrsg.): *Handbook of Driver Assistance Systems : Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort*. Cham, s.l. : Springer International Publishing, 2016
- [16] WEISS, S. ; ACHELNIK, M. W. ; CHLI, M. ; SIEGWART, R.: Versatile distributed pose estimation and sensor self-calibration for an autonomous MAV. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2012 : 14 - 18 May 2012, Saint Paul, Minnesota, USA*. Piscataway, NJ : IEEE, 2012, S. 31–38

- [17] HAYKIN, S. S.: *Kalman Filtering and Neural Networks*. Hoboken : Wiley, 2004 (Adaptive and Learning Systems for Signal Processing, Communications and Control Series v. 47)
- [18] Tourneret Jean-Yves ; Anne-Christine Escher ; Arnaud Doucet ; Audrey Giremus: *Signal Processing Conference, 2004 12th European : Nonlinear filtering approaches for GPS/INS integration*. Piscataway, NJ : IEEE, 2004
- [19] MATTERN, N. ; SCHUBERT, R. ; WANIELIK, G.: High-accurate vehicle localization using digital maps and coherency images. In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium : IV ; 21 - 24 June 2010, University of California, San Diego, CA, USA*. Piscataway, NJ : IEEE, 2010, S. 462–469
- [20] LEVINSON, J. ; THRUN, S.: Robust vehicle localization in urban environments using probabilistic maps. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010 : 3 - 7 [i.e. 3 - 8] May 2010, Anchorage, Alaska, USA*. Piscataway, NJ : IEEE, 2010, S. 4372–4378
- [21] GUSTAFSSON, F.: *Particle Filter Theory and Practice with Positioning Applications* (2010)
- [22] MAHMOUD, I. I. ; SALAMA, M. ; EL TAWAB, A. A.: *Particle/Kalman Filter for Efficient Robot Localization*. In: *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), Vol. 106* (2014)
- [23] RIGATOS, G. G.: *Extended Kalman and Particle Filtering for sensor fusion in motion control of mobile robots*. In: *Mathematics and Computers in Simulation* 81 (2010), Nr. 3, S. 590–607
- [24] RIDOLFI, M. ; VANDERMEEREN, S. ; DEFRAÏE, J. ; STEENDAM, H. ; GERLO, J. ; CLERCQ, D. de ; HOEBEKE, J. ; POORTER, E. de: *Experimental Evaluation of UWB Indoor Positioning for Sport Postures*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18 (2018), Nr. 1
- [25] CHAO, H. ; COOPMANS, C. ; DI, L. ; CHEN, Y.: A comparative evaluation of low-cost IMUs for unmanned autonomous systems. In: *2010 IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration : IEEE, 2010 - 2010*, S. 211–216
- [26] TAVLI, B. ; BICAKCI, K. ; ZILAN, R. ; BARCELO-ORDINAS, J. M.: *A survey of visual sensor network platforms*. In: *Multimedia Tools and Applications* 60 (2012), Nr. 3, S. 689–726
- [27] WIELGOCKA, N. ; HADAS, T. ; KACZMAREK, A. ; MARUT, G.: *Feasibility of Using Low-Cost Dual-Frequency GNSS Receivers for Land Surveying*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 21 (2021), Nr. 6
- [28] STEINBAECK, J. ; STEGER, C. ; HOLWEG, G. ; DRUML, N.: Next generation radar sensors in automotive sensor fusion systems. In: *2017 Sensor Data Fusion: Trends, Solutions, Applications (SDF) : IEEE, 2017 - 2017*, S. 1–6
- [29] JEONG, N. ; HWANG, H. ; MATSON, E. T.: Evaluation of low-cost LiDAR sensor for application in indoor UAV navigation. In: *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS) : IEEE, 2018 - 2018*, S. 1–5
- [30] SHIN, S. ; PARK, S. ; KIM, Y. ; MATSON, E. T.: *Design and Analysis of Cost-Efficient Sensor Deployment for Tracking Small UAS with Agent-Based Modeling*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 16 (2016), Nr. 4
- [31] XU, Q. ; LI, X. ; LI, B. ; SONG, X. ; CAI, Z.: *A Reliable Hybrid Positioning Methodology for Land Vehicles Using Low-Cost Sensors*. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17 (2016), Nr. 3, S. 834–847
- [32] PROCTOR, A. A. ; JOHNSON, E. N. ; APKER, T. B.: *Vision-only control and guidance for aircraft*. In: *Journal of Field Robotics* 23 (2006), Nr. 10, S. 863–890

- [33] GONZALEZ, R. ; DABOVE, P.: *Performance Assessment of an Ultra Low-Cost Inertial Measurement Unit for Ground Vehicle Navigation*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 19 (2019), Nr. 18
- [34] BARBERA, H. M. ; QUINONERO, J.P.C. ; IZQUIERDO, M.A.Z. ; SKARMETA, A. G.: i-Fork: a flexible AGV system using topological and grid maps. In: *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)* : IEEE, 2003, S. 2147–2152
- [35] DIJKSTRA, E. W.: *A note on two problems in connexion with graphs*. In: *Numerische Mathematik* 1 (1959), Nr. 1, S. 269–271
- [36] GOLDBERG, A. V. ; HARRELSON, C.: Computing the Shortest Path: A Search Meets Graph Theory. In: *Proceedings of the Sixteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. USA : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005 (SODA '05), S. 156–165
- [37] DELLING, D. ; NANNICINI, G.: *Core Routing on Dynamic Time-Dependent Road Networks*. In: *INFORMS Journal on Computing* 24 (2012), Nr. 2, S. 187–201
- [38] DELLING, D.: *Time-Dependent SHARC-Routing*. In: *Algorithmica* 60 (2011), Nr. 1, S. 60–94
- [39] Barbara Eisenhut: *Draußen und allein unterwegs : "Schiller Automatisierungstechnik" stellt Outdoor-Routenzug vor - Neuer Standort in Metten*. In: *Heimatswirtschaft* (2020-07-07), Nr. 154, S. 7
- [40] easy mile: *Safety Report*. URL https://easymile.com/sites/default/files/easymile_safety_report.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-19
- [41] URMSON, C. ; ANHALT, J. ; BAGNELL, D. ; BAKER, C. ; BITTNER, R. ; CLARK, M. N. ; DOLAN, J. ; DUGGINS, D. ; GALATALI, T. ; GEYER, C. ; GITTLEMAN, M. ; HARBAUGH, S. ; HEBERT, M. ; HOWARD, T. M. ; KOLSKI, S. ; KELLY, A. ; LIKHACHEV, M. ; MCNAUGHTON, M. ; MILLER, N. ; PETERSON, K. ; PILNICK, B. ; RAJKUMAR, R. ; RYBSKI, P. ; SALESKY, B. ; SEO, Y.-W. ; SINGH, S. ; SNIDER, J. ; STENTZ, A. ; WHITTAKER, W. "R." ; WOLKOWICKI, Z. ; ZIGLAR, J. ; BAE, H. ; BROWN, T. ; DEMITRISH, D. ; LITKOUHI, B. ; NICKOLAOU, J. ; SADEKAR, V. ; ZHANG, W. ; STRUBLE, J. ; TAYLOR, M. ; DARMS, M. ; FERGUSON, D.: *Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge*. In: *Journal of Field Robotics* 25 (2008), Nr. 8, S. 425–466
- [42] MORAS, J. ; RODRIGUEZ, F. S. A. ; DREVELLE, V. ; DHERBOMEZ, G. ; CHERFAOUI, V. ; BONNIFAIT, P.: Drivable space characterization using automotive lidar and georeferenced map information. In: *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium* : IEEE, 2012 - 2012, S. 778–783
- [43] JASIOBEDZKI, P.: Detecting driveable floor regions. In: *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots* : IEEE Comput. Soc. Press, 1995, S. 264–270
- [44] BAGLOEE, S. A. ; TAVANA, M. ; ASADI, M. ; OLIVER, T.: *Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies*. In: *Journal of Modern Transportation* 24 (2016), Nr. 4, S. 284–303
- [45] Deutsche Norm DIN EN ISO 3691-4. November 2020. *Flurförderzeuge – Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung – Teil 4: Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme (ISO 3691-4:2020); Deutsche Fassung EN ISO 3691-4:2020*
- [46] VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: *Fahrerlose Transportsysteme - Leitfaden Sicherheit*. URL <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/fahrerlose-transportssysteme-leitfaden-sicherheit>

- [47]VDI-Richtlinie 2510 Blatt 2. 2020. *Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*
- [48]FRANKE, U. ; PFEIFFER, D. ; RABE, C. ; KNOEPEL, C. ; ENZWEILER, M. ; STEIN, F. ; HERRTWICH, R. G.: Making Bertha See. In: *2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops* : IEEE, 2013 - 2013, S. 214–221
- [49]DICKMANN, J. ; APPENRODT, N. ; BLOECHER, H.-L. ; BRENK, C. ; HACKBARTH, T. ; HAHN, M. ; KLAPPSTEIN, J. ; MUNTZINGER, M. ; SAILER, A.: Radar contribution to highly automated driving. In: *2014 44th European Microwave Conference* : IEEE, 2014 - 2014, S. 1715–1718
- [50]IFOY: *Nominierungen 2020 : TractEasy EasyMile*. URL <https://www.ifoyn.org/ifoyn-2020/nominierungen-2020/tracteasy>
- [51]ZWINGEL, M. ; HERBERT, M. ; LIERET, M. ; SCHUDERER, P. ; FRANKE, J.: An Economic Solution for Localization of Autonomous Tow Trucks in a Mixed Indoor and Outdoor Environment Using a Node Based Approach. In: BEHRENS, B.-A.; BROSIUS, A.; HINTZE, W.; IHLENFELDT, S.; WULFSBERG, J. P. (Hrsg.): *Production at the leading edge of technology*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2021 (Lecture Notes in Production Engineering), S. 457–466
- [52]LINDE MATERIAL HANDLING GMBH: *Betriebsanleitung Linde P30 und P50*. Aschaffenburg, 2017
- [53]*DIN 33402-2:2020-12, Ergonomie_ - Körpermaße des Menschen_ - Teil_2: Werte*
- [54]RALPH-CHRISTOPH, W. ; BELLENBERG, M.: *Robotino Manual*. URL https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/544305_robotino_deen2.pdf
- [55]Mohamed Oubbati: *Einführung in die Robotik*. URL https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/iui.inst.130/Mitarbeiter/oubbati/RobotikWS1113/OubbatiS_kript.pdf
- [56]u-blox AG: *NEO-M8 data sheet : u-blox M8 concurrent GNSS modules*. URL https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_%28UBX-15031086%29.pdf – Überprüfungsdatum 2020-06-13
- [57]Decawave Ltd.: *DWM1001 Firmware User Guide : Based on DWM1001-DEV board*. URL https://www.decawave.com/sites/default/files/dwm1001_firmware_user_guide.pdf – Überprüfungsdatum 2020-06-13
- [58]Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A1.8. November 2012. *Verkehrswege*
- [59]Deutsche Norm DIN EN ISO 13849-1. August 2020. *Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO/DIS 13849-1:2020); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 13849-1:2020*
- [60]DGUV *Information 208-057 : Einsatz von Schleppern und Anhängern als Routenzüge*. Berlin, 2020
- [61]Deutsche Norm DIN EN IEC 61496-3 (VDE 0113-203). Oktober 2019. *Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 3: Besondere Anforderungen an aktive optoelektronische diffuse Reflexion nutzende Schutzeinrichtungen (AOPDDR) (IEC 61496-3:2018); Deutsche Fassung EN IEC 61496-3:2019*
- [62]Technical Specification IEC TS 62998. Mai 2019. *Safety of machinery – Safety-related sensors used for the protection of persons*
- [63]Deutsche Norm DIN ISO 6292. Oktober 2013. *Kraftbetriebene Flurförderzeuge und Schlepper – Bremsleistung und Komponentenfestigkeit (ISO 6292:2008)*

- [64]Deutsche Norm DIN 60721-3-5. Juni 1998. *Klassifizierung von Umweltbedingungen Teil 3: Klassen von Umwelteinflußgrößen und deren Grenzwerte Hauptabschnitt 5: Einsatz an und in Landfahrzeugen (IEC 60721-3-5 : 1997) Deutsche Fassung EN 60721-3-5 : 1997*
- [65]Technischer Bericht DIN CEN ISO/TR 7250-2 DIN SPEC 91279. August 2013. *Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung – Teil 2: Anthropometrische Datenbanken einzelner nationaler Bevölkerungen (ISO/TR 7250-2:2010 + Amd 1:2013); Deutsche Fassung CEN ISO/TR 7250-2:2011 + A1:2013*
- [66]NEUHAUSER, H. ; SCHIENKIEWITZ, A. ; ROSARIO, A. S. ; DORTSCHY, R. ; KURTH, B.-M.; ELLERT, U. (Mitarb.); STOLZENBERG, H. (Mitarb.) : *Referenzperzentile für anthropometrische Maßzahlen und Blutdruck aus der Studie zur Gesundheit von Kindern und Jugendlichen in Deutschland (KIGGS)*. 2. erweiterte Auflage. Berlin, 2013 (Gesundheitsberichterstattung des Bundes)
- [67]VDI-Richtlinie 5586 Blatt 2. 2016. *Routenzugsysteme*
- [68]KT-elektronic: *Ultraschall Messmodul HC-SR04*. URL https://www.mikrocontroller.net/attachment/218122/HC-SR04_ultraschallmodul_beschreibung_3.pdf – Überprüfungsdatum 2021-03-24
- [69]NOLL, M. ; RAPPS, P.: Ultraschallsensorik. In: WINNER, H.; HAKULI, S.; LOTZ, F.; SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme : Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 243–258
- [70]SELLEN, M. ; MÁGORI, V. ; ECCARDT, P.-C. ; HÖFLER, H. ; KÜGEL, H. ; ERNST, A. ; GIEL, D. M.: Weg- und Winkelsensoren. In: TRÄNKLER, H.-R.; REINDL, L. (Hrsg.): *Sensortechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014 (VDI-Buch), S. 573–724
- [71]STMICROELECTRONICS: *VL53L0X : World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor*. Datasheet - production data. o. O., 2018. – Datasheet - production data
- [72]GOTZIG, H. ; GEDULD, G.: LIDAR-Sensorik. In: WINNER, H.; HAKULI, S.; LOTZ, F.; SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme : Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 317–334
- [73]SHANGAI SLAMTEC.CO.,LTD: *RPLIDAR A2 : Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner Introduction and Datasheet*. Model: A2M5 A2M6. Shanghai, 2016. – Model: A2M5 A2M6
- [74]Open Source Robotics Foundation: *Gazebo : Robot simulation made easy*. URL <http://gazebosim.org/> – Überprüfungsdatum 2021-04-12
- [75]Anna Konrad: *Simulation of Mobile Robots with Unity and ROS : A Case-Study and a Comparison with Gazebo*. Degree Project for Master of Science with Specialization in Robotics and Automation. Trollhättan, 2019. – Degree Project for Master of Science with Specialization in Robotics and Automation
- [76]NVIDIA Developer: *NVIDIA Isaac SDK*. URL <https://developer.nvidia.com/isaac-sdk> – Überprüfungsdatum 2021-04-12
- [77]The MathWorks, Inc.: *Automated Driving Toolbox : Entwicklung, Simulation und Test von ADAS und autonomen Fahrsystemen*. URL <https://de.mathworks.com/products/automated-driving.html> – Überprüfungsdatum 2021-04-12
- [78]Fabian Müller: *Modellierung der Sensorabdeckung autonomer Fahrzeuge zur Berechnung optimaler Annäherungspfade : Sensor coverage modeling of autonomous vehicles to calculate optimal approach paths*. Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

- Master of Science (M.Sc.) an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München. München, 2018. – Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades Master of Science (M.Sc.) an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München
- [79]ZEMAX LLC: *Optic Studio : Everything you need to design optical systems*. URL <https://www.zemax.com/products/opticstudio> – Überprüfungsdatum 2021-04-12
- [80]CONSANI, C. ; DRUML, N. ; DIELACHER, M. ; BAUMGART, M.: *Fog Effects on Time-of-Flight Imaging Investigated by Ray-Tracing Simulations*. In: *Proceedings 2* (2018), Nr. 13. URL https://www.researchgate.net/publication/329290951_Fog_Effects_on_Time-of-Flight_Imaging_Investigated_by_Ray-Tracing_Simulations – Überprüfungsdatum 2021-04-12
- [81]Analog Devices, Inc.: *LTspice*. URL <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#> – Überprüfungsdatum 2021-04-12
- [82]HAKULI, S. ; KRUG, M.: Virtuelle Integration. In: WINNER, H.; HAKULI, S.; LOTZ, F.; SINGER, C. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme : Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 125–138
- [83]Deutsche Norm DIN EN ISO 13856-3. Dezember 2013. *Sicherheit von Maschinen – Druckempfindliche Schutzeinrichtungen – Teil 3: Allgemeine Leitsätze für die Gestaltung und Prüfung von Schaltpuffern, Schaltflächen, Schaltleinen und ähnlichen Einrichtungen (ISO 13856-3:2013); Deutsche Fassung EN ISO 13856-3:2013*
- [84]Inter IKEA Systems B.V.: *DITTE : Meterware, schwarz, 140 cm*. URL <https://www.ikea.com/de/de/p/ditte-meterware-schwarz-33080380/> – Überprüfungsdatum 2021-04-12
- [85]ABDALLAH, M.: *Konzeption, Umsetzung und Validierung einer hardwarenahen Kollisionsabsicherung für autonome Routenzüge auf Basis von kosteneffizienten Sensoren*. Bachelorarbeit. Erlangen, 2021. – Bachelorarbeit
- [86]MENG, Q. ; YAO, F. ; WU, Y.: Review of Crosstalk Elimination Methods for Ultrasonic Range Systems in Mobile Robots. In: *2006 IEEE/Rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, S. 1164–1169
- [87]OSRAM GMBH: *DULUX F 24 W/840 2G10 : OSRAM DULUX F | Fläche KLLni, 2 Rohre, mit 4pol. Stecksocket für Betrieb am EVG/KVG*. Produktdatenblatt. München, 2021. – Produktdatenblatt
- [88]pgRouting Contributors: *pgRouting*. URL <https://pgrouting.org/>
- [89]SCHOLZ, M. ; ZWINGEL, M. ; SCHUDERER, P. ; FRANKE, J.: *Sustainable Intralogistics due to Uniform Software and Modular Transport Entities*. In: *Procedia CIRP 80* (2019), S. 239–244
- [90]Roesmann Christoph ; Feiten Wendelin ; Woesch Thomas ; Hoffmann Frank ; Bertram Torsten: Trajectory modification considering dynamic constraints of autonomous robots. In: *ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics*, 2012, S. 1–6
- [91]HORNING, A. ; WURM, K. M. ; BENNEWITZ, M. ; STACHNISS, C. ; BURGARD, W.: *OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees*. In: *Autonomous Robots 34* (2013), Nr. 3, S. 189–206
- [92]EITAN MARDER-EPPSTEIN, S. C.: *carrot_planner*. URL http://wiki.ros.org/carrot_planner
- [93]M. Herbert, M. Zwingel, C. Czapka and J. Franke: *A multi-source localization system for driverless material transport in mixed indoor and outdoor areas: A multi-source localization system for driverless material transport in mixed indoor and outdoor areas*