

Schlussbericht vom 29.07.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 22234 N

1 Thema

Entwicklung und Evaluation eines Interaktionsbaukastens für Logistikeroboter (RoboLingo Baukasten)

2 Berichtszeitraum

01.02.2022–30.04.2024

3 Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., Schlachte 31, 28195 Bremen

4 Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1: Technische Universität München
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)
Boltzmannstraße 15
85748 Garching

Forschungseinrichtung 2: Technische Universität München
Lehrstuhl für Ergonomie
Boltzmannstraße 15
85748 Garching

Gefördert durch:

Inhalt

1	Thema	1
2	Berichtszeitraum	1
3	Forschungsvereinigung	1
4	Forschungseinrichtung(en)	1
1	Einleitung	4
1.1	Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung	4
1.2	Zielsetzung des Projekts	5
1.3	Methodik und Lösungsweg	7
2	Technische Grundlagen	8
2.1	Relevante Systeme und Prozesse der Intralogistik	8
2.1.1	Fahrerlose Transportsysteme	8
2.1.2	Prozesse mit Mensch-Maschine-Interaktion	9
2.2	Modalitäten der Mensch-Maschine-Interaktion	10
2.2.1	Hilfsmittel zum Empfangen von Informationen durch einen Roboter	12
2.2.2	Hilfsmittel zur Informationsübertragung vom Roboter zum Menschen	12
2.2.3	Hilfsmittel zur Kommunikation mit Beteiligung der Infrastruktur	14
2.3	Andere Kommunikationsbaukästen	15
3	Aufstellung einer Ontologie für Interaktionssituationen mobiler Roboter	18
3.1	Interaktionssituationen zwischen mobilen Robotern und Menschen	19
3.1.1	Interaktionen mit hoher Priorität	19
3.1.2	Interaktionen mit niedriger Priorität	19
3.2	Mögliche Zustände und Aktivitäten mobiler Roboter	20
3.3	Ontologie von Interaktionssituationen	20
4	Entwicklung des Interaktions-Baukastens	23
4.1	Kommunikation der zukünftigen Trajektorie (explizit / implizit)	23
4.1.1	Vorversuche	23
4.1.2	Aufbau der Probandenstudie	24
4.1.3	Ergebnisse	26
4.1.4	Diskussion	27
4.2	Kommunikation besonderer Zustände	28
4.3	Kommunikation sicherheitsrelevanter Zustände	32
4.4	Akustische Signale für verschiedene Interaktionen	34
4.4.1	Durchführung der Onlinebefragung	34
4.4.2	Ergebnisse der Onlineumfrage	35

4.4.3	Validierung der Umfrageergebnisse mit Domänenexperten.....	37
4.5	Kommunikation von Schutzfeldverletzungen.....	37
4.5.1	Methodik	38
4.5.2	Ergebnisse.....	40
4.5.3	Diskussion	42
4.6	Fusion zum RoboLingo Interaktionsbaukasten	43
4.6.1	Übersicht Kommunikationsmittel	44
4.6.2	Signale der einzelnen Intentionen	45
5	Evaluierung des Baukastens.....	51
5.1	Vorgehen	52
5.2	Ergebnisse.....	53
5.2.1	Übersicht	53
5.2.2	Einzelne Intentionen	56
5.3	Diskussion	62
5.4	Finaler Baukasten.....	67
6	Handlungsempfehlungen zum Einsatz des Baukastens.....	68
6.1	Erkenntnisse aus Evaluierung	68
6.2	Erkenntnisse aus Experten-Workshops (PAs)	69
7	Fazit und Ausblick	70
7.1	Abgleich von Anforderungen und Ergebnissen	70
7.2	Ausblick	71
8	Ressourcenverwendung und Ergebnistransfer	72
8.1	Verwendung der zugewendeten Mittel	72
8.1.1	Wissenschaftlich-technisches Personal und studentische Hilfskräfte (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans).....	72
8.1.2	Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)	73
8.1.3	Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans).....	73
8.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	73
8.3	Weiterer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	73
8.4	Veröffentlichungen.....	76
8.5	Studienarbeiten	76
9	Literaturverzeichnis	78

1 Einleitung

1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Robotik in der Intralogistik sieht sich mit verschiedenen Entwicklungen und Herausforderungen konfrontiert, die einem effizienten Einsatz derzeit oft entgegenstehen. Die Nutzung von Robotern hat sich in der Logistikbranche nicht nur etabliert, sondern auch signifikant diversifiziert. Laut der International Federation of Robotics verzeichnete der Einsatz von Industrierobotern weltweit einen Anstieg um 12% im Jahr 2020 gegenüber dem Vorjahr. Besonders bemerkenswert war der Zuwachs bei den Installationen kollaborativer Roboter, den sogenannten „Cobots“, um 11%. Diese Roboter, die sich in direktem Kontakt mit Menschen in einem gemeinsamen Arbeitsraum bewegen können, versprechen eine höhere Prozesseffizienz durch ihre Fähigkeit zur Anpassung und Rücksichtnahme. Gleichzeitig entstehen viele neue Herausforderungen für die Prozessintegration, da Menschen von der Unterstützung durch die Roboter profitieren sollen. Entgegen dem bisherigen Fokus ausschließlich auf technologische Aspekte rücken zunehmend sozio-technische Systeme, die aus der Interaktion zwischen Menschen und Robotern bestehen, in den Vordergrund der wissenschaftlichen Betrachtungen.

Im Kontext dieser hybriden Arbeitsumgebungen erweist sich die Kommunikation zwischen Menschen und Roboter als essentiell, um Sicherheit, Effizienz sowie die menschenzentrierten Parameter Usability und Akzeptanz zu gewährleisten (siehe Abbildung 1). Unsere Forschung hat sich daher mit den zahlreichen Herausforderungen auseinandergesetzt, die es zu überwinden gilt, um eine systematische und in allen Situationen verständliche Kommunikation sicherzustellen. Dies umfasst das Verständnis und die Interaktionen zwischen Menschen und sowohl mobilen als



Abbildung 1: Multidimensionale Problemstellung bei der Anwendung mobiler Roboter in der Intralogistik im Zusammenspiel mit Menschen. Die verschiedenen Problemdimensionen zeigen die Notwendigkeit der Kommunikation zwischen Menschen und Robotern.

auch stationären Robotern, die außerhalb geschlossener Sicherheitsbereiche agieren und beinhaltet auch den Umgang mit neuartigen Roboterkonzepten.

Bei der Kommunikation zwischen Menschen und Robotern ist vor allem die technische Umsetzung problematisch. Herkömmliche Kommunikationsmittel, wie sie in homogenen Gruppen von Menschen oder Robotern eingesetzt werden, können nur schwer auf die heterogene Kommunikation übertragen werden. Kommunikationsmittel, die zwischen Menschen üblich sind, besitzen dabei das Problem einer hochkomplexen Grammatik oder einer Mehrdeutigkeit, die eine umfassende Kenntnis des Kontexts und der individuellen Gewohnheiten erfordert. Technische Kommunikationsmittel in verteilten Systemen, zu denen Roboter zählen, sind dagegen für Menschen nicht intuitiv verständlich und müssten mit hohem kognitiven Aufwand übersetzt werden, was mit einem Zeit- und Leistungsverlust der menschlichen Arbeitskraft verbunden wäre. Daher wurden im Projekt verschiedene spezielle technische Kommunikationsmittel entwickelt oder verfeinert, die den unterschiedlichen Charakter der Informationsverarbeitung von Menschen und Robotern überbrücken sollen.

Angesichts der Heterogenität der Nutzergruppen, die mit Robotern in Kontakt kommen, ist es von besonderer Bedeutung, Lösungen zu entwickeln, die auch für Personen ohne Vorerfahrung oder Schulung im Umgang mit Robotern zugänglich sind. Nur so können die modernen, anpassungsfähigen Technologien im Umfeld der Robotik auch die Produktivität der Unternehmen aufrechterhalten und somit wirtschaftlich eingesetzt werden. Um diese Zielpunkte zu überprüfen, wurden im Projekt Probandenstudien für verschiedene Situationen und Kommunikationsmittel durchgeführt.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse und Erkenntnisse unseres Forschungsvorhabens zusammen und reflektiert die Fortschritte sowie die verbleibenden Herausforderungen in diesem innovativen und dynamischen Feld.

1.2 Zielsetzung des Projekts

Ziel des Projekts war es folglich, einen Kommunikationsbaukasten zu erstellen, der Herstellern Integratoren und Anwendern von Robotern in der Logistik eine fundierte Übersicht zu Interaktionen mit Menschen gibt. Der Baukasten sollte die wichtigsten Situationen, in denen diese Begegnungen stattfinden abdecken und empfehlen, wie darin kommuniziert werden soll.

Zur weiteren Konkretisierung der Projektziele wurden in einer Vorstudie Anforderungen der Hersteller von Logistikrobotern ermittelt. Hierzu wurden zunächst mit 5 Mitarbeitern im Bereich Forschung und Entwicklung aus 5 verschiedenen Firmen systematische Experteninterviews durchgeführt. Es wurde zunächst ein Fragebogen mit 10 Fragen entwickelt, welcher in allen Experteninterviews angewandt wurde. Daraus ergab sich eine Liste von 12 Anforderungen auf prozessualer, technischer und organisatorischer Ebene. In einem weiteren Schritt wurden die 12 Anforderungen relativ zueinander priorisiert. Hierzu wurden mit denselben Vertretern Interviews durchgeführt, in denen sie die Anforderungen entsprechend ihrer praktischen Erfahrung verglichen. Hierzu wurde die Methode des paarweisen Vergleichs verwendet. Das Resultat ist eine absteigend priorisierte Liste an Anforderungen, welche in Tabelle 1 abgebildet ist. (Duml 2022)

Tabelle 1: Priorisierte Liste der Anforderungen an das Projekt, gewonnen aus Expertengesprächen (Duml 2022).

Anforderung	Relative Bedeutung
Sicherheit + sicherheitsrelevanter Bezug (Verweis auf Normen und Gesetze + Verdeutlichung von zu beachtenden Sicherheitsvorkehrungen + Sicherheit im Betrieb gewährleisten)	14 %
Usability, einfache Anwendung, einfacher Aufbau – klare Struktur und Übersicht (nützlicher, anwenderfreundlicher, sinnvoll abgegrenzter Inhalt)	11 %
Modularer Aufbau (anpassbare bzw. auswählbare Optionen -->je nach Situation, Fahrzeug, Umgebungsbedingungen)	10 %
Kosteneffizienz (Kosteneffiziente Umsetzung der Inhalte gewährleisten)	10 %
Standardisierung (Vereinheitlichung verschiedener Sachen wie z.B. Farbspezifizierung visueller Signale)	10 %
Kompatibilität (für verschiedene Hersteller, Systeme, Robotertypen)	9 %
Intuitivität/Verständlichkeit der einzelnen Bausteine (unterstützt mit Beispielen, User Stories, Simulationen, Einsatzorten, Evaluationen)	8 %
Eingliederung in andere Projekte (z. B. VDA 5050)	7 %
Erweiterbarkeit (Baukasten kann und wird fortlaufend ergänzt)	7 %
Verschiedene Situationen, die im Bereich der Intralogistik auftreten, berücksichtigen (häufigste & wichtigste)	6 %
Priorisierung der Inhalte (Abgrenzung zwischen unumgänglich und optional)	4 %
Verschiedene Intentionen, die Roboter im Bereich der Intralogistik haben, berücksichtigen (häufigste & wichtigste)	4 %

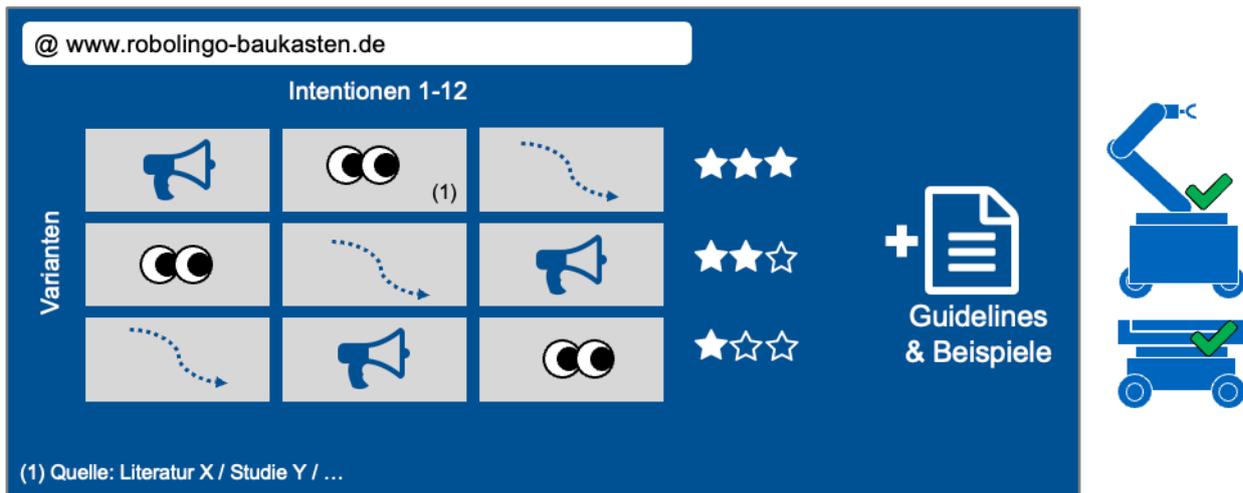


Abbildung 2: Grafische Veranschaulichung der Zielsetzung des Forschungsprojekts. Zentrale Erkenntnis sollte ein Baukasten sein, der für verschiedene Interaktionssituationen zwischen Mensch und Roboter verschiedene mögliche Kommunikationsmittel vorschlägt.

1.3 Methodik und Lösungsweg

Die Methodik des Forschungsprojekts gliedert sich in drei Ebenen: Die technische Ebene, die Ebene der Anwendbarkeit, also der sogenannten Usability und die Ebene der Prozessintegration. Die drei Ebenen in ihrer zeitlichen Abfolge inklusive der parallelen untergeordneten Tätigkeiten sind in Abbildung 3 dargestellt.

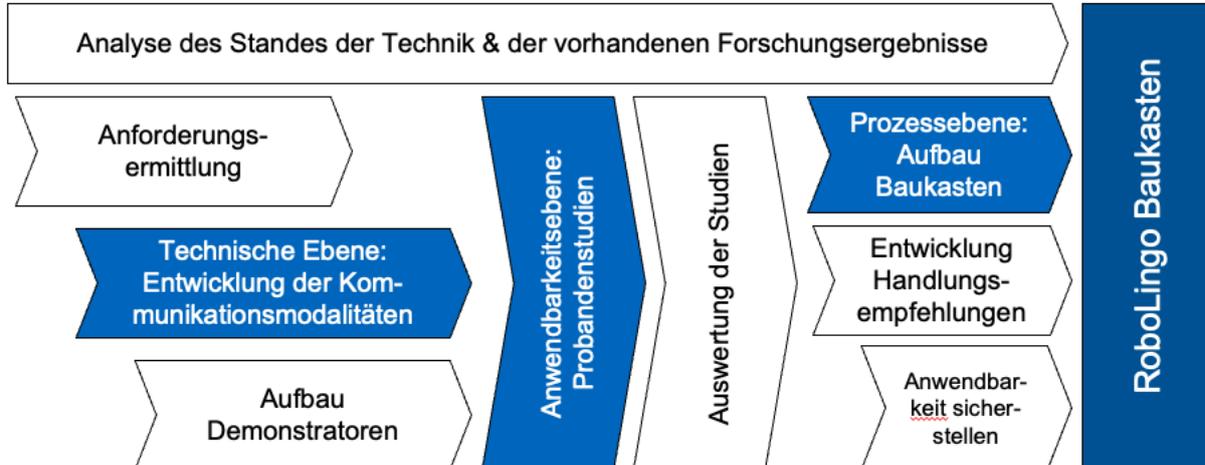


Abbildung 3: Vorgehensweise im Projekt zur Entwicklung des Interaktionsbaukastens. Die drei Hauptschritte der technischen, anwendungsorientierten und prozessualen Umsetzung sind blau hervorgehoben.

Auf der technischen Ebene sollten vorhandene Kommunikationsmittel für die homogene Kommunikation zwischen Menschen oder Robotern sowie solche für die heterogene Kommunikation zwischen Menschen und Robotern analysiert und selektiert werden. Anschließend mussten die ausgewählten Kommunikationsmittel weiterentwickelt werden, um ihre Nachteile auszumerzen und ihre effektive Anwendung im Kontext der Intralogistik zu erleichtern.

Auf der Ebene der Usability sollten verschiedene bereits vorhandene wie auch selbst entwickelte Kommunikationsmittel experimentell auf ihre Gebrauchstauglichkeit hin untersucht werden. Hierzu wurden repräsentative Interaktionssituationen ausgewählt und dafür funktionsfähige

technische Roboterprototypen entwickelt, die der Situation entsprechend ein oder mehrere Kommunikationsmittel einsetzen können. In repräsentativen Probandenstudien sollte die Effektivität und Ergonomie der Kommunikationsmittel in der jeweiligen Interaktionssituation getestet werden.

Auf der Ebene der Prozessintegration musste die Kombinationsfähigkeit von Kommunikationsmitteln und die Übertragungsmöglichkeit auf andere Interaktionssituationen beurteilt werden. Hierfür wurden Auswertungen von Probandenstudien verglichen. Weiterhin wurden zahlreiche Befragungen mit Domänenexperten von den im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Firmen durchgeführt. Diese dienten der Einordnung und Validierung der experimentellen Ergebnisse. Nach der Auswertung dieser Expertengespräche konnte der angestrebte allgemeingültige Baukasten aufgestellt sowie eine Reihe von Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

2 Technische Grundlagen

2.1 Relevante Systeme und Prozesse der Intralogistik

Intralogistik hat eine grundlegende Aufgabe, welche sich nach Jünemann (1989) mittels der sogenannten „6 R“ beschreiben lässt: Es soll demnach „die richtige Menge der richtigen Objekte [...] am richtigen Ort [...] zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Qualität zu den richtigen Kosten“ bereitgestellt werden. Heute werden die „6 R“ häufig erweitert, beispielsweise um die *richtige Verpackung* oder durch eine separate Nennung der *richtigen Informationen*, welche ursprünglich als eine Unterkategorie der richtigen Objekte geführt wurde. Zur Erfüllung dieser grundlegenden Aufgabe werden verschiedene Prozesse durchlaufen, die sich je nach Anwendungsfall auf verschiedene Teilsysteme stützen, welche wiederum aus verschiedenen technischen Komponenten bestehen.

Im vorliegenden Projekt wurden auf Systemebene sogenannte fahrerlose Transportsysteme (FTS) fokussiert, welche im Falle des gemeinsamen Einsatzes mit Menschen die direkte Interaktion von Mensch und Roboter bedingen. Im Folgenden wird daher das System FTS mit seinen Komponenten und Anwendungsfällen näher erläutert. Weiterhin werden übliche Prozesse geschildert, in denen Menschen und intralogistische Roboter interagieren.

2.1.1 Fahrerlose Transportsysteme

In der Intralogistik können Transportbedarfe durch flurfreie oder flurgebundene Fördermittel erfüllt werden. Zu den flurgebundenen Fördermitteln gehören nach VDI 3586 die Flurförderzeuge (FFZ). Diese können wiederum manuell bedient oder automatisch gesteuert werden.

FFZ mit automatischer Steuerung werden von VDI 2510 ToDo: Quelle als fahrerlose Transportfahrzeuge definiert. Zusammen mit einer Steuerungseinheit für die Transportauftragsverwaltung und -verteilung, der sogenannten Leitsteuerung, ergibt sich ein sogenanntes fahrerloses Transportsystem (FTS). Details zu den Aufgaben von FTS-Leitsteuerungen finden sich in der Richtlinie VDI 4451 Blatt 7 (VDI 4451 Blatt 7).

Neben den durch VDI-Richtlinien standardisierten Begriffen FTS und FTF gibt es in der internationalen Fachliteratur weitere Begriffe. So wird bei FTF, welche fixen Spuren folgen, von *Automated Guided Vehicles (AGVs)* gesprochen. Die Entwicklung und Verbreitung solcher FTF begann bereits in den 70ern ToDo: Zeitangabe prüfen, wobei aufgrund noch limitierter

Fähigkeiten von Sensorik und Recheneinheiten nur wenig adaptives Verhalten eingebaut wurde. Neben diesen spurgeführten finden zuletzt zunehmend FTF mit umfangreichen Fähigkeiten zur Anpassung an unvorhergesehene Situationen Anwendung. Hierzu gehört vor allem das Ausweichen von Hindernissen, was durch intelligente Sensorik, Dateninterpretation und Entscheidungsfindung ermöglicht wird. Solche FTF werden als *Autonomous Mobile Robots (AMRs)* bezeichnet. Ihre Abgrenzung von AGVs ist nicht scharf definiert.

Im vorliegenden Werk wird auf die Verbesserung der Interaktion von mobilen Robotern der Intralogistik mit dort beschäftigten Menschen abgezielt, um eine möglichst effektive Erreichung der gemeinsamen Ziele zu erreichen. Die Möglichkeiten der Nutzung von Kommunikationsmodalitäten unterscheiden sich nur nachrangig zwischen intelligenten AMRs und weniger intelligenten AGVs. Gerade in der unidirektionalen Kommunikation vom Roboter zum Menschen ist keine komplexe Sensorik und Interpretationsfähigkeit notwendig, sondern es muss lediglich bereits vorhandene Information abgegriffen und kodiert werden. Aus diesem Grund wurde im Projekt RoboLingo auf eine Unterscheidung zwischen AMR und AGV verzichtet. Im Folgenden werden stets die Begriffe „Roboter“ oder „FTF“ verwendet, was alle Ausprägungen von mobilen Transportrobotern hinsichtlich der Intelligenz umfassen soll.

2.1.2 Prozesse mit Mensch-Maschine-Interaktion

→ Grundlegende Prozesse: Produktionsversorgung, Kommissionierung, Ein-/Auslagerung mit Menschbeteiligung beschreiben → Gabriel Kunkel? → die Arbeit von Gabriel geht hier mMn schon zu sehr ins Detail, daher würde ich ihren Inhalt eher bei Kapitel 3 (Ontologie) sehen

Die Intralogistik lässt sich unterteilen in die Gebiete der Beschaffungslogistik, der Produktionsversorgung, der Distributions- sowie Entsorgungslogistik
ToDo: Quelle finden und zitieren. In allen Teilgebieten lassen sich unter anderem Menschen und Roboter einsetzen. Folglich lassen sich in allen Teilgebieten Prozesse finden, in denen Menschen und Roboter potentiell miteinander interagieren.

Die Interaktion zwischen Menschen und Robotern kann nach der Intensität und dem Grad der Verflechtung in 3 Stufen unterteilt werden. Es gibt dazu verschiedene Definitionen (Aaltonen et al. 2018). In diesem Bericht wird wie folgt definiert:

- **Koexistenz** kann an allen innerbetrieblichen Orten stattfinden. Dabei nutzen Menschen und Roboter den gleichen Arbeitsraum, verfolgen aber verschiedene Ziele. Wichtig ist dabei lediglich die gegenseitige Rücksichtnahme, um Blockierungen zu vermeiden und somit eine hohe Produktivität beider Parteien zu ermöglichen. Laut der Norm DIN EN ISO 3691-4 müssen mobile Roboter, die einen Arbeitsraum mit Menschen teilen, mit Sicherheitssensorik ausgestattet sein, welche durch Herabsetzung der Fahrgeschwindigkeit Kollisionen mit Menschen verhindert. Auch ein Mensch, der einem Roboter zufällig begegnet und dessen Ziel nicht kennt, kann den Roboter somit zu einem Stopp zwingen und somit seine Produktivität verringern.
- **Kooperation** bezeichnet das Anstreben eines gemeinsamen Ziels. Die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter passiert hier zeitversetzt. Verschiedene konsekutive Schritte zur Erledigung einer Aufgabe werden zwischen den Akteuren aufgeteilt. Kooperative Aufgaben treten insbesondere in Lagerung und Kommissionierung auf. Bei der Ware-zur-Person-Kommissionierung kann beispielsweise ein Unterfahr-FTF ein Regal zur kommissionierenden Person bringen, die daraus anschließend einen Artikel entnimmt.

- **Kollaboration:** unterscheidet sich von der Kooperation in der Gleichzeitigkeit der Erfüllung von Teilaufgaben zur Erreichung eines gemeinsamen Ziels. Durch implizite oder explizite Kommunikation müssen also sowohl Mensch als auch Roboter verstehen, wann das Gegenüber an der gemeinsamen Tätigkeit mitwirkt. Solche Formen der Interaktion treten beispielsweise in der Kommissionierung oder der Produktionsversorgung auf, wo Menschen beim Tragen von Gegenständen unterstützt werden, oder wenn der Mensch einen Ladungsträger manuell von einem Roboter übernehmen muss, bevor dieser weiterfahren kann.

Übliche Tätigkeiten, welche wirtschaftlicher von Menschen als von Robotern ausgeführt werden können, sind solche, bei denen

- viele verschiedene Informationen gleichzeitig erfasst, interpretiert und kombiniert werden müssen,
- adaptive Anpassungen der eigenen Handlung an den Systemzustand notwendig sind,
- komplexe Abfolgen von Aufgaben erledigt werden müssen, oder
- Schnelligkeit gefragt ist.

Übliche Tätigkeiten, die wirtschaftlicher von Robotern als von Menschen ausgeführt werden können, sind solche, die

- Eine hohe Präzision oder Wiederholgenauigkeit erfordern,
- einen zeitlichen Determinismus der Aufgabenerfüllung voraussetzen,
- physisch anspruchsvolle Aufgaben beinhalten.

Berührungspunkte zwischen Menschen und Robotern finden sich sowohl im Material- als auch im Informationsfluss.

2.2 Modalitäten der Mensch-Maschine-Interaktion

In der Wissenschaft gibt es viele verschiedene Modelle zur Analyse von Kommunikation (Kunkel 2022).

Gemäß der Definition von (Mortensen 2008) ist Kommunikation der Prozess, durch den Informationen von einem Akteur zu einem anderen transferiert werden. Bei diesem Prozess fungiert nach dem Modell von Shannon & Weaver (1948) der Sender als Informationsquelle und kodiert die Daten in eine Form, sodass sie über einen Kanal oder ein Medium an den Empfänger weitergegeben werden können (siehe Abbildung 4). Obwohl der Übertragungskanal ein wichtiges Element der Kommunikation ist, wird er durch Störungen wie Rauschen oder Umgebungsgerausche beeinträchtigt (Shannon 1948). Dies kann zur Einschränkung der Fähigkeit des Empfängers führen, die Nachricht dekodieren zu können und die darin enthaltenen Informationen zu verarbeiten. (Ziegler 2023)

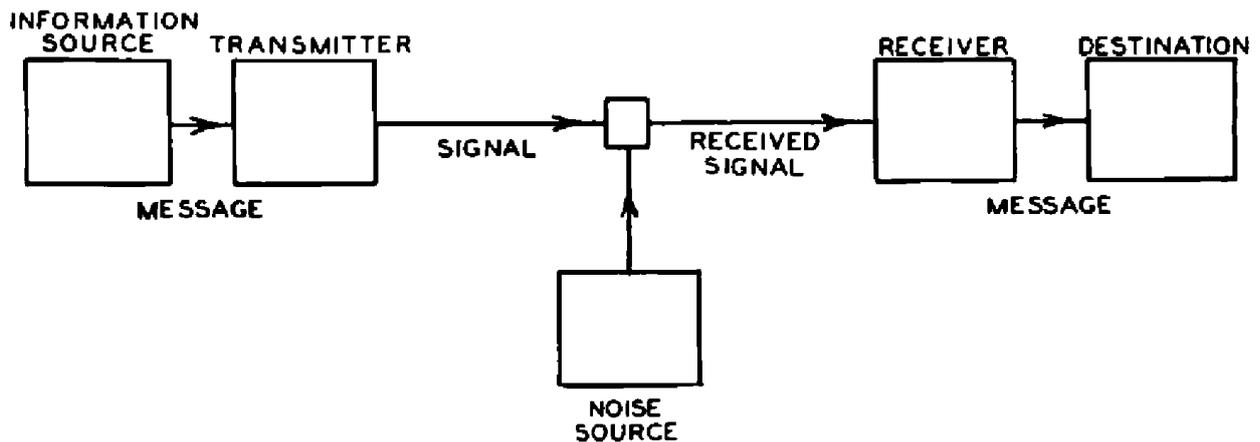


Abbildung 4: Kommunikationsmodell nach Shannon & Weaver (1949)

Das Modell kann genutzt werden, um die Kommunikation von Robotern mit Menschen zu beschreiben. Darin nimmt der Roboter die Rolle des Senders und der Mensch die des Empfängers ein. Für eine erfolgreiche Kommunikation muss nun ein Kommunikationskanal, also Signal und zugehöriges Medium genutzt werden. Der Roboter muss dazu in der Lage sein, die Information in dieses Signal zu kodieren und der Mensch dazu, es wieder zu dekodieren.

Diese Bedingungen stecken den Rahmen für mögliche Kommunikationsmittel des RoboLingo Interaktionsbaukastens ab.

Zudem kann das Ziel dieser Kommunikation gemäß der Maximen der Kommunikation nach Grice (1968) sein, eine reaktive Handlung beim Menschen hervorzurufen. Dieser Sachverhalt der Mensch-Roboter-Interaktion mit unidirektionalem Kommunikationsweg wird in Abbildung 5 dargestellt. Es werden drei verschiedene mögliche Absichten bzw. Intentionen des Sprechers, bzw. Senders definiert, die Kommunikation haben kann (Grice 1968):

- (G1) um eine Antwort/Reaktion des Gegenübers zu generieren.
- (G2) damit das Gegenüber die Intention des/der Sprechenden erkennt.
- (G3) damit das Erkennen der Absicht der/des Sprechenden (G1) zumindest ein Teil der Begründung für die Antwort/Reaktion des Gegenübers ist.

Des Weiteren gibt es in der Kommunikation nach Grice (1991) verschiedene Maximen, nach denen Kommunikation gestaltet sein sollte, wenn sie nach dem Kooperationsprinzip gehen soll:

- Maxime der Quantität: so wenig wie möglich, so viel wie nötig
- Maxime der Qualität: nur Wahres, bzw. für wahr Gehaltenes kommunizieren
- Maxime der Relevanz: nichts kommunizieren, das nicht relevant ist
- Maxime der Modalität: Unklarheiten, Mehrdeutigkeiten vermeiden, kurz fassen.

Auch Kommunikation von einem Roboter zu Menschen in seiner Umgebung sollte nach diesen Grundsätzen gestaltet werden. Tonsignale von Robotern können zum Beispiel störend wirken, wenn sie die Maxime der Quantität oder Relevanz verletzen. Auch im Hinblick auf die Menge möglicher Signale sollte ein Signal stets einer Absicht zugeordnet werden können. Somit soll die Maxime der Modalität gewahrt werden.

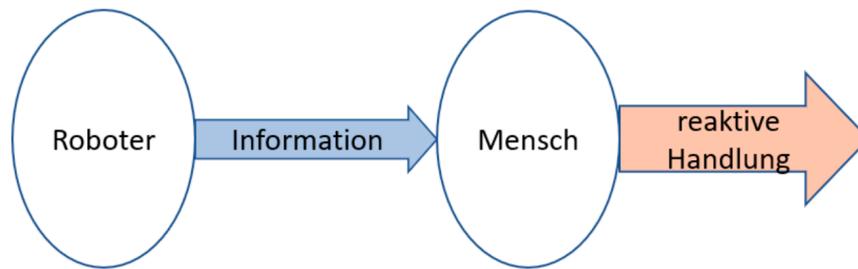


Abbildung 5: Interaktion zwischen Mensch und Roboter mit unidirektionalem Kommunikationsweg vom Roboter zum Menschen (Kunkel 2022)

2.2.1 Hilfsmittel zum Empfangen von Informationen durch einen Roboter

Zur Übertragung von Informationen von Menschen zu FTF eignen sich verschiedene Modalitäten. Diese sind in Tabelle 2 inklusive ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile aufgelistet.

Tabelle 2: Hilfsmittel zum Empfangen von Informationen durch FTF, mit Vor- und Nachteilen. Angepasst und erweitert nach (Kunkel 2022, 31ff).

Art	Vorteile	Nachteile
Spracherkennung	<ul style="list-style-type: none"> - Vielseitig durch variable Taktung, Höhe und Lautstärke - Interpretierbarkeit - Niedrige Kosten - Kein Sichtkontakt nötig 	<ul style="list-style-type: none"> - Bei intensivem Einsatz unangenehme Geräuschkulisse
Geräuscherkennung	<ul style="list-style-type: none"> - Übertragung komplexer Informationen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Geräuschkulisse kann nachteilhaft sein
Objekt- und Menschenerkennung	<ul style="list-style-type: none"> - Intuitive Zuordnung durch Menschen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Geräuschkulisse kann nachteilhaft sein
Gestenerkennung	<ul style="list-style-type: none"> - Für Menschen sehr intuitiv umsetzbar - Auch über hohe Entfernungen (ca. 8 Meter) möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Eindeutige Erkennung schwierig - Aufwendige Sensor- und Erkennungstechnologie
Erkennung von Lichtsignalen	<ul style="list-style-type: none"> - Günstige Sensortechnologie - Eindeutige Interpretation 	<ul style="list-style-type: none"> - Nur bei direkter Begegnung einsetzbar - Für Menschen nur beim Bedienen eines Fahrzeugs anwendbar
Schalter/Taster/Touchscreens	<ul style="list-style-type: none"> - Variabel, für komplizierte Interaktion geeignet - Eindeutig durch Beschriftungen/Erklärungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Mensch muss direkt an das Fahrzeug herantreten

2.2.2 Hilfsmittel zur Informationsübertragung vom Roboter zum Menschen Auditiv

Zur Übertragung von Informationen von FTF zu Menschen auf dem akustischen Weg eignen sich verschiedene technische Varianten. Diese sind in Tabelle 3 inklusive ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile aufgelistet.

Tabelle 3: Hilfsmittel zur auditiven Übertragung von Informationen von FTF zu Menschen, mit Vor- und Nachteilen. Angepasst und erweitert (Kunkel 2022, S. 34).

Art	Vorteile	Nachteile
Piepton	<ul style="list-style-type: none"> - Vielseitig durch variable Taktung, Höhe und Lautstärke - Interpretierbarkeit - Niedrige Kosten - Kein Sichtkontakt nötig 	<ul style="list-style-type: none"> - Bei intensivem Einsatz unangenehme Geräuschkulisse
Stimme	<ul style="list-style-type: none"> - Übertragung komplexer Informationen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Geräuschkulisse kann nachteilhaft sein
Geräusche	<ul style="list-style-type: none"> - Intuitive Zuordnung durch Menschen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Geräuschkulisse kann nachteilhaft sein

Visuell

Zur Übertragung von Informationen von FTF zu Menschen auf dem visuellen Weg eignen sich verschiedene technische Varianten. Diese sind in Tabelle 4 inklusive ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile aufgelistet.

Tabelle 4: Hilfsmittel zur visuellen Übertragung von Informationen von FTF zu Menschen, mit Vor- und Nachteilen. Angepasst und erweitert nach (Kunkel 2022, 35ff).

Art	Vorteile	Nachteile
Projektor, auch Laser, bis hin zu Augmented Reality	<ul style="list-style-type: none"> - Bremswegvisualisierung: Unterstützung beim Einschätzen von Gefahrensituationen 	<ul style="list-style-type: none"> - Technisch anspruchsvoll - Oft Erkennung der Umgebung erforderlich
Fahrtrichtungsanzeige („Floor Spot“)	<ul style="list-style-type: none"> - In unübersichtlichen Umgebungen ein zuverlässiger Beitrag zur Optimierung der Interaktion 	<ul style="list-style-type: none"> - Projektion muss ausreichend hell sein
Geräusche	<ul style="list-style-type: none"> - Intuitive Zuordnung durch Menschen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Geräuschkulisse kann nachteilhaft sein
AR-/VR-Brille	<ul style="list-style-type: none"> - Bestimmte Aspekte können direkt im menschlichen Sichtfeld hervorgehoben werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Integration mehrerer Funktionen notwendig - Hoher Implementierungsaufwand
Signallampen (geringe Intensität – keine Änderung, friedliche Farben)	<ul style="list-style-type: none"> - Gut und präzise für Informationen, die keine direkte Antwort erfordern 	<ul style="list-style-type: none"> - –
Signallampen (mittlere Intensität – Drehung, Blinken, Warnfarben)	<ul style="list-style-type: none"> - Gut, wenn hohe Sichtbarkeit des FTFs erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> - –
Signallampen (hohe Intensität – schnelles Blinken, rote Farbe)	<ul style="list-style-type: none"> - Für zeitnahe Kontaktaufnahme zum Menschen 	<ul style="list-style-type: none"> - Bei zu häufiger Verwendung tritt Gewöhnungseffekt auf
Bewegliche Elemente am Roboter (Winker,	<ul style="list-style-type: none"> - Intuitive Verständlichkeit gegeben 	<ul style="list-style-type: none"> - Mechanisch komplex und wartungsanfällig

vermenschlichende Objekte wie Arme, Augen, ...)	- Bewegungsrichtungen sind eindeutig vermittelbar	- Begrenzter Umfang an kommunizierbarer Information
Trajektorie des Roboters	- Keine Schulung notwendig, da intuitiv das Bewegungsverhalten bei Begegnungen zwischen Menschen nachgebildet wird	- Komplex in der Umsetzung - Begrenzter Umfang an kommunizierbarer Information

Haptisch

Zur Übertragung von Informationen von FTF zu Menschen auf dem haptischen Weg eignen sich verschiedene technische Varianten. Diese sind in Tabelle 5 inklusive ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile aufgelistet.

Tabelle 5: Hilfsmittel zur haptischen Übertragung von Informationen von FTF zu Menschen, mit Vor- und Nachteilen. Angepasst und erweitert nach (Kunkel 2022, 37ff).

Art	Vorteile	Nachteile
Armbandvibration	- Allgemein geräuschlos, zielgerichtet an bestimmte Empfänger - Zuverlässige Wahrnehmung	- Bedeutungen von Kommunikationsmustern müssen vorab gelernt werden - Separate Geräte notwendig
Handyvibration	- Wie Armbandvibration + Entfall des zusätzlichen Geräts	- Handy ist weniger auf den Anwendungsfall hin optimiert
Virtueller Bumper (Benachrichtigung des Menschen bei Unterschreitung Mindestabstand)	- Zuverlässig - Steigert die Sicherheit	- Separates Gerät für jede Bedienperson nötig
Physischer Bumper / absichtliches Berühren des Menschen	- Deutlich wahrnehmbar für Menschen	- Begrenzter kommunizierbarer Informationsumfang - Innerhalb der Sicherheitsrichtlinien nur sehr begrenzt anwendbar

2.2.3 Hilfsmittel zur Kommunikation mit Beteiligung der Infrastruktur

Zur Übertragung von Informationen von FTF zu Menschen können auch technische Mittel der ortsfesten Infrastruktur zu Hilfe genommen werden. Mögliche technische Varianten sind in Tabelle 6 inklusive ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile aufgelistet.

Tabelle 6: Hilfsmittel zur Übertragung von Informationen von FTF zu Menschen unter Zuhilfenahme von ortsfester Infrastruktur, mit Vor- und Nachteilen. Angepasst und erweitert nach (Kunkel 2022, 39f).

Art	Vorteile	Nachteile
Abschnittsbeleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> - Präzise und gut verständlich - Vermittlung enger Passagen oder von Routen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoher Implementierungsaufwand
Regalbeleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> - Für Kommissioniertätigkeiten bereits genutzt → durch Nutzung für Anzeige des baldigen Auftauchens eines FTF effiziente Doppelnutzung 	<ul style="list-style-type: none"> - –
Lokale Geräusche	<ul style="list-style-type: none"> - Verbesserung der Warnung vor Fahrzeugen an neuralgischen Punkten 	<ul style="list-style-type: none"> - –
Stationäre Projektion von der Decke (bspw. Vorfahrtsregeln)	<ul style="list-style-type: none"> - Ersatz von Schildern - Wird stärker beachtet 	<ul style="list-style-type: none"> - Implementierungsaufwand
Funkmitteilung am Endgerät (bei ausgeschaltetem Roboter oder Verbindungsabbruch relevant)	<ul style="list-style-type: none"> - – 	<ul style="list-style-type: none"> - –

2.3 Andere Kommunikationsbaukästen

Eine Bachelorarbeit im Projekt von Terefenko (2024) befasste sich unter anderem mit bisherigen Kommunikationskonzepten von industriellen AMRs.

Ganzheitliche Konzepte zur Kommunikation, beziehungsweise Signalisierung von AMRs in der Intralogistik gibt es bislang vor Allem von AMR-Herstellern selbst entwickelt. Da diese ihre Roboter mit einigen Signalen ausstatten wollen und müssen, ergibt sich zwangsläufig eine Sammlung von Kommunikationsmitteln für bestimmte Situationen. Diese können allerdings stark zwischen verschiedenen Herstellern abweichen. Die verschiedenen verwendeten Signale werden in technischen Dokumentationen beschrieben. Zwei Beispiele hierfür sind die Signale von Otto Motors und Agilox. (Terefenko 2024)

Otto Motors verwendet ein umlaufendes Leuchtband und Lautsprecher und kann damit eine Vielzahl von Signalen abbilden (Otto Motors 2023). Eine Auswahl davon ist in Tabelle 7 gelistet.

Tabelle 7: Übersicht zur kommunikativen Umsetzung verschiedener Situationen von AMRs der Firma Otto Motors - in Anlehnung an Otto Motors (2023) aus Terefenko (2024)

Situation	Visuelles Signal	Akustisches Signal
Start / AMR angeschaltet, aber noch nicht fertig gebootet	Lichtband durchgehend rot, Übergang zu Farbe weiß	Kein akustisches Signal

AMR bewegt sich bald los	Weißes Licht, vom Zentrum der Seiten ausgehend in die Ecken „strömend“	Einmalig „stotternde“, aufwärts-gerichtete Melodie
Fahrt	Lichtband vorne weiß, hinten rot	Milde, wiederholte Melodie (zwei Töne auf-, zwei Töne abwärts)
Abbiegen	Nur seitlich gelb blinkendes Lichtband; kleiner Teil vorne seitlich weiß, hinten seitlich rot	Kein akustisches Signal
„Docking“: Schutzfeldsensoren (zumindest vorne) ausgeschaltet	Lichtband vorne weiß, hinten rot, seitlich gelb abwechselnd an und aus	Harsche, wiederholte Melodie (kurzer „drückender“ Alarmton)
Verringerung des Schutzfelds, da Einfahrt in engere Umgebung	Lichtband vorne weiß, hinten rot, seitlich gelb „blinkend“	Wiederholtes „Summen“ / „Surren“
AMR bewegt sich nicht, wartet auf Input von Benutzer	Lichtband leuchtet grün, blinkt gegebenenfalls	Kein akustisches Signal
AMR ist blockiert, kann nicht weiterfahren, da jemand / etwas im Weg ist	Lichtband vorne gelb aufblinkend, hinten rot	Hupe
Notfallstopp / Sicherheitsstopp	Entweder nur Ecken oder komplettes Lichtband rot blinkend	Wiederholtes Summen bis hin zu harschen / hohen Tönen (hupenähnlich)

Auch die Firma Agilox hat verschiedene Signale, die beispielsweise beim AMR Agilox One eingesetzt werden. Dieser nutzt ebenfalls Lautsprecher und seitlich angebrachte LEDs. Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die verwendeten Signale – zugeordnet zu verschiedenen möglichen Situationen. (Terefenko 2024; Agilox Services GmbH 2023)

Tabelle 8: Übersicht zur kommunikativen Umsetzung verschiedener Situationen des AMRs Agilox One der Firma Agilox - in Anlehnung an Agilox Services GmbH (2023) aus Terefenko (2024)

Situation	Visuelles Signal	Akustisches Signal
Start-Lampe eingeschaltet	LED weiß, pulsierend, geringe Intensität	ID-0: vier Töne aufwärtsgerichtet, schnell hintereinander abgespielt
Initialisierung / Autosetup	LED weiß, schnell blinkend	ID-22: kurze, schnelle, aufwärts-gerichtete Melodie

Automatikbetrieb	LED weiß, statisch leuchtend	ID-3: ein einzelner, mittelhoher Ton
Richtungsänderung / Abbiegen	LED weiß/gelb (je nach System-parameter), blinken an jeweiliger Seite	Kein akustisches Signal
Schutzfeld verletzt	LED rot, blinkend an jeweiliger Seite	ID-18: zwei Töne, „klirrend“, ab-fallende Tonfolge
Pause	LED hellblau, pulsierend	ID-32: drei Töne, abfallende Tonfolge
Fehler	LED rot, pulsierend	ID-8: zwei Töne, abfallende Tonfolge
Problem	LED orange, pulsierend	ID-8: zwei Töne, abfallende Tonfolge ID-17: drei Töne, auf- und abfallende Tonfolge
Feueralarm	LED rot, schnell blinkend	ID-15: zwei hohe Töne hin und her wechselnd

Zudem hat während der Projektlaufzeit der VDMA in einer Pressemitteilung einen Vorschlag zur Signalgebung von fahrerlosen Industriefahrzeugen, also auch AMRs, veröffentlicht (VDMA e.V. 22.11.2023). Der Lehrstuhl für Ergonomie wurde dafür im Rahmen des Projekts ebenfalls an dessen Entwicklung beratend beteiligt. Der Kontakt zu der entsprechenden VDMA-Arbeitsgruppe kam über den projektbegleitenden Ausschuss des RoboLingo Projekts zustande.

Diese nicht-bindende Richtlinie basiert auf bestehenden Normen und Vorgaben und soll zurückgezogen werden, sobald ein entsprechender Sicherheitsstandard festgelegt ist. Hauptaugenmerk liegt auf der Einhaltung der EN ISO 3691-4, die angibt, in welchen Situationen fahrerlose Fahrzeuge akustische und/oder visuelle Signale ausgeben sollen. Der Vorschlag bietet einen Leitfaden für die Ausprägung dieser Signale Tabelle 9. Obwohl der visuelle Kommunikationskanal bevorzugt wird, empfiehlt die VDMA in einigen Situationen zusätzlich ein akustisches Signal, um die Aufmerksamkeit zu erhöhen. Zudem gibt es eine Prioritätsliste für die verschiedenen Situationen, um festzulegen, welche Signale Vorrang haben. (VDMA e.V. 22.11.2023; Terefenko 2024)

Tabelle 9: Übersicht zur kommunikativen Umsetzung verschiedener Situationen aus dem Vorschlagskatalog der VDMA Materials Handling and Intralogistics (VDMA e.V. 22.11.2023):

Situation	Visuelles Signal	Akustisches Signal
Start der autonomen Bewegung (nach einem Stopp)	Dreimal oranges Blinken, zwei-mal lang, einmal kurz; zusätzlich rote Projektion auf beiden Seiten, synchron mit Licht und akustischem Signal blinkend	A2: dreiteiliges Geräusch, konstante Tonhöhe, zwei gleichlange gleich hohe Töne, dann ein höherer und kürzerer; zusätzlich Sprachausgabe möglich
Autonomes Fahren / Fahrtrichtungsanzeige	Autonom: Blau-Grün fixes Licht; Fahrtrichtungsanzeige: vorne weiß, hinten rot, zusätzlich vorne blaue Projektion	A1: „Hintergrundgeräusch“, mit erhöhter Geschwindigkeit erhöhte Tonhöhe möglich; alternativ: Musik möglich
Abbiegen / Drehen	Schnell blinkendes oranges Licht	Kein akustisches Signal
Schutzfeld deaktiviert	Orange und blau/grün schnell abwechselndes Licht	A4: zwei Tonabschnitte, geringer werdender Schalldruckpegel jeweils; zusätzlich: Sprachausgabe möglich
Fehler / Problem	Statisches rotes Licht	A3: Verweis auf EN 981: vorgegebener Fehler-/Warnsound; Vorgabe: darf nicht mit anderen Gefahrensounds zu verwechseln sein; z.B.: ein Ton mit konstanter Tonhöhe und verringern-dem Schalldruckpegel im Laufe der Zeit: zusätzlich: Sprachausgabe möglich
Notfallstopp	Statisches rotes Licht	Kein akustisches Signal

3 Aufstellung einer Ontologie für Interaktionssituationen mobiler Roboter

Vorarbeiten zur Analyse von Interaktionen wurden in der BA von Gabriel Kunkel geleistet. Dabei wurden verschiedene Interaktionssituationen zwischen mobilen Robotern und Menschen

identifiziert. Diese lassen sich – unterschieden nach ihrer Priorität – verschiedenen Zuständen der Roboter zuordnen. Im Folgenden werden zunächst die Interaktionssituationen und anschließend die Zustände sowie die Verknüpfungen zwischen beiden Kategorien vorgestellt. Abschließend wird die daraus entwickelte Ontologie präsentiert. (Kunkel 2022)

3.1 Interaktionssituationen zwischen mobilen Robotern und Menschen

Die identifizierten Interaktionen gliedern sich in eine Gruppe von Interaktionen mit hoher Priorität und einer solchen mit Interaktionen niedriger Priorität. Grundsätzlich kann der beteiligte Mensch als Fußgänger oder als Fahrer eines Fahrzeugs beteiligt sein.

3.1.1 Interaktionen mit hoher Priorität

Interaktionen mit hoher Priorität sind nach Kunkel (2022) in folgenden Situationen gegeben:

1. Mensch kreuzt den Anfahrbereich des AMRs
2. Mensch steht im Anfahrbereich des AMRs
3. Kontakt bei einer Drehung des AMRs
4. Mensch bewegt sich auf stehenden AMR zu
5. Frontale Begegnung auf gerader Strecke
6. Mensch und AMR fahren auf gerader Strecke aneinander vorbei
7. Mensch kreuzt die Fahrbahn auf gerader Strecke
8. Mensch überholt stehenden AMR
9. AMR überholt stehenden Mensch
10. Mensch überquert die Kreuzung parallel zum AMR
11. Überqueren einer Kreuzung von gegenüberliegenden Seiten
12. Senkrechtes Aufeinandertreffen an einer Kreuzung
13. Mensch überquert die Fahrbahn in einer Kurve
14. Frontale Begegnung in einer Kurve
15. Ausbremsen eines Menschen durch einen AMR
16. Be- und Entladen eines AMRs bei Anwesenheit eines Menschen
17. Wartezustand mit erwartetem Informationsaustausch
18. Fehlermeldung mit Behinderung von Betriebsabläufen
19. Kontakt beim Pick-Vorgang
20. Übergabe von Ladung an den Menschen
21. Griff in den Kommissionierroboter
22. Kommunikation mit externen Systemen bei ausgeschaltetem AMR

3.1.2 Interaktionen mit niedriger Priorität

Interaktionen mit niedriger Priorität sind nach Kunkel (2022) in folgenden Situationen gegeben:

23. Fehlermeldung ohne Behinderung von Betriebsabläufen
24. Statusmeldung Ladezustand
25. Ruhezustand ohne erwarteten Informationsaustausch
26. Information über die aktuelle Position durch Erhöhen der Sichtbarkeit
27. Mensch fährt an stehendem AMR vorbei
28. Einfahrt eines AMR in eine freie Kreuzung
29. Interaktion zur Steigerung des Sicherheitsgefühls
30. Anzeigen von versteckten Aktivitäten

3.2 Mögliche Zustände und Aktivitäten mobiler Roboter

In Kunkel (2022) wurden 16 mögliche grundlegende Zustände von FTF abgegrenzt. Sie sind in Tabelle 10 aufgelistet. Den Zuständen lassen sich die hoch- und niedrigprioritären Interaktionen aus den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 zuordnen. Die Zuordnung ist ebenfalls in Tabelle 10 eingetragen. Die verschiedenen Interaktionen können grundsätzlich bei mehreren Zuständen des FTF auftreten, während einem Zustand mehrere Interaktionen zugeordnet sein können. Es handelt sich folglich um eine n-zu-m-Zuordnung.

Tabelle 10: Mögliche Zustände von FTF und zugeordnete Interaktionen mit hoher sowie niedriger Priorität (Kunkel 2022).

Zustand	Motorenstatus	Interaktionen mit hoher Priorität	Interaktionen mit niedriger Priorität	Anmerkungen
Ausgeschaltet	Aus	–	–	–
Wartezustände	Inaktiv	4 8 17	26 27	–
Ladezustand	Inaktiv		24 26 27	–
Ruhezustand	Inaktiv		25 26 27	–
Anfahren	Aktiv	1 2	–	Aktivitätswechsel
Drehung	Aktiv	3	–	Aktivitätswechsel, toter Winkel
Be-/Entladen	Aktiv	16	30	–
Fahren auf gerader Strecke	Aktiv	5 6 7 9	29	–
Fahren über Kreuzung	Aktiv	10 11 12	28 29	–
Kurvenfahrt	Aktiv	13 14	29	–
Abbremsen	Aktiv	15	–	Aktivitätswechsel
Fehlerzustand	Inaktiv/aus	18 22	23	–
Notaus	Aus	22	–	–
Pickvorgang	Aktiv	19	30	Roboter mit Kommissionierfunktion
Warenentnahme	Aktiv	20	30	Roboter mit Kommissionierfunktion
Interne mechanische Aktivität	Aktiv	21	30	Roboter mit Kommissionierfunktion

3.3 Ontologie von Interaktionssituationen

Auf Basis der gesammelten Zustände und Aktivitäten von FTF wurden mit Vertretern von Partnerfirmen aus dem projektbegleitenden Ausschuss zwei Workshops abgehalten. Diese dienten der Diskussion, Eingrenzung und Evaluation einer Zusammenstellung von Interaktionssituationen. Letztendlich wurde iterativ eine Liste von zwölf Kommunikationsabsichten in vier verschiedenen Situationsgruppen herausgebildet und als Ontologie formalisiert. In Abbildung 6 sind die zwölf Intentionen in den sich teilweise überschneidenden Gruppen dargestellt. Die Gruppen können auch als „Tags“ bezeichnet werden, die den verschiedenen Intentionen zugeordnet sind. Es zeigt sich, dass insbesondere der Tag „idle“ sich in den möglichen Intentionen der Roboter stark mit den Tags „moving“ und „special status“ überschneidet. Zu dieser Ontologie wurde ein Paper veröffentlicht.

Methodik

Ziel des Papers war es, eine umfassende Ontologie der häufigsten und relevantesten Kommunikationsabsichten für mobile Intralogistik-Roboter in ihrer Interaktion mit Menschen zu definieren. Diese Ontologie wurde auf Basis der gesammelten Zustände und Aktivitäten von FTF initial erstellt und durch Workshops mit Kontakten aus der Industrie entwickelt, iteriert und evaluiert. Die Workshop-Teilnehmer bestanden aus 9 Vertretern aus dem Bereich der Intralogistik, darunter 6 Vertreter von Intralogistik-Roboterherstellern, 2 Vertreter von Unternehmen, die FTF in Intralogistikprozessen einsetzen, und ein Vertreter eines Sensorherstellers. In einem ersten Workshop wurden erneut Situationen gesammelt und mögliche Kommunikationsabsichten abgeleitet. Die Vorschläge und Inputs aus dem ersten Workshop wurden strukturiert und teils umformuliert, um einen ersten Entwurf für die Ontologie zu erstellen. Darüber hinaus wurden erste Versuche unternommen, die Absichten zu kategorisieren und zu strukturieren. Der Entwurf der Ontologie wurde in einem zweiten Workshop mit den Industriekontakten evaluiert, um sicherzustellen, dass er umfassend und den Bedürfnissen der Hersteller und Anwender entspricht. Schließlich wurden die Intentionen mehreren, sich überschneidenden Gruppen, also ‚Tags‘ zugeordnet. (Niessen et al. 2024a)

Ergebnisse

Die ersten beiden Tags sind 'Bewegung' und 'Stillstand'. Sie kennzeichnen alle Absichten, die mit dem aktuellen und zukünftigen Fahrtzustand des AMR verbunden sind. Die anderen Tags sind 'sicherheitsrelevant', 'Schutzfeld' und 'besonderer Status'. Alle Tags sind in der Übersicht in Abbildung 6 enthalten, in der die Absichten entsprechend gruppiert und durch farbige Blasen gekennzeichnet wurden. Intention Nr. 3 bezieht sich auf spezifische zukünftige Änderungen in der Trajektorie des Roboters, die von einer kontinuierlichen Bewegung in der aktuellen linearen Richtung abweichen. Ein Beispiel dafür ist die Verwendung von Blinkern bei Autos und derzeit auch bei FTF. Intention 2 bezieht sich darauf, dass das FTF sich autonom bewegt - im Gegensatz zu einem Zustand, in dem es für längere Zeit stationär ist oder ferngesteuert gefahren wird. Intention 4 wurde von den Unternehmen, die FTF verwenden, speziell angefragt, um Informationen über die Dringlichkeit ihrer Aufgabe bereitzustellen und den Menschen die Bewertung von Prioritäten zu ermöglichen. Intentionen 5 und 6 beziehen sich auf den Sicherheitsbereich, den nahezu jedes FTF hat. Es handelt sich um einen Bereich darum herum, in dem die Geschwindigkeit reduziert oder ganz gestoppt wird, wenn ein Hindernis darin erkannt wird. Beide Intentionen sind mit dem Tag 'Schutzfeld' markiert und können auf „Stop“ Zonen angewendet werden, in denen jede Bewegung des FTF blockiert wird, oder auf Warnfelder, die entweder keine Auswirkung auf das Verhalten des Roboters haben oder z. B. die Höchstgeschwindigkeit verringern. Die nächsten drei Intentionen 7, 8 und 9 behandeln besondere Status, die vom normalen autonomen Betrieb abweichen. Der entsprechende Tag lautet 'besonderer Status'. Die ersten beiden beziehen sich auf Situationen, die menschliche Eingaben oder Interventionen erfordern. Der Unterschied besteht darin, dass Intention 7 während regulärer Abläufe auftritt und Intention 8 Fehlerzustände abbildet. Intention 9 umfasst alle Fälle, die wie abnormales oder ungewöhnliches Verhalten erscheinen können, jedoch keine menschliche Intervention erfordern. Ein Beispiel für eine solche Situation wäre das längere Anhalten an einer Kreuzung oder einem Aufzug, wenn das FTF auf ein anderes Fahrzeug oder auf ein bestimmtes Teil wartet, von dem es weiß, dass es bald ankommen wird. Die letzten drei Intentionen 10, 11 und 12 sind alle relevant für die Sicherheit von Menschen, die mit oder um FTF arbeiten, und wurden daher mit dem Tag 'sicherheitsrelevant' versehen. Nr. 10 signalisiert den Menschen, aufmerksam und vorsichtig zu sein. Eines der prominentesten Beispiele für diese Absicht bei Intralogistik-FTF ist das Be- und Entladen, bei dem oft die Sicherheitsscanner stummgeschaltet

werden müssen. Dies bedeutet, dass der Roboter Menschen in seiner Umgebung nicht wahrnehmen kann. Intention 11 bezieht sich auf Situationen, in denen entweder die Nutzlast oder das FTF selbst eine mögliche Gefahr darstellt – sei es mechanisch, physisch, elektrisch, thermisch oder anderweitig. Schließlich soll Intention 12 einen allgemeinen Notfallzustand in der Produktions- oder Logistik-Umgebung Signal geben. (Niessen et al. 2024a)

Diskussion

Die vorgeschlagene Ontologie der Kommunikationsabsichten von AMRs gegenüber Menschen bietet Chancen zur Verbesserung der Interaktion zwischen beiden. Sie ermöglicht es Menschen, die Absichten von Robotern besser zu verstehen, da diese jeweils aus der Ich-Perspektive des Roboters formuliert sind und eine konkrete Intention darstellen. Dies kann zu einer reibungsloseren Zusammenarbeit beitragen. Darüber hinaus kann die Ontologie die Entwicklung maßgeschneiderter Kommunikationswerkzeuge fördern und den Einsatz von FTF in hybriden Umgebungen mit Menschen verbessern. (Niessen et al. 2024a)

Die Ontologie ist allerdings nicht vollständig, und bietet an sich noch keinen „Baukasten“, der von Herstellern direkt umgesetzt werden kann. Die Auswahl der Absichten könnte durch Bias beeinflusst sein, und die Anwendbarkeit in der Praxis muss noch überprüft werden.

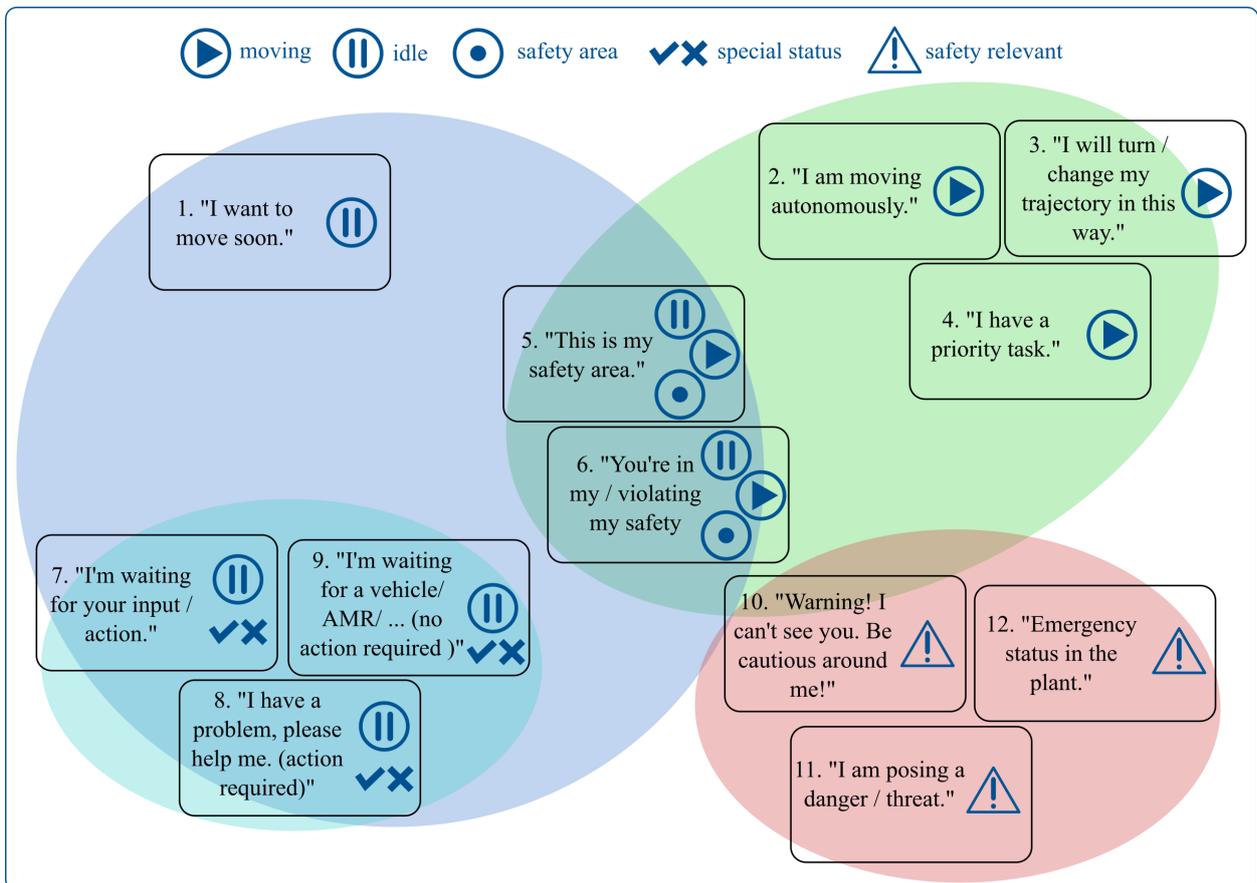


Abbildung 6: Ontologie der verschiedenen Intentionen von FTF, gegliedert nach vier verschiedenen Situationsgruppen. Durch Tags ist eine Mehrfachzuordnung von Situationen zu Intentionen gegeben (Niessen et al. 2024a).

4 Entwicklung des Interaktions-Baukastens

4.1 Kommunikation der zukünftigen Trajektorie (explizit / implizit)

Intention 3 der Ontologie aus Kapitel 3.3, „I will turn/change my trajectory.“ bzw. „Ich werde abbiegen / meine Richtung ändern.“, wurde mittels Vorversuchen mit Demonstratoren und in einer Probandenstudie mit zwei verschiedenen Konzepten – eins explizit, eins implizit – untersucht.

4.1.1 Vorversuche

Zu dieser zentralen Kommunikationsabsicht wurden zwei Vorversuche durchgeführt, in denen zwei verschiedene Demonstratoren aufgebaut wurden.

Linienlaser

Zum einen wurde ein Linienlaser eingesetzt, welcher eine gerade Linie vor einen AMR projiziert (siehe Abbildung 7). Dafür wurde eine angemessene Leistung berechnet, welche noch auf einige Meter vor dem Fahrzeug sichtbar ist. Aufgrund der besseren Wahrnehmbarkeit der Farbe grün wurde ein grüner Laser gewählt.

Der Linienlaser sollte in einem zweiten Schritt entweder komplett gedreht werden, um eine anstehende Richtungsänderung anzuzeigen oder ein Teil der Linie per Spiegel abgelenkt werden. Hierbei zeigte sich allerdings, dass diese Methode für eine Abdunkelung, sowie einen unschönen Knick in der Linie sorgte und somit wenig geeignet für eine solche Anzeige war.

Zudem wurde im Feedback in den Treffen des projektbegleitenden Ausschusses darauf hingewiesen, dass bewegliche Teile als wartungsintensive Schwachstellen bei

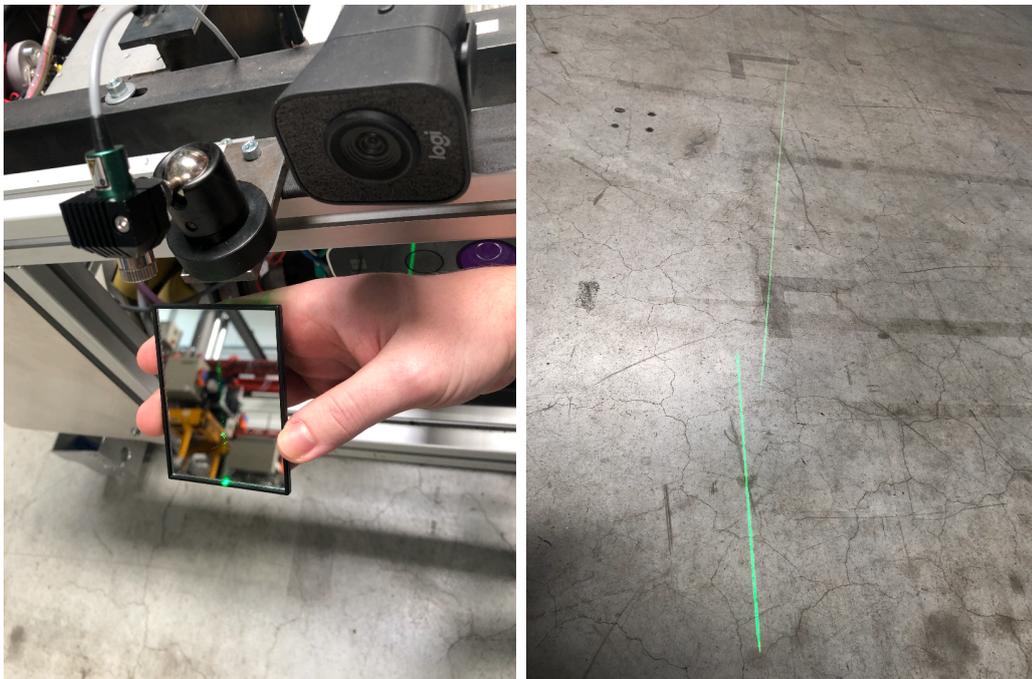


Abbildung 7: Vorversuch zur Projektion der Trajektorie des Roboters. Der Linienlaser ist ca. 0,4 m über dem Boden nach untenweisend an einem FTF angebracht. Über einen Spiegel wird eine Umlenkung eines Teils der Linie ermöglicht. (Senft 2023, S. 48)

Kommunikationsmitteln möglichst vermieden werden sollten. Dies wurde auch in der Anforderungsanalyse an den Baukasten bestätigt, welcher den Wartungsaufwand als wichtiges Kriterium listete (Duml 2022).

Künstliche Augen

Zum anderen wurde ein Demonstrator aufgebaut, der die Richtungsänderung anzeigt, indem ein Bildschirm mit einem virtuellen Paar Augen gedreht wird. Diese Art der Kommunikation wurde bereits in anderen Studien getestet und wirkte recht vielversprechend in ersten Tests mit Personen auf dem Lehrstuhlflur (Rehm 2022).

Hierbei war allerdings ebenfalls der Einsatz mechanischer bzw. mechatronischer und damit beweglicher Teile ein berechtigter Kritikpunkt, sodass diese Variante nicht in die Probandenstudie aufgenommen wurde.

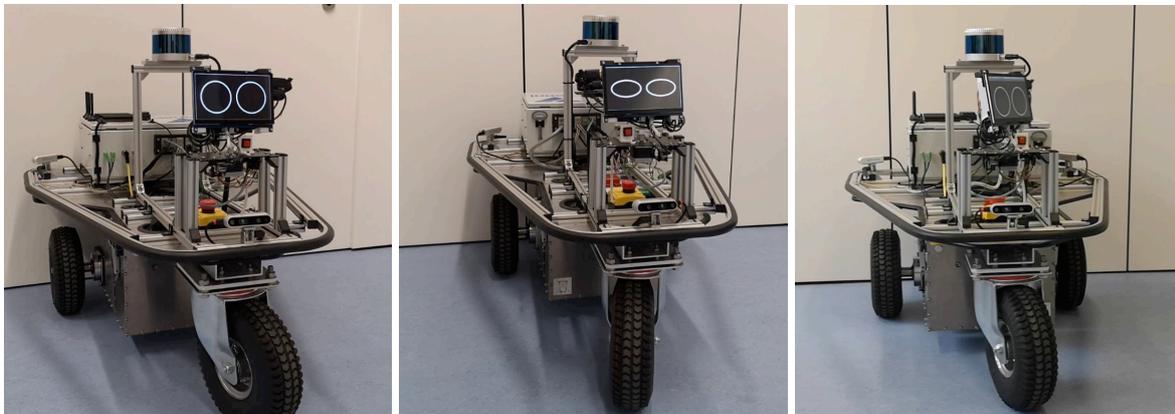


Abbildung 8: Artificial Eyes - Big (low linear velocity) and small (high linear velocity) eye size on screen (left and middle), the upcoming turning direction is represented by turning the screen (right). (Rehm 2022)

4.1.2 Aufbau der Probandenstudie

Die Probandenstudie wurde bereits auf der „Human-Computer-Interaction 2023“ präsentiert und veröffentlicht (Niessen et al. 2023).

Zwei Kommunikationsansätze wurden verglichen: Ein expliziter (A) und ein impliziter (B). Der Vergleich wurde in einer Crossover-Studie durchgeführt, bei der die Hälfte der Teilnehmer zuerst entweder den Kommunikationsansatz A (AB) oder B (BA) sah. Dies half, unsichtbare Transfer-Effekte zu vermeiden, die in einem Within-Design auftreten, während die Menge an erhaltenem qualitativem Feedback im Vergleich zu einem Between-Design erhöht wurde.

Die Werkzeuge wurden in drei Szenarien verglichen, in denen der Kommunikationsmodus und das Roboter-Verhalten variierten: Überquerung, Kreuzung und Engstelle (siehe Abbildung 9). Jeder Teilnehmer erlebte alle drei Szenarien in der gleichen Reihenfolge mit einer der Kommunikationsschnittstellen (A oder B) in der ersten Periode und dann die gleiche Sequenz mit dem anderen Kommunikationsmodus im zweiten Durchlauf. In jedem Szenario gab es zwei zufällig zugewiesene Varianten, wie zum Beispiel geradeaus oder rechts an einer Kreuzung fahren (siehe Abbildung 10), um Sequenzeffekte zu reduzieren. Die Teilnehmer wurden durch die Zuweisung von kurzen Kommissionieraufgaben mit einem definierten Start- und Endpunkt durch

die Szenarien geführt. Dies simulierte die Arbeitsbelastung der Arbeiter und wurde verwendet, um die Interaktion wiederholbar zu synchronisieren.

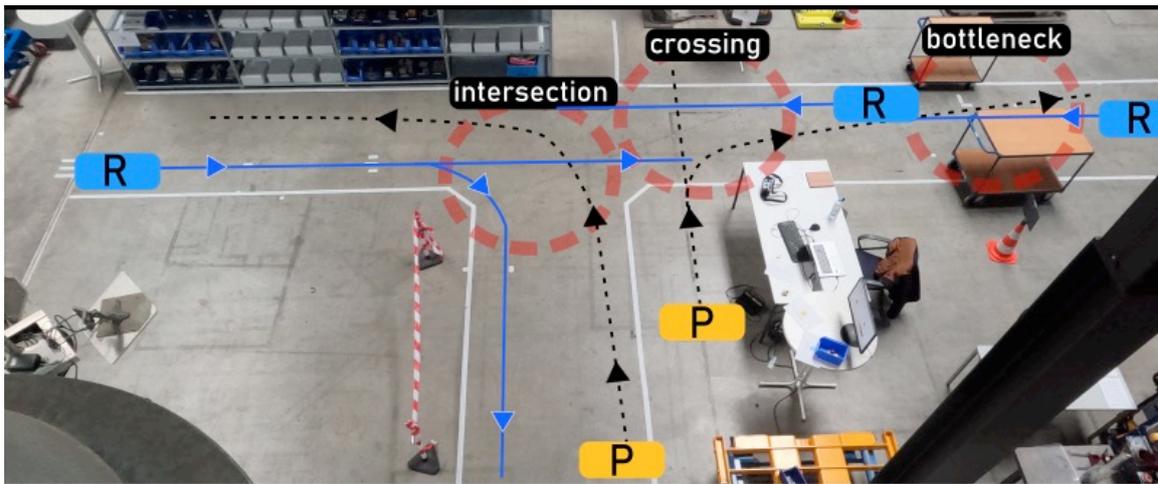


Abbildung 9: Übersicht über Interaktionsszenarien - Kreuzung, Überquerung und Engstelle. 'R' markiert die Startpunkte des Roboters und 'P' die der Teilnehmer. Die Roboterpfade sind blau, und die ungefähren Teilnehmerpfade sind gestrichelt in Schwarz.

Für jeden Kommunikationsansatz (explizit oder implizit) wurde ein Kommunikationstool-Prototyp entwickelt, der auf sogenannte „Broadcast“-Weise (also an alle gerichtet) mit vom Roboter aus allozentrischen (also aus Roboter-Perspektive) Nachrichten kommunizierte (siehe Abbildung 10). Beide wurden auf dem gleichen Innok Heros AMR implementiert, der auf einer vordefinierten Trajektorie durch ROS's Geometrie Twist-Parameter fuhr.



Abbildung 10: Beispiele für die explizite (links) und implizite Kommunikationsmodi (rechts), die für das Überquerungsszenario implementiert wurden

Als explizite Schnittstelle war der mobile Roboter mit einem Kurzstanz-Projektor ausgestattet. Der Projektor (LG Allegro 2.0) erhielt seinerseits Bilder, die von einem Skript auf einem Raspberry Pi 4B berechnet wurden, das aus den Geometrie-Twist-Parametern ein Bild zur Projektion auf den Boden berechnete, das den vorhergesagten Roboterpfad zeigte (siehe Abbildung 10).

Die vorprogrammierten Bewegungstrajektorien für das intent-expressive implizite Kommunikationstool wurden aus theoriegeleiteten Prinzipien abgeleitet. Die Prinzipien der Erzeugung lesbarer Bewegung von Dragan et al. (Dragan und Srinivasa 2013; Dragan et al. 2015; Dragan et al. 2013), Ergebnisse von Studien im Bereich der Human Factors in der Forschung zum autonomen Fahren wie Bengler et al. (2020)], sowie gängige Konventionen in der

Intralogistik wie Rechtsverkehr wurden berücksichtigt. Die Trajektorie für das Kreuzungsszenario ist in Abbildung 10 zu sehen.

Das Experiment sollte zwei Forschungsfragen beantworten. Für RQ1, die den Vergleich hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit adressiert, wurden drei zweiseitige Hypothesen zu jeder Dimension der Benutzerfreundlichkeit gemäß der DIN EN ISO 9241 (Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit) aufgestellt. Die Aufgabenabschlusszeit wurde als die Zeit vom Beginn der Roboterbewegung bis zum Moment berechnet, in dem die Teilnehmer am Ziel der Kommissionieraufgabe ankamen. Bei gleicher Aufgabe für alle Teilnehmer ist die Abschlusszeit ein geeignetes Maß für die Effizienz. Die Lesbarkeit wurde aus dem Lesbarkeitsabschnitt des Fragebogens von (Dragan et al. 2015) abgeleitet. Lesbarkeit wird definiert als das Inferierbar-Machen der Absicht, so dass sie als Maß für die Kommunikationseffektivität betrachtet werden kann. Für die Zufriedenheit wurde ein Vertrauenswürdigkeitsscore mit Hilfe des Vertrauen-in-Automatisierung-Fragebogens von Körber (2018) erhoben. Obwohl das Papier die Mehrdeutigkeit der Erstellung eines einheitlichen Vertrauens-Scores erwähnt, wurde ein Durchschnittswert der drei Vertrauenswürdigkeitsdimensionen für die Vergleichbarkeit zusammengestellt. Während Vertrauen nur einen Teil des gesamten Zufriedenheitsbereichs darstellt, wurde es wegen seiner kritischen Rolle bei der Akzeptanz gewählt.

Die 32 Teilnehmer waren junge Personen (Durchschnittsalter = 27,9, SD = 6,6) hauptsächlich aus technischen und universitären Hintergründen. 62,5% der Teilnehmer waren weiblich, 37,5% männlich. Vor der Studie wurde die schriftliche Zustimmung eines Ethikkomitees eingeholt (2022-655-S-KH).

4.1.3 Ergebnisse

Die Zeichnungen mit den Erwartungen der Teilnehmer wurden quantitativ geclustert und alle Bilder überlagert. Abbildung 11 zeigt zusammengefasst die Ergebnisse, die aus den Erwartungen der Teilnehmer gesammelt wurden. Jedes 2x2 Quadrat, bestehend aus vier Teilbildern, zeigt ein Szenario, mit allen Kombinationen von Szenariovariationen (Perioden 1 und 2) und Kommunikationsmodus (A und B). Jedes Bild enthält alle Zeichnungen überlagert, geclustert mit frequenzgrößencodierten Blasen, und überlagert von einem Balkendiagramm, das die Häufigkeit der korrekten Vorhersagen anzeigt.

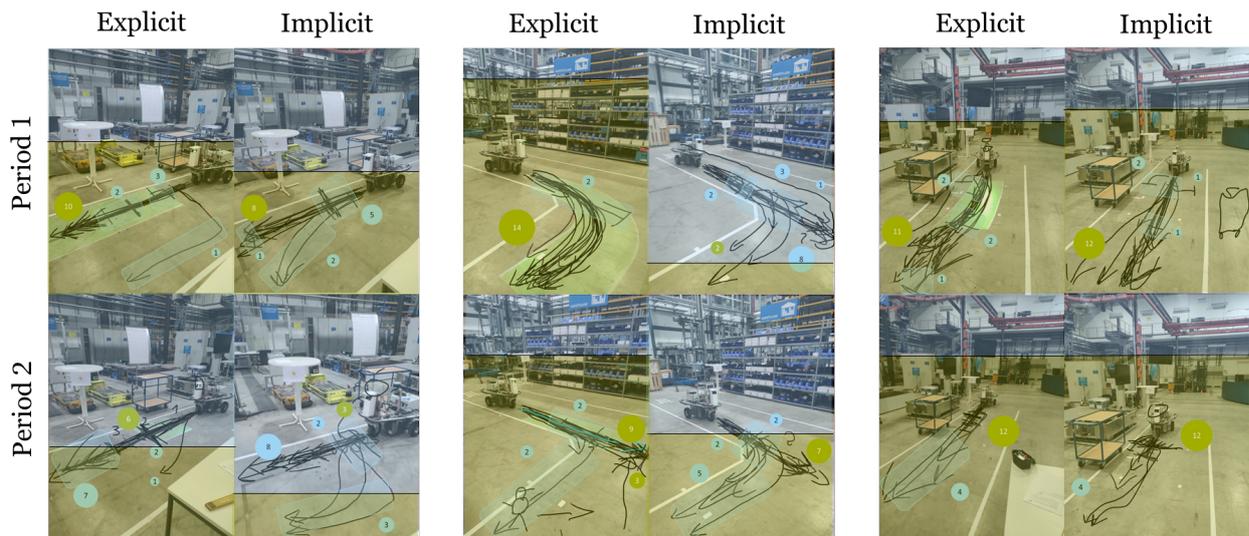


Abbildung 11: Die erwarteten Trajektorien der Teilnehmer überlagert mit der Häufigkeit korrekter Interpretationen (grün-gelb für richtig). Explicit = Projektion, Implicit = Bewegungsverhalten.

Aus den halbstrukturierten Interviews wurden die Probleme gesammelt, mit denen die Teilnehmer konfrontiert waren. Die Antworten wurden transkribiert und klassifiziert, indem ein gemischter induktiv-deduktiver Codierungsansatz wie in Williams und Moser (2019) verwendet wurde. Von allen gesammelten Problemen ($n = 129$) kritisierten die meisten ($n = 26$) den Mangel an Kommunikation der impliziten Schnittstelle. Die Bewegung des impliziten Kommunikationstools wurde auch als unverständlich oder unsicher beschrieben ($n = 16$). Mehr ($n = 16$) Erwähnungen betrafen die fehlende Reaktion des Roboters sowohl für die implizite ($n = 11$) als auch die explizite ($n = 5$) Schnittstelle. Die explizite Schnittstelle wurde am häufigsten für die Unsicherheit der Bedeutung der grünen Farbe kritisiert ($n = 14$; Vorrang für Roboter oder Mensch?). Qualitätsprobleme der Projektion ($n = 19$) wurden auch oft allgemein ausgedrückt: Verzögerung ($n = 10$), Flackern, kaum sichtbare Projektion und unsichtbare Projektion (jeweils $n = 3$).

4.1.4 Diskussion

Unsere Studie zeigt, dass die explizite Kommunikation in Bezug auf Lesbarkeit und Vertrauen besser abschnitt als die implizite Kommunikation. Dies deutet darauf hin, dass die explizite Kommunikation die bevorzugte Wahl für die untersuchten Korridor-Stil-Szenarien in der Intralogistik ist. Da die implizite Kommunikation als kommunikationsarm beschrieben wurde, wurde sie möglicherweise zu subtil oder auf die falsche Weise implementiert. Darüber hinaus könnte die Kritik an unkoordiniertem Verhalten darauf hinweisen, dass implizite Bewegungen präzisere Steuerungssysteme erfordern. Die wahrgenommene Nicht-Reaktionsfähigkeit fordert die Gestaltung von Systemen, die interaktiver sind und daher wahrscheinlich dynamisch erzeugte Trajektorien erfordern, die die Fähigkeit des Roboters erfordern, Fußgänger zu erfassen und entsprechend zu reagieren.

Für die explizite Schnittstelle unterstützt die Unsicherheit über die Bedeutung der grünen Farbe des Projektionspfades eine potenzielle Mehrdeutigkeit zwischen allozentrischen und egozentrischen Nachrichten, die bei expliziten Kommunikationstools berücksichtigt werden muss. Die Kommentare, die mangelnde Reaktionsfähigkeit des Systems kritisieren, decken einen Bedarf an der Gestaltung der Navigation und der daraus resultierenden Projektion auf, um dynamisch zu sein. Diese Erkenntnisse fordern eine weitere Erforschung der Implikationen und Erwartungen, die mit verschiedenen Kommunikationsmethoden verbunden sind.

Zusammenfassend hat unsere Studie gezeigt, dass die implizite Kommunikation der zukünftigen Trajektorie schwieriger zu interpretieren war, während die explizite Kommunikation ein Risiko der nicht beabsichtigten Interpretation hatte. In Bezug auf die Benutzerfreundlichkeitsmetriken stellten wir fest, dass die explizite Kommunikation zu einer höheren Zufriedenheit führte, abgeleitet aus dem Vertrauen, und die Kommunikationseffektivität verbesserte, abgeleitet aus der Lesbarkeit. Bemerkenswert ist, dass es keinen signifikanten Unterschied in der Effizienz der Teilnehmer gab, abgeleitet aus ihrer Aufgabenabschlusszeit. Bei einem weiteren Vergleich der beiden hier verwendeten Kommunikationstools sollte man beachten, dass die Projektions-Setup-Hardware mehr direkte Kosten pro Roboter verursacht und viel mehr Strom zum Betrieb benötigt, was sie möglicherweise zu einer weniger praktikablen Option für Unternehmen macht, die AMRs verwenden.

Beide Kommunikationstools, die in unserer Studie verwendet wurden, waren nicht vollständig entwickelt oder optimiert. Daher sollte der Vergleich zwischen expliziter und impliziter Kommunikation vorsichtig interpretiert werden, da er sich hauptsächlich auf den Vergleich von Trajektorienprojektionen mit einer Implementierung von Fahrverhalten konzentriert. Zweitens konzentrierte sich unsere Studie hauptsächlich auf Korridor-Interaktionen und beinhaltete keine offenen Räume. Daher können die Ergebnisse nicht auf Szenarien mit offenen Räumen extrapoliert werden. Weitere Einschränkungen sind die Verzögerung im Projektionssystem, die von einigen Teilnehmern ($n = 10$) bemerkt wurde, und Sichtbarkeitsprobleme mit der Bodenprojektion aufgrund schlechter Lichtverhältnisse ($n = 6$). Zusätzlich wurden in einigen Fällen ($n = 10$ von 192 Versuchen) die Versuche durch manuelle Notstopps unterbrochen, da der Roboter den Teilnehmern zu nahe kam. Dies führte zur Bewertung des Systems des Roboters und des Stop-Betreibers anstelle des Roboters selbst. Darüber hinaus könnte unser Teilnehmerpool aus jungen Menschen mit hauptsächlich technischen Hintergründen die Ergebnisse beeinflusst haben. Zukünftige Studien könnten Teilnehmer mit unterschiedlichen Altersprofilen und beruflichen Hintergründen einbeziehen, die repräsentativer für die reale Arbeitnehmerpopulation sind, um ein umfassenderes Verständnis zu erhalten. Die Art der Messung der Interaktionsdauer war möglicherweise zu unpräzise, um Unterschiede in der Effizienz feststellen zu können. Auch konnten in dieser Probandenstudie keine Langzeiteffekte betrachtet werden, was zu einer abschließenden Wahl des Kommunikationsmittels noch nötig wäre.

4.2 Kommunikation besonderer Zustände

Zur Abdeckung der Intentionen 7, 8 und 9 aus Kapitel 3.3 wurde in Bayramoglu (2023) eine gewichtete Punktbewertung durchgeführt, um ein geeignetes Kommunikationsmittel zu identifizieren. Die Methodik folgte dabei der objektivierten gewichteten Entscheidungsmatrix mittels unscharfer Zahlen nach Breiung und Knosala (1997).

Drei Intentionen wurden dazu entsprechend ihrem Tag „besonderer Zustand“ zusammengefasst und nach einem geeigneten Kommunikationsmittel gesucht:

- Intention 7: „I'm waiting for your input / action.“ bzw. „Ich warte auf deinen Input / deine Handlung.“
- Intention 8: „I have a problem, please help me. (Action required)“ bzw. „Ich habe ein Problem, bitte hilf mir. (Handlungsbedarf)“

- Intention 9: „I'm waiting for a vehicle/AMR/... (no action required).“ bzw. „Ich warte auf ein Fahrzeug/AMR/... (kein Handlungsbedarf).“

Dazu wurden in Bayramoglu (2023) zunächst potenziell geeignete Kommunikationsmittel gesammelt:

Visuell

- **Bildschirm:** Monitore sind ein unverzichtbarer Bestandteil unseres digitalen Alltags und spielen eine zentrale Rolle in der Art und Weise, wie wir Informationen, Unterhaltung und Arbeit wahrnehmen.
- **Einzelne LED:** Einzelne (Status-/Signal-) LEDs sind bei diversen Geräten im privaten und beruflichen Alltag kaum mehr wegzudenken.
- **LED-Band:** LED-Bänder sind in der heutigen Welt der Beleuchtung zu einem Trend geworden. Sie ermöglichen es, die Umgebungen auf kreative und individuelle Weise zu beleuchten und zu gestalten.
- **LED-Matrix:** Mit der zweidimensionalen Anordnung an Dioden können durch komplexe Anordnung verschiedener Farben auch Bilder, Buchstaben oder Gesichtsausdrücke angezeigt werden.
- **Blitzlicht:** Das blitzartige Aufleuchten erregt die höchste Aufmerksamkeit unter allen Signallampen.
- **Rundumleuchte:** Moderne Rundumleuchten mit LED-Technik haben bereits seit vielen Jahren die Drehspiegelleuchten abgelöst.
- **Unterbodenbeleuchtung:** Eingebaut werden flexible LED-Bänder. Ihr Licht wird durch die Bodenreflexion sichtbar gemacht.
- **Wandprojektion:** Projektoren bzw. Beamer sind eine gute Möglichkeit bewegliche Bilder so groß wie möglich zu visualisieren.
- **Bodenprojektion:** Die Projektion der Zustände auf den Boden ist ebenfalls möglich.
- **Smart Glasses:** Augmented-Reality-Headsets bieten in der Industrie eine neue vielversprechende Option des Datenaustauschs. Diese Wearables können dem Arbeitnehmer wichtige Daten personalisiert und direkt auf die reale Welt projizieren.

Auditiv

- **Sirene:** Erzeugt den lautesten Ton aller Signalgeber und wird hauptsächlich für Evakuierungen oder Entwarnungen verwendet. Aufgrund von möglicher häufiger Verwendung oder Bereichen mit mehreren Robotern wird die Sirene jedoch ausgeschlossen.
- **Signalhupe:** Ähnlich wie die Sirene, erzeugt eine Hupe einen lauten Ton, der als störend empfunden wird und daher eher für Gefahren eingesetzt wird. Daher wird auch die Signalhupe nicht weiter beachtet.
- **Sprache:** Die Sprachausgabe von Robotern hat sich zu einem wichtigen Thema in der Forschung und Entwicklung entwickelt und ermöglicht es Robotern, mit Menschen zu kommunizieren und Informationen auszutauschen.

Taktil

- **Vibrotaktiler Armband:** Ein flexibles Armband, das per Vibration Informationen an den Träger übermittelt. Es wurde ausgewählt, da es ergonomisch gestaltet wurde. Beispielsweise VibroTac Armband (Hulin 2011)
- **Smartphone-Benachrichtigung:** Smartphones sind bereits stark in das tägliche Leben integriert und daher eine naheliegende Wahl als Kommunikationsmittel im Arbeitsalltag. Sie können vibrieren und klingeln, haben eine visuelle Darstellung und ein grundsätzlich stabiles Netzwerk. Sie stellen eine wichtige Benutzerschnittstelle dar.

Anschließend wurden Kriterien ausgewählt, welche zur Bewertung der Kommunikationsmittel genutzt werden können. Dabei wurden sowohl ergonomische als auch betriebswirtschaftliche Kriterien berücksichtigt. Ergonomie bezieht sich dabei auf die Benutzerfreundlichkeit und Minimierung der Belastung für die Nutzer, einschließlich der Gestaltung der Benutzeroberfläche und der Klarheit von Anzeigen und Symbolen. Wichtige Kriterien sind Sichtbarkeit, Verständlichkeit, Nutzerfreundlichkeit und Flexibilität bzw. Anpassbarkeit an umgebungsspezifische Gegebenheiten. Beim Informieren der Mitarbeiter über einen Roboterzustand ist es wichtig, die Aufmerksamkeit des Mitarbeiters zu erregen und eine intuitive Verständlichkeit zu gewährleisten. Wirtschaftliche Kriterien beziehen sich hauptsächlich auf Kosten, einschließlich Anschaffungs-, Betriebskosten und Wartungsaufwand. Die Kriterien werden durch bipolare Adjektivpaare in einer Skala dargestellt. (Bayramoglu 2023)

Ergonomische Kriterien

1. **Verständlichkeit:** Ein wesentlicher Aspekt der Benutzerfreundlichkeit. Es ist entscheidend, dass der Mitarbeiter die Informationen korrekt versteht, um Fehler zu vermeiden und die Effizienz zu erhöhen. (0 verwirrend – 4 intuitiv)
2. **Geistige Belastung:** Bezieht sich auf die Gesamtheit aller Einflüsse, die psychisch auf den Menschen wirken. Die Quantität der Information sollte so gering wie möglich, aber so viel wie nötig sein. (0 komplex – 4 einfach)
3. **Körperliche Belastung:** Ein schwerwiegender Faktor ist das Störpotential eines Kommunikationsmittels, darunter fällt die Überanstrengung der Sinnesorgane. (0 störend – 4 angenehm)
4. **Zeitliche Beanspruchung:** Um die Effizienz zu steigern, ist die Übertragungsdauer signifikant, insbesondere im Fehlerzustand. Die Information muss schnell übermittelt werden. (0 langsam – 4 schnell)
5. **Wearable benötigt:** Wearables können die Möglichkeit bieten einen größeren Bereich abzudecken und machen somit mobiles Arbeiten möglich. Sie wirken sich jedoch negativ auf die Benutzerfreundlichkeit aus. (0 wearable nötig / 4 kein wearable nötig, nur 2 Wahlmöglichkeiten)
6. **Gestaltungsmöglichkeit:** Es ist von großem Vorteil, wenn Kommunikationsmittel individualisierbar sind. Dies ist primär für die User Experience relevant und kann der Barrierefreiheit zugutekommen. (0 keine Veränderung möglich – 4 vollständig individualisierbar)
7. **Barrierefreiheit:** Es ist essenziell, dass alle Mitarbeiter, unabhängig von ihren körperlichen Fähigkeiten, die Logistiksysteme effektiv nutzen können. Dies fördert die

Inklusion und erhöht die Produktivität im gesamten Betrieb. (0 nicht hörbar – 4 barrierefrei für Hörgeschädigte & 0 keine Sichtbarkeit – 4 barrierefrei für Sehgeschädigte)

Wirtschaftliche Kriterien

Um das passende Kommunikationsmittel zu identifizieren, muss es ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Ergonomie und Wirtschaftlichkeit aufweisen. Dies beinhaltet nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch Betriebskosten und Wartungsaufwand. Neben niedrigen Anschaffungskosten sind auch geringe Betriebskosten, hohe Laufleistung, hohe Verfügbarkeit, lange Wartungsintervalle, schneller Service, Langlebigkeit und hohe Wiederverkaufswerte von entscheidender Bedeutung. Um die Bewertung überschaubar zu gestalten, liegt der Schwerpunkt auf den Kosten für: (Bayramoglu 2023)

- 8. **Anschaffungskosten** (0 kostenintensiv – 4 kostengünstig)
- 9. **Betriebskosten** (0 hohe Betriebskosten – 4 niedrige Betriebskosten)
- 10. **Wartungsaufwand** (0 hoher Wartungsaufwand – 4 niedriger Wartungsaufwand)

Die Bewertungen wurden dabei relativ zwischen den Kommunikationsmitteln vorgenommen.

Die Kriterien wurden anschließend in einem paarweisen Vergleich jeweils gegenübergestellt und somit eine Gewichtung vorgenommen (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Gewichtung der Kriterien durch paarweisen Vergleich. (Bayramoglu 2023)

Paarweise Vergleich	Verständlichkeit	geistige Belastung	zeitliche Belastung	physische Belastung	Anschaffungskosten	Gestaltungsmöglichkeit	Bf. für Hörgeschädigte	Bf. für Sehgeschädigte	Wartungsaufwand	Betriebskosten	Wearable nötig ?	Summe	Gewichtung
Verständlichkeit	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	20	0,187
geistige Belastung	0	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	14	0,131
zeitliche Belastung	0	2	2	0	2	2	0	0	2	2	2	12	0,112
physische Belastung	0	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	17	0,159
Anschaffungskosten	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1	2	4	0,037
Gestaltungsmöglichkeit	0	0	0	0	2	2	1	1	2	2	2	10	0,093
Bf. für Hörgeschädigte	0	0	2	0	2	1	2	2	0	0	1	8	0,075
Bf. für Sehgeschädigte	0	0	2	0	2	1	0	2	0	2	1	8	0,075
Wartungsaufwand	0	0	0	0	1	0	2	2	2	1	2	8	0,075
Betriebskosten	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	0	2	0,019
Wearable nötig?	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	2	4	0,037

Zuletzt wurde die Bewertung der Kommunikationsmittel nach den ermittelten Kriterien vorgenommen und entsprechend der Gewichtung eine Punktesumme ermittelt. Auf Basis dieser wurde eine Rangliste erstellt (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Gewichtete Punktebewertung der Kommunikationsmittel für besondere Betriebszustände eines AMR. (Bayramoglu 2023)

Bewertungskriterien Kommunikationsmittel	Bewertungskriterien												gewichtete Summe	Rangliste
	Verständlichkeit	geistige Belastung	körperliche Belastung	Barrierefrei für Hörgeschädigte	Barrierefrei für Sehgeschädigte	Gestaltungsmöglichkeit	zeitliche Belastung	Wearable nötig?	Wartungsaufwand	Betriebskosten	Anschaffungskosten	Summe		
Bildschirm	4	0	1	4	3	3	1	4	2	1	1	24	2,355	8
einzelne LED	2	4	4	4	0	0	4	4	3	4	4	33	3,028	2
LED-Band	3	4	3	4	1	1	4	4	3	2	3	32	3,009	3
LED-Matrix	3	2	3	4	2	1	2	4	3	1	2	27	2,598	5
Bodenprojektion	4	1	2	4	1	3	1	4	1	0	1	22	2,374	7
Unterbodenbeleuchtung	3	4	4	4	0	1	3	4	4	2	3	32	3,140	1
Gestik	0	2	2	4	1	0	0	4	1	4	4	22	1,981	10
Smart Glasses	4	2	0	4	2	4	2	0	0	1	0	19	2,206	9
Sprache	4	2	2	0	4	2	0	4	4	4	4	30	2,617	4
taktiler Armband	1	4	1	4	4	1	3	0	0	1	0	19	1,832	11
Smartphone-Benachrichtigung	3	3	0	4	2	4	0	0	3	3	0	22	2,486	6
Gewichtung	0,187	0,131	0,112	0,159	0,037	0,093	0,019	0,037	0,075	0,075	0,075			

Die Wahl des Kommunikationsmittels hängt von Faktoren wie Verständlichkeit, geistige und körperliche Belastung, Zeitbelastung, Barrierefreiheit und Gestaltungsmöglichkeiten ab. Die visuelle Darstellung von Informationen mittels LEDs, insbesondere über ein LED-Band oder eine Unterbodenbeleuchtung, wird entsprechend der gewichteten Punktebewertung als bevorzugtes Kommunikationsmittel empfohlen, da sie eine hohe Informationsdichte liefert und gleichzeitig verständlich, wenig belastend und barrierefrei ist.

Es werden jedoch nicht alle Aspekte der Barrierefreiheit berücksichtigt, wie beispielsweise Leseschwächen oder geistige Behinderungen, und daher die Bereitstellung mehrerer Interaktionsmöglichkeiten empfohlen. Die Effizienz visueller Signale hängt auch von individuellen Entscheidungsprozessen und Arbeitsbedingungen ab. Faktoren wie Stress, Klima, Lärm und ungünstige Beleuchtungssituationen, die die Bewertung beeinflussen könnten, konnten im Rahmen dieser Studie nur begrenzt berücksichtigt werden. (Bayramoglu 2023)

4.3 Kommunikation sicherheitsrelevanter Zustände

Sicherheitsrelevante Roboterzustände müssen separat betrachtet werden, da hier zur Vermeidung von Schäden an Menschen und Gegenständen eine besonders eindeutige, unmittelbare und schnell erfassbare Kommunikation nötig ist.

Laut der im Projekt durchgeführten Bachelorarbeit von Huiyu Chen werden im Kontext der Mensch-Roboter-Interaktion zwei wesentliche Aspekte von Sicherheit fokussiert, nämlich die allgemeine Sicherheit und die wahrgenommene Sicherheit: „Die allgemeine Sicherheit in der MRI wird durch die Implementierung von Sicherheitsmaßnahmen bei der Entwicklung von Robotern gewährleistet, um Verletzungen von Menschen zu verhindern. Ein Beispiel für solche

Sicherheitsmaßnahmen ist, dass mobile Roboter einen angemessenen Abstand zu Menschen und eine sichere Geschwindigkeit einhalten. Um die wahrgenommene Sicherheit zu steigern, insbesondere in Situationen, in denen Roboter in Arbeitsumgebungen mit Menschen interagieren, ist es entscheidend, dass der Roboter seine Absichten auf eine klare und verständliche Weise kommuniziert. Die Verbesserung der wahrgenommenen Sicherheit zielt darauf ab, das Vertrauen der Menschen in die Zuverlässigkeit von Robotern als Arbeitskollegen zu stärken. Dies kann die Akzeptanz von Robotern in der Arbeitswelt erhöhen (Chadalavada et al. 2020) Unfälle, die durch Roboter verursacht werden, können gemäß Ogorodnikova (2008) in drei Hauptkategorien eingeteilt werden: technische Fehler, menschliche Fehler und schlechte Umgebungsbedingungen. Zu technischen Fehler gehören Probleme in der Mechanik des Roboters, wie zum Beispiel eine fehlerhafte Verkabelung zwischen den Komponenten des Roboters. Auch Fehler in der Steuerung, beispielsweise Programmierfehler gehören zu technischen Fehlern. Diese technischen Mängel können zu unvorhersehbaren Situationen führen, bei denen Roboter nicht rechtzeitig anhalten, unkontrollierte Geschwindigkeiten erreichen oder plötzliche Bewegungen und Beschleunigungen ausführen, die selbst von aufmerksamen Bedienenden nicht vorherzusehen sind. Menschliche Fehler resultieren aus verschiedenen Faktoren wie zum Beispiel Unaufmerksamkeit, Ermüdung oder unzureichenden Schulungsprogrammen. Schlechte Umgebungsbedingungen können extreme Temperaturen oder ungünstige Lichtverhältnisse sein.“ (Chen 2023, 12f).

Es wurden elf relevante und abgrenzbare sicherheitsrelevante Zustände von FTF identifiziert. Ihre Einordnung als sicherheitsrelevant kann aufgrund dreier binärer Kriterien erfolgen: Erkennt der Roboter den Menschen nicht, stellt der Roboter selbst eine Gefahr dar oder befindet sich der Roboter in einem Notfallmodus? Je nach Zustand können mehrere dieser Kriterien gleichzeitig zutreffen. In Tabelle 13 sind die elf sicherheitsrelevanten Zustände und die jeweilige Erfüllung der Kriterien veranschaulicht.

Tabelle 13: Elf sicherheitsrelevante Zustände von FTF. Sie wurden zusammengestellt anhand der drei Auslösekriterien "erkennt den Menschen nicht", "stellt eine Gefahr dar" sowie "befindet sich im Notfallmodus". Angepasst nach Chen (2023, S. 24).

Sicherheitsrelevanter Zustand	Roboter erkennt den Menschen nicht	Roboter stellt eine Gefahr dar	Roboter befindet sich im Notfallmodus
Schlechte Lichtverhältnisse	X		
Roboter beim Be-/Entladen	X	X	
Roboter durch Hindernisse eingeengt	X		
Mensch kreuzt unerwartet die Fahrbahn		X	
Maximale Zuladung überschritten			X
Ladung fällt heraus		X	X
Lastaufnahmemittel defekt			X
Sensor defekt	X	X	X
Navigation defekt		X	X

Elektrische Störung	X	X	X
Geschwindigkeit überschritten		X	

4.4 Akustische Signale für verschiedene Interaktionen

Wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, sind die technischen Grundlagen für die Verwendung akustischer Signale vom Roboter zum Menschen sehr einfach umzusetzen. In einer umfassenden Studie wurde daher untersucht, wie sich die Verständlichkeit, Nutzbarkeit und Akzeptanz möglicher akustischer Signale für verschiedene Interaktionssituationen verhalten. Dafür wurden neun der in Abschnitt 3.3 vorgestellten zwölf Interaktionen selektiert, jeweils mehrere Vorschläge für akustische Signale erarbeitet und anschließend eine Onlineumfrage zur Gebrauchstauglichkeit durchgeführt. Danach wurden die Umfrageergebnisse mit Domänenexperten validiert.

Die Domänen, aus denen die vorgeschlagenen akustischen Signale abgeleitet wurden, sind in Abbildung 12 dargestellt. Es wurde eine möglichst breite Palette von Geräuschen aus Alltagssituationen gewählt, die einem Großteil der Bevölkerung bekannt sein sollten und mit bestimmten Inhalten assoziiert werden. Um verschiedene Altersgruppen, Interessensgebiete und Bildungsgrade anzusprechen, wurden sowohl Geräusche aus Verkehrsmitteln, von Haushaltsgeräten als auch aus elektronischen Medien und Popkultur herangezogen.

Eine Zusammenfassung der Onlineumfrage inklusive der statistischen Auswertung und der Validierungsgespräche mit Domänenexperten befindet sich in Vorbereitung und soll in den *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* veröffentlicht werden.

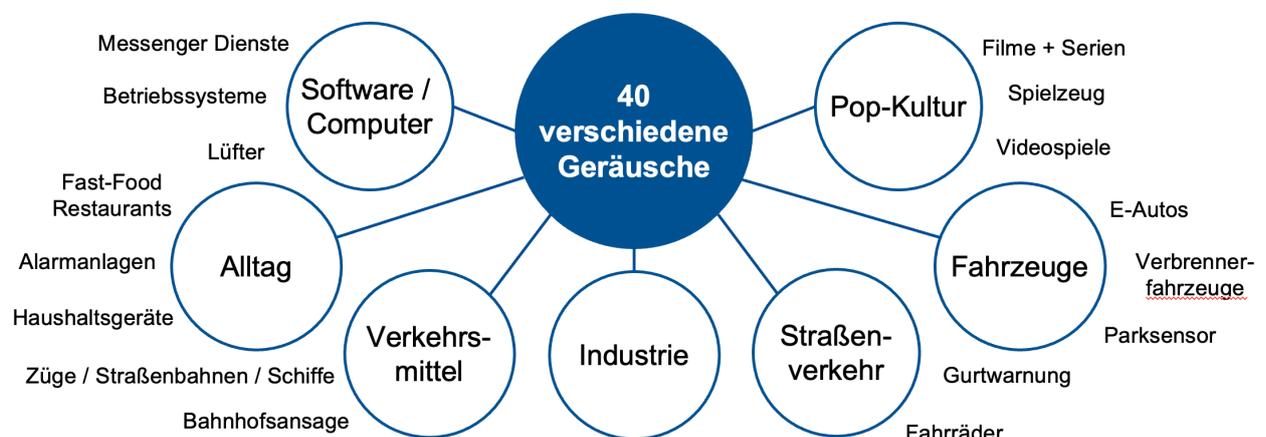


Abbildung 12: Herangezogene Gebiete für akustische Signale, die für FTF verwendet werden könnten.

4.4.1 Durchführung der Onlinebefragung

Für die Umfrage wurde ein Online-Umfragetool herangezogen, was die Verbreitung an die Zielgruppe sowie die digitale Auswertung vereinfacht. Im Folgenden werden die Zielgruppe der Befragung sowie davon abgeleitet die Struktur und Hauptfragen des Fragebogens vorgestellt.

Zielgruppe: Als Kernzielgruppe der Umfrage wurden Mitarbeitende in Großunternehmen identifiziert, welche regelmäßig während ihrer Arbeitszeit Begegnungs- oder Interaktionssituationen mit FTF ausgesetzt sind. Dazu wurde als Randzielgruppe ein über

Geschlechter, Bildungsstand und Alter repräsentativer Querschnitt von Menschen mit technischem Hintergrund ausgewählt.

Struktur des Fragebogens: Es wurden im Ein- und Ausklang soziodemografische Informationen abgefragt, während der Hauptteil nach den Interaktionsszenarien gegliedert wurde. Von den selektierten neun Szenarien mussten die ersten sechs zwingend bearbeitet werden; weitere drei konnten optional hinzugezogen werden. Jedes Szenario wurde anhand eines Fotos, eines Textes und mehrerer über Buttons abspielbarer Geräusche zunächst eingeführt. Daran wurde eine jeweils gleich aufgebaute Reihe an Fragen zur Gebrauchstauglichkeit angeschlossen. Schließlich konnte optional eine Erklärung zur Herkunft der Geräusche aufgerufen werden. Diese wurde vorher verschwiegen, was auf eine höhere Neugier und damit Motivation der Teilnehmenden abzielte. Der sich daraus ergebende Ablauf der Fragebogenbearbeitung ist in Abbildung 13 dargestellt.

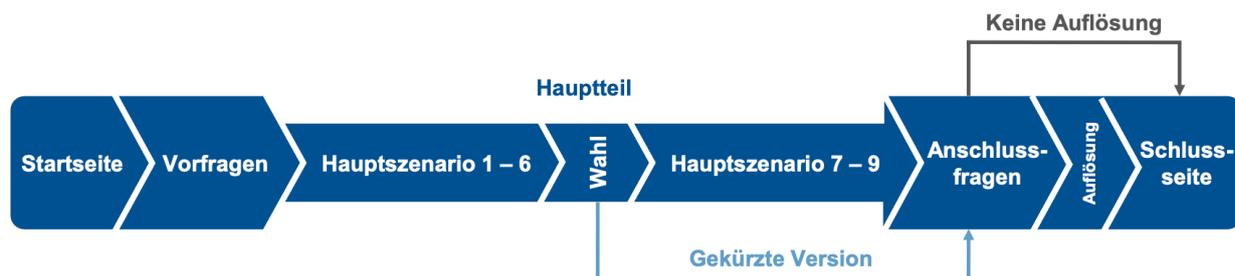


Abbildung 13: Ablauf der Teilnahme an der Onlinestudie zur Gebrauchstauglichkeit akustischer Signale. Nach der Bewertung von Signalen zu sechs Interaktionsszenarien konnte optional die Beantwortung von Fragen zu weiteren drei Szenarien gewählt werden. Die Auflösung der vormals nicht genannten Herkünfte der Geräusche konnte im vorletzten Schritt übersprungen werden. (Spitzer 2023, 45f)

Hauptfragen: Um die Gebrauchstauglichkeit der pro Szenario vorgestellten Geräuschalternativen abzufragen und zu vergleichen, wurde zunächst nach favorisierten (mittels einer interaktiven Rangliste) und ungeeigneten (mittels einer Multiple-Choice-Auswahl) Geräuschen gefragt. Anschließend wurde zur Bewertung des jeweils favorisierten Geräusches eine an den System Usability Scale (SUS) (Rauer 2011; Bundesministerium für Bildung und Forschung 2017) angelehnte Reihe an Fragen gewählt. Aufgrund der Gesamtlänge des Fragebogens und der begrenzten Zeit und Aufmerksamkeitsspanne der Teilnehmenden wurde der SUS reduziert, in dem die Fragen 4, 5 und 8 des SUS-Fragebogens außer Acht gelassen wurden. Der Einfluss dieser Reduzierung auf die Aussagekraft der Ergebnisse wurde als gering eingeschätzt, da diese Fragen insbesondere auf die Integration einer Funktion in ein Gesamtsystem sowie auf eine aktive Benutzung des Systems durch den Menschen abzielen, was im vorliegenden Fall als trivial betrachtet wird. (Spitzer 2023, 61ff)

4.4.2 Ergebnisse der Onlineumfrage

Die Stichprobengröße, also die Anzahl der abgeschlossenen Teilnahmen, betrug 124. Bei der soziodemografischen Einordnung ergab sich das zu erwartende Bild eines Überschusses an männlichen Teilnehmern, wie auch eine Häufung jüngerer und ingenieurwissenschaftlich gebildeter Personen. Dies liegt im universitären Kontext sowie im professionellen Umfeld der Vertretenden aus dem projektbegleitenden Ausschuss begründet. Die Statistik zu Geschlecht, Alter sowie Beruf findet sich in Abbildung 14.

Hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit der verschiedenen vorgeschlagenen Geräusche zeigte sich, dass bei älteren Teilnehmenden Geräusche von Haushaltsgeräten bzw. aus dem anderweitigen Alltag bevorzugt wurden. Jüngere Teilnehmende bevorzugten dagegen

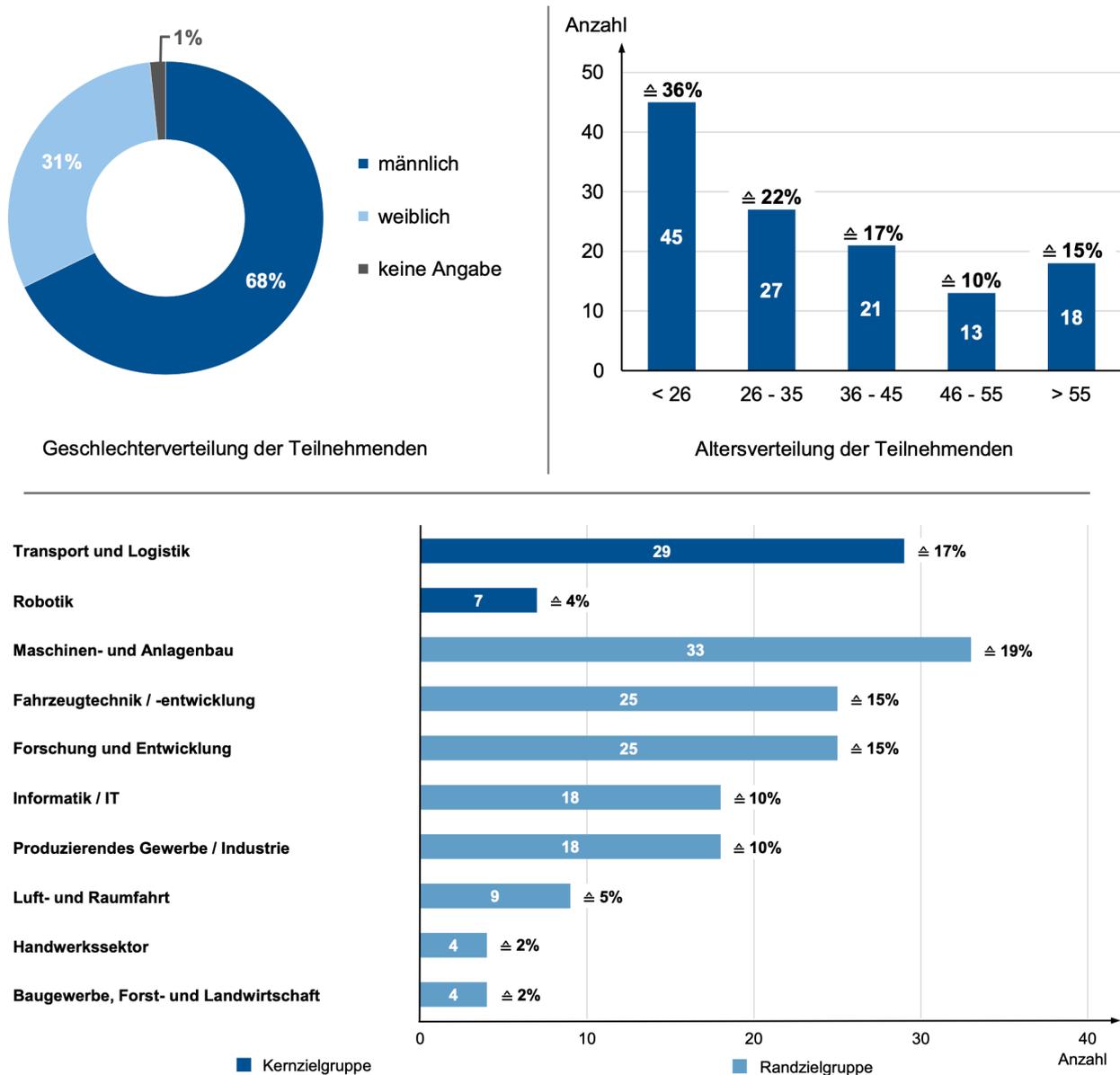


Abbildung 14: Soziodemografische Auswertung der Onlineumfrage zu akustischen Signalen. Links oben findet sich die Geschlechterverteilung, rechts oben die Altersverteilung sowie unten die berufliche Fachrichtung. (Spitzer 2023, S. 54)

Geräusche aus Science-Fiction-Filmen oder solche, die aus elektronischen Geräten wie Smartphones oder Elektroautos bekannt sind. Grundsätzlich ließ sich eine Tendenz zu Geräuschen aus dem Verkehr feststellen. Außerdem bevorzugten Personen mit professionellem Hintergrund in der Industrie überproportional solche Geräusche, die bereits bei anderen Maschinen und Anlagen verbreitet sind. Beispielhaft sei hier das Ergebnis der favorisierten Geräusche für Szenario 6 „Technisches Problem“ gezeigt. Zur Auswahl standen sechs Geräusche, welche in Abbildung 15 links gelistet sind. Im rechten Teil der Abbildung sind die Erst-, Zweit- und Drittplatzierungen der jeweiligen Geräusche sichtbar. Das Geräusch aus dem Verkehrsbereich (S6C) sowie das Geräusch aus dem Haushalt (S6B) wurden am häufigsten auf den ersten oder zweiten Platz gesetzt.

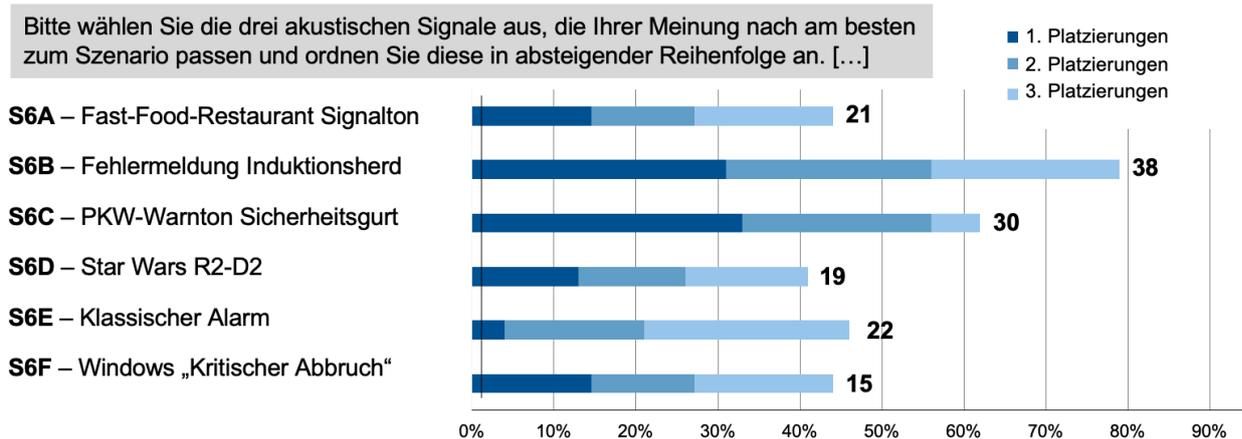


Abbildung 15: Ergebnisse der interaktiven Platzierung der favorisierten Geräusche für das Szenario "Technisches Problem". Am besten schneiden die Geräusche aus dem Verkehrsbereich (S6C) und aus dem Alltag (S6B) ab. (Spitzer 2023, S. 98)

Für die Auswertung der weiteren Situationen sowie die Beurteilung der Repräsentativität der Teilnehmendengruppe in Relation zur Zielgruppe der Beschäftigten in der Intralogistik sei auf die in Vorbereitung befindliche Veröffentlichung verwiesen.

4.4.3 Validierung der Umfrageergebnisse mit Domänenexperten

Die quantitativen Ergebnisse der Onlineumfrage wurden in Gesprächen mit mehreren Experten aus der Industrie reflektiert. Hierfür wurden Personen ausgewählt, die bei Herstellern von Flurförderzeugsystemen mit der Hardwareentwicklung oder der User-Interface-Gestaltung beschäftigt sind. Dabei wurden einerseits die Fragen zur Gebrauchstauglichkeit und relativen Bewertung der ausgewählten Signale beantwortet und andererseits die Resultate der anwenderdominierten Umfrage diskutiert.

Die Expertenmeinungen führten zusammen mit den quantitativen Ergebnissen der Umfrage zu der Erkenntnis, dass eine Aufteilung der Situationen und damit der Signale in grundlegende (ohne und interaktionsbezogene sinnvoll ist. Während bei grundlegenden Situationen einfache Signale, die sich stark an anderen Verkehrsmitteln orientieren, in der Umfrage gut abschnitten, konnten bei Situationen, in denen Mensch und Roboter gezielt interagieren, solche Signale punkten, die von Haushaltsgeräten oder der Pop-Kultur inspiriert waren. Details der Erkenntnisse befinden sich derzeit in Veröffentlichung (siehe Abschnitte 8.3 und 8.4).

4.5 Kommunikation von Schutzfeldverletzungen

Eine weitere Studie im Projekt befasste sich mit Intention 6 der Ontologie aus Kapitel 3.3, „You’re violating my safety area!“ bzw. „Du verletzt mein Schutzfeld!“. Eine entsprechende Veröffentlichung wird im August 2024 auf der Konferenz beim „22nd Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA)“ vorgestellt (Niessen et al. 2024b).

Hierbei gibt es verschiedene Definitionen des Schutzfelds. In der Studie wurden folgende Definitionen verwendet. Die hier verwendeten Zonen sind die Stop-Zone, in der der Roboter vollständig stoppt, und die Slow-Zone für den Bereich, in dem die Geschwindigkeit des Roboters reduziert wird. Eine Warnzone bzw. Detection Zone kann ebenfalls definiert werden, die das Verhalten des Roboters nicht verändert, sondern die Erkennung an die Umgebung signalisiert wird. Alle diese Zonen können den Sicherheitsbereich bilden, obwohl nicht alle Roboter alle drei Zonen implementiert haben. Abbildung 16 zeigt eine Übersicht der Zonen. (Niessen et al. 2024b)

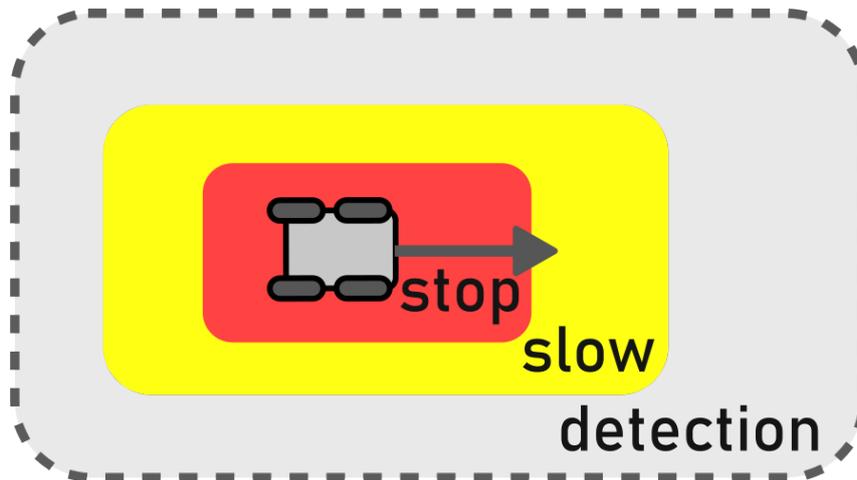


Abbildung 16: Verschiedene Bereiche von Schutzfeldern um mobile Roboter - aus Niessen et al. (2024b)

Normalerweise können Menschen nicht direkt erkennen oder wahrnehmen, ob sie sich einer dieser Zonen nähern oder sich darin befinden. Dieses mangelnde Bewusstsein kann zu einer verringerten Effizienz des Roboters führen, da die Geschwindigkeit des Roboters in der Nähe von Menschen reduziert wird (Karagiannis et al. 2022), und kann möglicherweise zu Frustration bei den Menschen führen. Dies betont die Notwendigkeit der Forschung, solche Schutzfelder besser zu kommunizieren. Verschiedene Herangehensweisen sind dafür denkbar.

4.5.1 Methodik

Unsere Studie umfasste einen mobilen Roboter (Innok Heros), der sich entlang vordefinierter Bahnen bewegte. Die Kommunikation des Sicherheitsbereichs wurde in vier Konzepten umgesetzt: akustisch, visuell, kombiniert akustisch-visuell und eine Baseline ohne zusätzliche Kommunikation. An der Studie nahmen 33 Probanden teil, wobei die erforderliche Teilnehmerzahl vorher mit dem G*Power-Tool berechnet wurde. Die visuellen und akustischen Konzepte wurden aufgrund ihrer Relevanz für AMR in der Intralogistik gewählt. Ein within-subject Design mit zufälliger Reihenfolge wurde verwendet, um Reihungseffekte zu minimieren und eine ausgewogene Bewertung der verschiedenen Konzepte zu gewährleisten.

Um die Auswirkungen dieser Ansätze zu messen, wurde eine Reihe von Metriken genutzt, die durch Fragebögen und Interviews erhoben wurden. Demografische Daten geben einen Überblick über das Alter der Teilnehmer, ihr Tätigkeitsfeld, ihre bisherige Erfahrung mit mobilen Robotern und ihr allgemeines Vertrauen in diese. Die Effektivität der Signale wird anhand der Wahrnehmbarkeit und Verständlichkeit per Fragebogen ermittelt. Zwei offene Fragen untersuchen, ob die Signale wahrgenommen werden und wie die Teilnehmer die Absicht des Roboters daraus interpretieren würden. Die anderen beiden Fragen bestimmen, wie gut die Grenzen des Sicherheitsbereichs des AMR wahrgenommen werden und inwieweit die Signale zum Verständnis der Sicherheitsbereichsgrenzen des Roboters beitragen. Der NASA TLX Fragebogen nach Hart und Staveland (1988) quantifiziert Faktoren wie Frustration und mentale Beanspruchung. Der standardisierte Fragebogen "Trust in Automation" (Körper 2018) bewertet das allgemeine Vertrauen in das System anhand von sechs Fragen. Die Teilnehmer werden zur Zuverlässigkeit des Systems, dessen Vorhersehbarkeit, dem Systemstatus und der Verständlichkeit der Systemreaktivität befragt. Zudem wird erfragt, ob dem System vertraut wird und ob es schwierig ist, die nächsten Aktionen des Systems vorherzusagen. Das Sicherheits- und Komfortgefühl wird anhand von zwei Fragen bewertet, wie sicher und wohl sich die Teilnehmenden während der Interaktion mit dem Roboter und dessen

Sicherheitsbereichsgrenzen fühlten. Alle nicht-offenen Fragen werden auf einer Fünf-Punkte-Likert-Skala gestellt, während qualitative Erkenntnisse durch offene Fragen gewonnen werden. Jedes Konzept kommuniziert die Verletzung von drei verschiedenen Zonen um den Roboter: Stop-Zone, Slow-Zone und Detection Zone. Die Größe dieser Zonen wird sorgfältig durch Stopp-Tests bestimmt und mit ausreichend großem Sicherheitszuschlag ergänzt, um einen Mindeststoppabstand zu gewährleisten. Dies basiert auf einer Methode der Firma SICK (Kidman 2021), die es AMR ermöglicht, ihre Schutzfeldgrenze zu berechnen.

Der Roboter stoppt in der Stop-Zone, wenn ein LIDAR-Sensor ein Hindernis erkennt. Eine Erkennung in der Slow-Zone löst eine Geschwindigkeitsreduzierung aus, und eine Erkennung in der Detection Zone aktiviert die Kommunikation des Sicherheitsbereichs.

Vier Konzepte wurden untersucht: das Basiskonzept, das nur implizite Kommunikation durch eine Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit beinhaltet (in allen vier Konzepten vorhanden); ein akustisches Konzept, das ausschließlich auf Tönen basiert; ein visuelles Konzept, das Projektionen verwendet; und ein kombiniertes Konzept, das beide vorherigen Konzepte vereint. Akustische Signale in den Erkennungs- und Slow-Zonen geben einen einzelnen Ton ab, während die Stop-Zone Dringlichkeit mit drei identischen Tönen betont. Tonhöhenänderungen durch Erhöhung der Abspielgeschwindigkeit der Töne beim Übergang von äußeren zu inneren Zonen unterstreichen die Dringlichkeit der Botschaft. Die Töne werden einmal ausgelöst, wenn die äußerste Grenze einer Zone unterschritten wird, und nicht erneut, bis eine andere Zone erkannt wird.

Die visuellen Signale bestehen aus roten/gelben Linien bzw. Bereichen, die mittels eines Kurzstanzprojektors vor dem Roboter auf den Boden projiziert werden, sowie projizierten Laserlinien an den Seiten und am Heck des Roboters (siehe Abbildung 17).

Bei Objekten außerhalb der Erkennungszone sind diese Projektionen und Laser inaktiv. Ein gelber Kreis wird angezeigt, wenn die Erkennungszone betreten wird. Zusätzlich erscheinen rote Laserlinien in einem Abstand von etwa 1 m vom Roboter, um die Stoppzone an den Seiten und hinter dem Roboter darzustellen. Die gleichen visuellen Hinweise werden in der Slow-Zone gezeigt. Beim Betreten der Stop-Zone erscheint ein kleinerer roter Kreis innerhalb des gelben Kreises Abbildung 17. Zusätzlich blinken die Laserlinien dreimal und projizieren dann kontinuierlich. (Niessen et al. 2024b)

Tabelle 14 zeigt die die Zonen, Geschwindigkeiten und Größen jeder Zone, sowie ein Diagramm, das die Umsetzung unserer Signalkonzepte veranschaulicht.

Tabelle 14: Übersicht der einzelnen Zonen mit implementierten Kommunikationskonzepten – aus Niessen et al. (2024b)

zone	radius	communication methods		
		visual	auditory	combined
stop	1.0 m	3x laser blinking, continuous mode, red and yellow safety area projection	3x beeping (900 Hz) upon entry	both
slow	1.6 m	Continuous laser, yellow safety area projection	1x beeping (850 Hz)	both
detection	2.4 m	Continuous laser, yellow safety area projection	1x beeping (800 Hz)	both

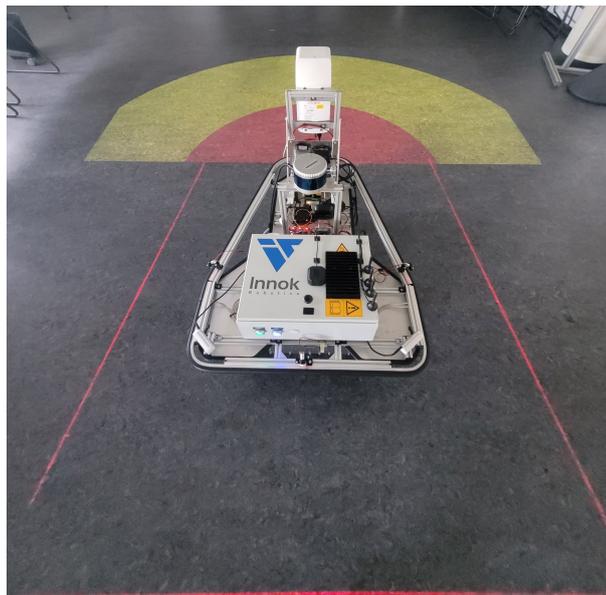


Abbildung 17: Der Roboter mit den implementierten visuellen Kommunikationsmitteln bei einer Verletzung der Stop-Zone. Laserlinien an den Seiten und am Heck, ein Projektor nach vorne gerichtet – aus Niessen et al. (2024b)

In Abbildung 18 sind die vordefinierten Bewegungsszenarien dargestellt. Das erste Szenario beinhaltet eine Person, die auf den Roboter zugeht und an ihm vorbeigeht. Im zweiten Szenario überquert eine Person den Weg des Roboters.

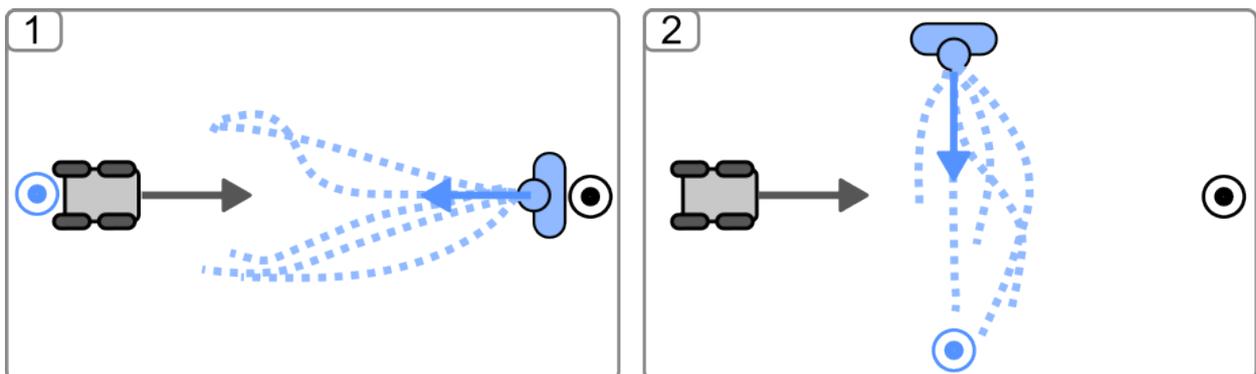


Abbildung 18: Aufbau der Interaktionsszenarien zu Schutzfeldverletzungen aus der Vogelperspektive. Frontal (1) und kreuzend (2). Die gezeigten Wege sind Beispiele, keine aufgezeichneten Trajektorien – aus Niessen et al. (2024b)

Die statistische Analyse der Studie wurde mit SAS Analytics durchgeführt und Nullhypothesentests (NHST) verwendet, um die Signifikanz zu bestimmen. Die Testergebnisse werden einschließlich Freiheitsgraden, Testwert, p-Wert und Effektgröße durch Cohens D berichtet.

4.5.2 Ergebnisse

Boxplots für jede Metrik und jedes Kommunikationskonzept sind in Abbildung 19 dargestellt.

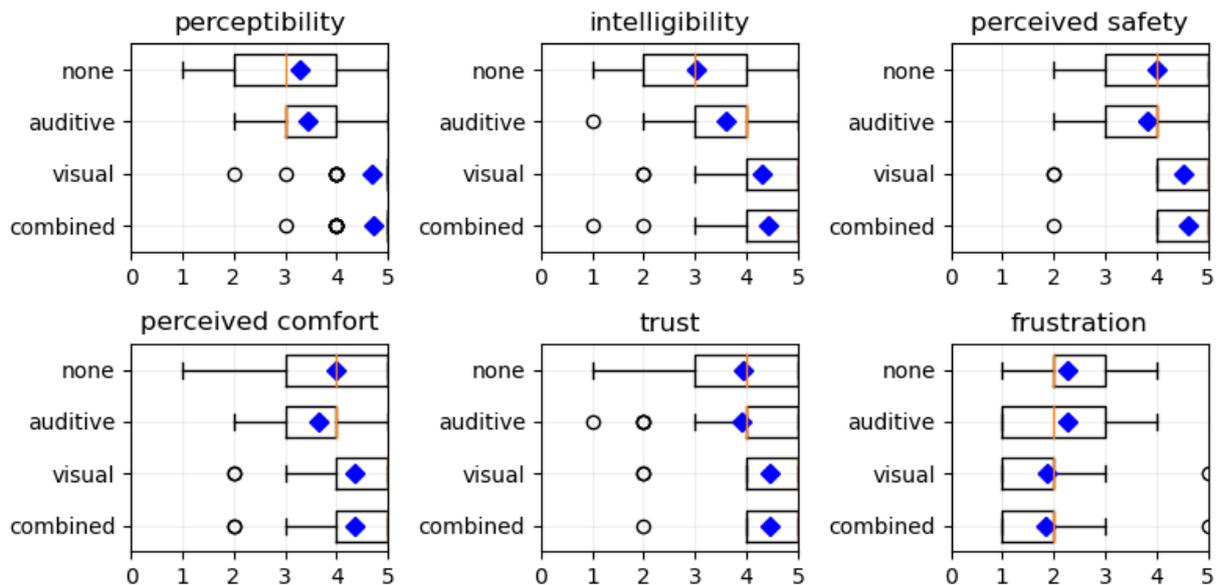


Abbildung 19: Boxplots aller vier Kommunikationskonzepte ("none" = Basislinie) für sechs verschiedene Metriken. Mittelwerte = Blaue Diamanten, Medianwerte = orangefarbene Linie – aus Niessen et al. (2024b)

Signaleffektivität

Die Effektivität der Signale wurde in verschiedenen Dimensionen untersucht: Die Wahrnehmbarkeit zeigte signifikante Unterschiede zwischen visuellen Signalen und der Basislinie ($p < 0.001$) sowie zwischen kombinierten Signalen und der Basislinie ($p < 0.001$). Die entsprechenden Cohens d Werte für visuell zur Basislinie ($d = 1.45$) und kombiniert zur Basislinie ($d = 1.57$) deuten auf große Effektgrößen hin ($d > 0.8$).

Bei der Verständlichkeit wurden signifikante Unterschiede zwischen visuellen Signalen und der Basislinie ($p < 0.001$) sowie zwischen kombinierten Signalen und der Basislinie ($p < 0.001$) gefunden. Mit $d = 1.09$ für visuell zur Basislinie und $d = 1.16$ für kombiniert zur Basislinie zeigen die jeweiligen Cohens d ebenfalls große Effektgrößen.

Das akustische Konzept unterschied sich weder in der Wahrnehmbarkeit noch in der Verständlichkeit signifikant ($p > 0.05$), und beide Vergleiche mit den visuellen und kombinierten Konzepten ergaben Cohens d Werte unter 0.5, was auf kleine Effektgrößen hinweist. Die korrekte Wahrnehmung der Signale betrug 93.9% für akustische Signale, 90.9% für visuelle Signale, 78.8% für kombinierte Signale und 39.3% für das Basiskonzept. Die korrekte Interpretation der Signale betrug 87.9% für kombinierte Signale, 78.8% für visuelle Signale, 75.8% für akustische Signale und 45.5% für die Basislinie. (Niessen et al. 2024b)

Sicherheit und Komfort

Signifikante Unterschiede in der wahrgenommenen Sicherheit gab es zwischen den visuellen und den Basiskonzepten ($p < 0.05$) sowie zwischen den kombinierten und den Basiskonzepten ($p = 0.01$). Cohens d Werte zeigten mittlere Effektgrößen: $d = 0.53$ (visuell zur Basislinie) und $d = 0.66$ (kombiniert zur Basislinie). Auch der wahrgenommene Komfort unterschied sich signifikant zwischen visuellen und Basiskonzepten ($p < 0.01$) mit einer kleinen Effektgröße ($d = 0.39$). Keine signifikanten Unterschiede und nur kleine Effektgrößen wurden in der wahrgenommenen Sicherheit mit akustischer Kommunikation im Vergleich zur Basislinie gefunden ($p > 0.05$, $d < 0.5$), ebenso wenig im wahrgenommenen Komfort bei akustischer und kombinierter Kommunikation im Vergleich zur Basislinie ($p > 0.05$, $d < 0.5$).

Die mentale Belastung, gemessen nach NASA TLX, zeigte keine signifikanten Unterschiede ($p > 0.05$) zwischen den Konzepten, während die Frustration bei akustischer Kommunikation signifikant höher war als bei visueller/kombinierter Kommunikation (beide $p < 0.05$). (Niessen et al. 2024b)

Vertrauen

Bezüglich des bevorzugten Kommunikationskonzepts im Hinblick auf das Vertrauen in das System wurden signifikante Unterschiede zwischen visuellen und Basiskonzepten ($p < 0.05$) sowie zwischen kombinierten und Basiskonzepten ($p < 0.05$) festgestellt. Die entsprechenden Cohens d Werte für das Vertrauen waren $d = 0.56$ (visuell zur Basislinie) und $d = 0.59$ (kombiniert zur Basislinie), was auf mittlere Effektgrößen hinweist.

Der Vergleich der allgemeinen Vertrauensniveaus vor und nach dem Experiment zeigte einen signifikanten Anstieg des Vertrauens ($p < 0.001$). Die Cohens d Werte deuten jedoch nur auf kleine Effekte hin, mit $d = -0.43$. (Niessen et al. 2024b)

Interviews

Erkenntnisse aus den offenen Fragen ergaben, dass die Teilnehmer akustische Signale in der Mensch-Roboter-Interaktion als herausfordernd, gelegentlich nicht intuitiv und manchmal unklar empfanden. Das Auftreten unerwarteter akustischer Signale beim Verlassen einer geschützten Zone verursachte bei $n = 3$ Testpersonen ein Gefühl des Unbehagens. Die Nutzung akustischer Signale als Warnungen führte nicht zu einem konsistenten Verständnis und trug bei $n = 8$ Teilnehmern zu einem Gefühl der Unsicherheit bei. $N = 2$ Teilnehmer hatten Schwierigkeiten, die Bedeutung der Farbmarkierungen zu interpretieren; sie äußerten jedoch, dass klare projizierte Bodenlinien hilfreich für das Verständnis waren.

Akustische Signale erwiesen sich als effektiv, um die Aufmerksamkeit von $n = 6$ Testpersonen zu erregen, unterstützt durch visuelle Projektionen, die halfen, die Entfernung des Roboters einzuschätzen. Teilnehmer erwähnten, dass akustische Hinweise, selbst wenn sie abgewandt waren, ihre Aufmerksamkeit auf sich zogen und sie dazu veranlassten, visuelle Hinweise schnell zu erfassen und sich der Position des Roboters bewusst zu bleiben. (Niessen et al. 2024b)

4.5.3 Diskussion

Die Hauptfunde unserer Studie beleuchten die vergleichende Wirksamkeit von visuellen und akustischen Hinweisen sowie deren Kombination. Wir stellten eine klare Präferenz für visuelle Hinweise gegenüber akustischen in Bezug auf die Wahrnehmung von Sicherheit und Komfort fest.

Als die beiden Modalitäten kombiniert wurden, zeigten sie eine ähnlich hohe wahrgenommene Sicherheit und Komfort wie bei rein visueller Kommunikation. Diese Kombination schien das Problem zu lindern, dass die Kommunikation als störend oder unklar wahrgenommen wird, was oft mit rein akustischen Signalen verbunden war. Die Wahl zwischen rein visuellen und kombinierten Signalen zur Kommunikation des Sicherheitsbereichs von AMR könnte von kontextuellen Faktoren abhängen, wie dem Umgebungsgeräuschpegel, der Häufigkeit der Signale während eines Arbeitstages und der Fähigkeit, Geräusche in einer bestimmten Umgebung wahrzunehmen.

Unsere Studie zeigt mehrere Möglichkeiten, die sich aus der Integration von visuellen oder akustischen Hinweisen im Kontext der Sicherheitskommunikation für AMR ergeben. Die Kommunikation von Sicherheitsbereichen und -verletzungen durch eine Kombination aus visuellen und akustischen Signalen hat das Potenzial, das Verständnis, die Akzeptanz und das

Vertrauen der Nutzer zu fördern, was sich in der erhöhten Vertrauensbewertung nach den Läufen zeigte. Darüber hinaus könnte diese Integration zur Verbesserung der Workflow-Effizienz in der Mensch-Roboter-Interaktion beitragen. Roboter müssten bei Begegnungen möglicherweise weniger anhalten, wenn ihre Grenzen den Menschen in ihrer Umgebung bekannt und wahrnehmbar sind. Dies könnte wiederum zu reibungsloseren und effizienteren Interaktionen führen.

Trotz dieser Möglichkeiten müssen bestimmte Einschränkungen der Studie berücksichtigt werden. Insbesondere gab es eine Verzögerung von etwa 0,3-0,5 Sekunden zwischen der Erkennung eines Objekts und den akustischen Hinweisen, was für ein solches Kommunikationssystem nicht ideal war und die Unsicherheit im Zusammenhang mit dem akustischen System erhöht haben könnte. Ein Argument gegen diese Theorie wäre die gleichwertige Leistung des kombinierten Kommunikationskonzepts im Vergleich zum rein visuellen. Zudem ist zu beachten, dass unsere Untersuchung auf der Prüfung von nur zwei spezifischen Implementierungen der akustischen und visuellen Kommunikation basierte. Daher könnte die Verallgemeinerbarkeit unserer Ergebnisse auf andere Implementierungen begrenzt sein, was die Notwendigkeit weiterer Forschung zur Erkundung der breiteren Anwendbarkeit dieser Ergebnisse betont.

Abschließend unterstreicht unsere Forschung das Potenzial der Integration visueller oder kombinierter audio-visueller Hinweise für eine effektive Sicherheitsbereichskommunikation in AMR. Durch das Verständnis der Präferenzen und Nuancen, die mit jeder Modalität und ihrer Kombination verbunden sind, können wir fundierte Entscheidungen bei der Gestaltung von Kommunikationssystemen treffen, die das Vertrauen und die Transparenz dieser Systeme erhöhen und zur erfolgreichen Integration von AMR in industrielle Umgebungen beitragen. (Niessen et al. 2024b)

4.6 Fusion zum RoboLingo Interaktionsbaukasten

Eine der letzten Studie im Projekt befasste sich mit der Synthese des Interaktionsbaukastens mithilfe der Ergebnisse der vorhergehenden Studien, sowie Erkenntnissen aus der Literatur.

Die Wahl geeigneter Kommunikationsmittel in der Intralogistik ist eine komplexe Aufgabe, die von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird. Die Interpretation von Kommunikationsmitteln hängt unter anderem vom Vorwissen, Arbeitsumfeld, Kulturkreis, der Persönlichkeit und aktueller Stimmung ab. Diese Vielfalt erschwert die Auswahl verständlicher Signale. Wichtige Aspekte sind nach Terefenko (2024):

- **Normen und Richtlinien:** In der Intralogistik spielen Normen und Richtlinien eine Rolle bei der Zuordnung von Kommunikationsmitteln zu bestimmten Intentionen. Obwohl nicht alle Anwendungsfälle abgedeckt sind, bieten sie dennoch Orientierung. Während einige Normen indirekt in die einzelnen Umsetzungen berücksichtigt werden, liegt der Fokus auf einem verständlichen und nachvollziehbaren Konzept. Die strikte Einhaltung gesetzlicher Normen wird als zweitrangig betrachtet, da wissenschaftliche Erkenntnisse und Effizienz im Vordergrund stehen.
- **Anwendungssituation des AMRs:** Je nachdem, ob ein Roboter autonom arbeitet oder mit Menschen zusammenarbeitet, variiert der Kommunikationsbedarf. Die Wahl des Mittels sollte an die spezifische Situation angepasst werden.

- **Wirtschaftlichkeit:** Neben Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit ist auch die Kosteneffizienz der Kommunikationsmittel wichtig. Unternehmen priorisieren oft Sicherheit und Kosten.
- **Forschung und Innovation:** Die wissenschaftliche Forschung bietet viele Ansätze für visuelle Kommunikationsmittel wie LEDs und Lampen sowie neue Ideen wie Objektprojektionen. Akustische Signale sind weniger erforscht und müssen sorgfältig abgewogen werden.
- **Individuelle Unternehmenspraxis:** Viele Unternehmen verwenden bereits eigene Kommunikationssignale für ihre AMRs. Ein allgemeingültiges Konzept ist daher schwer zu finden.
- **Praktische Anwendung und Evaluation:** Die tatsächliche Wirksamkeit eines Kommunikationskonzepts zeigt sich erst in der Praxis. User-Experience-Versuche sollten auf realen Erfahrungen basieren.

Für die in Kapitel 3.3 identifizierten Kommunikationsabsichten wurden schließlich den einzelnen Intentionen konkrete Umsetzungen mit Kommunikationsmitteln zugeordnet. Dabei wurden die eben genannten Einflussfaktoren soweit möglich berücksichtigt.

4.6.1 Übersicht Kommunikationsmittel

In diesem Kapitel werden die Kommunikationsmittel für die zwölf Intentionen vorgestellt, die auf einer vielfältigen Entscheidungsbasis aufbauen. Dazu gehören die bisher in Kapitel 4 ausgeführten Vorarbeiten aus dem RoboLingo-Projekt, externe Literatur und wissenschaftliche Forschungsprojekte sowie Erkenntnisse aus einem Workshop im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses (im Folgenden als PA-Workshop bezeichnet). Die gewählten Mittel sind visuelle und akustische Signale, die in der Intralogistik zum Teil bereits verwendet werden. Akustische Signale sollten jedoch nur dort eingesetzt werden, wo sie nützlich sind, um beispielsweise auch außerhalb des Sichtfelds Aufmerksamkeit zu erregen. So werden Störeffekte und die allgemeine Geräuschkulisse minimiert. Non-verbale Signale beziehungsweise „non-linguistic utterances“ (NLUs) stehen im Fokus, also gesprochene Worte vermieden, da sich diese als ungünstig erwiesen haben (Cha et al. 2018). Die verwendeten Kommunikationsmittel umfassen Lautsprecher, ein LED-Band, Unterbodenbeleuchtung und die Projektion eines von Linde Material Handling als BlueSpot™ bezeichneten Lichtpunkts (Linde 2022). In Abbildung 20 sind die im Interaktionsbaukasten verwendeten Kommunikationsmittel visualisiert. (Terefenko 2024)

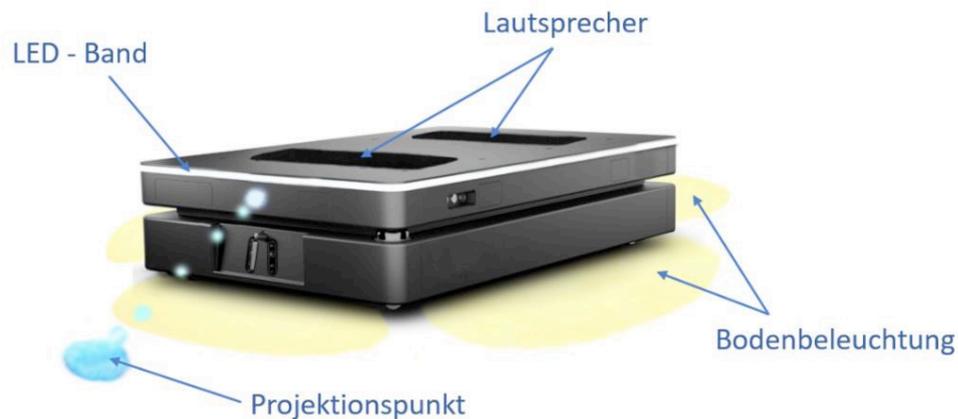


Abbildung 20: Visualisierung der im Interaktionsbaukasten verwendeten Kommunikationsmittel (Terefenko 2024)

4.6.2 Signale der einzelnen Intentionen

Der Baukasten wird hier beschrieben, wie er in der Evaluierungsstudie umgesetzt wurde. Der finale Baukasten inklusive der in der Evaluierung gewonnenen Erkenntnisse ist in Kapitel 5.4 zu finden.

Intention 1: „I want to move soon.” / „Ich möchte mich bald losbewegen.”

Die erste Intention wurde durch ein grünes Aufleuchten des LED-Bandes und den Fahrbereitschaftssound eines Elektroautos umgesetzt (siehe Abbildung 21). Dieser Sound wurde in leicht bearbeiteter Form aus der Studie von Spitzer (2023) übernommen, in der er das beste Ergebnis erzielte. Das Aufleuchten des Bandes repräsentiert den Startprozess oder das Bereitwerden des AMRs. Die Farbwahl zwischen Grün und Weiß wurde diskutiert, da beide Farben positiv bzw. neutral konnotiert sind. Letztendlich wurde Grün in Kombination mit einer der Optionen für Intention 2 gewählt. Die Umsetzung von Intention 1 wurde ohne großen Kommentar als passend betrachtet. (Terefenko 2024)



Abbildung 21: Visualisierung zur Intention 1 "Ich möchte mich bald losbewegen."

Intention 2: „I am moving autonomously.” / „Ich bewege mich autonom.“

Die zweite Intention beinhaltete ursprünglich zwei Optionen, die bis zuletzt beibehalten und im Fragebogen abgefragt wurden. Bei der ersten Option leuchtet das LED-Band durchgehend grün, begleitet von einem blau-grünen Projektionspunkt in Fahrtrichtung des AMRs (siehe Abbildung

22). Die zweite Option zeigt vorne zwei weiße und hinten zwei rote Balken am LED-Band (siehe Abbildung 23). Beide Varianten werden akustisch durch das Fahrgeräusch eines E-Autos begleitet, wobei höhere Geschwindigkeiten zu höheren Tonhöhen führen. Das Fahrgeräusch wurde aus der Studie von Spitzer (2023) übernommen.

Die Überlegung zum rot-weißen Signal des LED-Bands ist dem PKW entlehnt und vielen Menschen als Fahrtrichtungssignal bekannt. Es wird auch bei einigen AMRs verwendet. Allerdings ist es möglicherweise nicht so eindeutig wie die erstgenannte Option mit dem zusätzlichen Projektionspunkt. Dieser Punkt wird in der Intralogistik bereits genutzt und ist Mitarbeitern der Branche vertraut. Eine Projektion ermöglicht eine vorzeitige "Ankündigung" des AMRs, z. B. wenn es aus einem Lagergang in eine Kreuzung einfährt. Außerdem unterscheidet sich die Kommunikationsmethode von der eines PKWs, um Verwirrungen zu vermeiden.

Im PA-Treffen gab es viel Diskussion über die Fahrtrichtung bei bi- oder omnidirektionalen Fahrzeugen. Aufgrund zusätzlicher Komplikationen wurde beschlossen, sich auf unidirektionale AMRs zu beschränken. Die Einschätzung der beiden Kommunikationsmethoden durch die Evaluierungsteilnehmer bleibt abzuwarten. Das akustische Signal wurde beibehalten, obwohl es ein Störpotenzial aufweist, insbesondere in geräuschbelasteten Umgebungen. Eine Evaluierung kann neue Erkenntnisse liefern. (Terefenko 2024)



Abbildung 22: Visualisierung zur Intention 2 " Ich bewege mich autonom.", Variante 1



Abbildung 23: Visualisierung zur Intention 2 " Ich bewege mich autonom.", Variante 2 vorne/hinten

Intention 3: „I will turn/change my trajectory in this way.“ / „Ich werde abbiegen/meine Trajektorie in diese Richtung ändern.“

Für die Intention 3 wurde ein orangefarbenes Blinken des LED-Bandes in den seitlichen Ecken der Abbiegerichtung gewählt. Zusätzlich wird ein seitlich geschwenkter Projektionspunkt sowie ein akustisches Blinksignal verwendet, ähnlich dem im Innenraum eines blinkenden PKWs hörbaren Signal (siehe Abbildung 24). Das akustische Signal hat eine geringere Priorität, da es wichtiger erschien, visuell zu signalisieren, wohin sich der AMR bewegen möchte. Das gewählte Geräusch wurde aus Spitzers Arbeit entnommen (Spitzer 2023).

Das visuelle Signal orientiert sich an dem aus PKWs und anderen AMR-Umsetzungen bzw. Forschungsprojekten bekannten blinkenden Lichtsignal (Fernandez et al. 2018). Zusätzlich wird

der Projektionspunkt als visuelles Mittel am Boden eingesetzt. Die Farbe Orange ist allgemein geläufig für Warnungen oder hinweisende Informationen, beispielsweise durch das Blinken eines PKWs. Zudem wird der Farbe Orange nach Betella et al. (2013) ein stimulierender Effekt zugeschrieben, der in dieser Situation erwünscht ist.

Im PA-Workshop wurden auch Überlegungen zur Bi-/Omnidirektionalität angestellt, die jedoch aufgrund der Festlegung auf unidirektionale Fahrzeuge in dieser Studie nicht weiter vertieft wurden. Außerdem wurde auf die Bedeutung der Begriffe "Abbiegen" und "Spurwechsel" hingewiesen, da eine Unterscheidung im Kommunikationssignal sinnvoll sein könnte. Dennoch wurde letztlich für beide Interpretationen des Begriffs "Trajektorienänderung" ein gemeinsames Signal gewählt, da eine zu starke Aufspaltung der Intentionen die Verständlichkeit beeinträchtigen würde. (Terefenko 2024)



Abbildung 24: Visualisierung zur Intention 3 " Ich werde abbiegen/meine Trajektorie in diese Richtung ändern."

Intention 4: „I have a priority task.” / „Ich führe eine Aufgabe mit Priorität aus.“

Die Intention 4, die während der normalen Fahrt des AMRs ohne akustisches Signal nur durch ein dauerhaftes Blinken des grünen LED-Bandes signalisiert wird (siehe Abbildung 25), wurde intensiv diskutiert. Einige Lagermitarbeiter könnten davon profitieren, um zu erkennen, dass der AMR eine wichtige Aufgabe erfüllt und ihnen nicht im Weg steht. Andererseits argumentiert man, dass die Priorität der menschlichen Mitarbeiter nicht klar wird. Die vorgeschlagene Umsetzung verzichtet auf akustische Signale, um die Kommunikation einfach zu halten. Stattdessen ermöglicht das visuelle Signal eine selbstinitiierte Überprüfung der Aufgabenpriorität durch einen Blick. Obwohl einige Bedenken hinsichtlich der Subtilität dieses Signals aufkamen, wurde es aufgrund der geringen Relevanz der Intention dennoch beibehalten. (Terefenko 2024)



Abbildung 25: Visualisierung zur Intention 4 " Ich führe eine Aufgabe mit Priorität aus."

Intention 5: „This is my safety area.” / „Dies ist mein Schutzfeld.”

Für Intention 5 wurde eine gelbe Unterbodenbeleuchtung auf allen vier Seiten des AMRs ohne zusätzliches akustisches Signal gewählt (siehe Abbildung 26). Die genaue Realisierung der Beleuchtung als Laser oder Lampe ist noch offen. Da es sich nicht um eine Gefahren- oder Problemsituation handelt, wurde auf eine akustische Umsetzung verzichtet. Die Farbe Gelb wurde aufgrund ihrer Konnotation mit Warnsignalen, beispielsweise an Baustellenleuchten im Straßenverkehr, gewählt. Auch kann die Farbe als warm und dementsprechend stimulierend angesehen werden. In der vorläufigen Version enthielt diese Umsetzung zunächst nur eine Unterbodenbeleuchtung auf der linken und rechten Seite des AMRs. Im PA-Workshop wurde jedoch beschlossen, die "bestmögliche" Lösung für eine Intention auszuprobieren und später wirtschaftlichere Alternativen zu erwägen. Daher wurden auch vor und hinter dem AMR-Bodenbeleuchtungen in das Konzept eingeführt. (Terefenko 2024)



Abbildung 26: Visualisierung zur Intention 5 " Dies ist mein Schutzfeld."

Intention 6: „You are in my/violating my safety area.” / „Du bist in meinem Schutzfeld./Du verletzt mein Schutzfeld.”

Für die sechste Intention wurde eine rote Bodenbeleuchtung zusätzlich zu einem roten Abschnitt des LED-Bands an der Stelle, an der die Störung auftritt, gewählt (siehe Abbildung 27). Die Studie von Spitzer (2023, S. 92) diente als Quelle für das Piepen eines PKW-Einparkassistenten in dieser Situation. Während die Unterbodenbeleuchtung und das LED-Band im Fall einer Warnfeldbeleuchtung statisch leuchten, blinken sie bei einer Verletzung des Schutzfeldes synchron. Ursprünglich war nur die Bodenbeleuchtung auf der Seite der Verletzung als visuelles Kommunikationsmittel vorgesehen, aber nach einer gewinnbringenden Diskussion im Projektausschuss wurde das LED-Band hinzugefügt und der gesamte Unterboden beleuchtet. Ähnlich wie bei Intention 5 wurde das ursprüngliche Konzept hier im Sinne einer intensiveren und eindeutigeren Kommunikationsmethode erweitert. Es wurde auch erwogen, einen "Mute-Button" einzubauen, um die Lärmbelastung zu reduzieren, wenn das Schutzfeld möglicherweise bewusst für längere Zeit verletzt werden muss. Diese Idee wurde vorerst verworfen, da das Ziel des Baukastens darin besteht, Signale für die Umsetzung der Intentionen zu empfehlen, die auch bei häufigerem oder regelkonformem Auftreten der Situationen nicht stummgeschaltet werden "müssen", sondern der Situation entsprechend "erträglich" sind. (Terefenko 2024)



Abbildung 27: Visualisierung zur Intention 6 " Du bist in meinem Schutzfeld./Du verletzt mein Schutzfeld."

Intention 7: „I’m waiting for your input/action.” / „Ich warte auf deinen Input.”

Die Intention 7 wurde in einer Studie mithilfe eines blau pulsierenden LED-Bandes (siehe Abbildung 28) und eines Haushaltsgeräte-Pieptons alle 10-15 Sekunden umgesetzt. Diese Kombination erwies sich als angemessen, insbesondere in Kombination mit Intention 8. Die Farbe Blau wurde gewählt, da sie laut Normung Handeln erzwingt. Das pulsierende Leuchtmuster simuliert ein „Anstoßen“ oder „Antippen“ und erregt Aufmerksamkeit auf eine mildere Art als Blinken. Die mehrfache Wiederholung der Pieptöne wurde ebenfalls als zielführend betrachtet, basierend auf einer Studie von Pelikan und Jung (2023). Dort wurde festgestellt, dass die Verwendung mehrerer Töne hintereinander Menschen im Umfeld zu einer Reaktion oder Bewegung anregen kann. (Terefenko 2024)



Abbildung 28: Visualisierung zur Intention 7 "Ich warte auf deinen Input.", das LED-Band pulsiert blau

Intention 8: „I have a problem, please help me!” / „Ich habe ein Problem, bitte hilf mir!”

Für Intention 8 wurde das Signal aus Intention 7 leicht modifiziert: Das LED-Band pulsiert nun rot statt blau (siehe Abbildung 29), und der Piepton ertönt alle 7-10 Sekunden. Beide Intentionen zielen darauf ab, die Aufmerksamkeit eines Lagermitarbeiters auf den AMR zu lenken, wenn Hilfe benötigt wird. Die Farbwahl (Rot) soll die Dringlichkeit betonen, ähnlich wie bei einer Notlage. Baraka et al. (2016) verwenden ebenfalls eine rote Leuchtdynamik für eine ähnliche Situation. Das kürzere Intervall der Pieptöne in Intention 8 signalisiert zusätzlich erhöhte Dringlichkeit. Während des PA-Treffens lag der Fokus bei den Intentionen 7 und 8 auf dem Quittieren – dem Fortsetzen der normalen AMR-Aufgabe nach Behebung des Problems durch einen Mitarbeiter. Die Frage, ob der AMR automatisch erkennt, wann er weitermachen kann, wird hier jedoch nicht behandelt, da dies die Funktionalität des AMRs betrifft. (Terefenko 2024)



Abbildung 29: Visualisierung zur Intention 8 "Ich habe ein Problem, bitte hilf mir!", das LED-Band pulsiert rot

Intention 9: „I’m waiting for a vehicle/AMR/...” / „Ich warte auf ein Fahrzeug/AMR/...”

Für Intention 9 wurde ein selektives Leuchten des LED-Bandes gewählt: ringsum in Weiß und in den Ecken in Grün (siehe Abbildung 30). Ein akustisches Signal wurde bewusst nicht eingesetzt. Die Idee dahinter ist, dass bereits aufmerksame Lagermitarbeiter durch das Lichtsignal erkennen können, dass der Roboter zwar pausiert, aber kein Handlungsbedarf besteht. Gleichzeitig wird

die Aufmerksamkeit anderer Mitarbeiter nicht unnötig auf den AMR gelenkt, da kein akustisches Signal vorhanden ist. Das visuell unauffällige Leuchten des LED-Bandes in den Farben Weiß und Grün fungiert als Kombination der Signale "normal" und "neutral" (DIN EN 60073:2002). (Terefenko 2024)



Abbildung 30: Visualisierung zur Intention 9 " Ich warte auf ein Fahrzeug/AMR/..."

Intention 10: „Warning! I can’t see you. Be cautious around me!” / „Achtung! Ich kann dich nicht sehen. Sei vorsichtig um mich herum.“

Die Umsetzung von Intention 10 erfolgt durch ein abwechselndes gelbes Blinken des Schutzfeldes vorne-hinten und rechts-links (siehe Abbildung 31). Zusätzlich rotiert im LED-Band ein gelber Streifen, und alle 10-15 Sekunden ertönt ein Warngeräusch in Form eines PKW-Gurtwarntons. Dieser Ton wurde aus Spitzer (2023) Arbeit zur Überlastsituation auf dem AMR entnommen und eignet sich auch für die Warnung gemäß Intention 10. Die Farbe Gelb wurde gewählt, da sie einen normalen Zustand signalisieren kann, z. B. wenn Umgebungssensoren ausnahmsweise ausgeschaltet sind. Zudem unterstützt diese warme Farbe den anregenden Effekt der kommunikativen Umsetzung (Betella et al. 2013). Ursprünglich war ein rotierendes gelbes Licht im LED-Band und ein rechts-links blinkendes Schutzfeld vorgesehen, aber nach dem PA-Treffen wurde beschlossen, die Bodenbeleuchtung auf alle Seiten des AMRs auszuweiten und die Seitenwechsel-Dynamik beizubehalten. (Terefenko 2024)



Abbildung 31: Visualisierung zur Intention 10 " Achtung! Ich kann dich nicht sehen. Sei vorsichtig um mich herum.", die gelben Streifen auf dem LED-Band rotieren um den AMR

Intention 11: „I am posing a danger/threat.” / „Ich stelle eine Gefahr/Bedrohung dar.“

Für Intention 11 wurde ein akustischer Alarmton ("Industrie-Notstopp") in Kombination mit der Sprachausgabe "I am posing a danger" gewählt. Gleichzeitig rotiert ein roter Farbstreifen im LED-Band, und die Schutzfeldbeleuchtung blinkt abwechselnd vorne-hinten rot und links-rechts gelb

(siehe Abbildung 32). Die Sprachausgabe dient der zusätzlichen Eindeutigkeit, da diese Situation als besonders sicherheitskritisch betrachtet wird, potenziell mit Gefahr für menschliche Mitarbeiter. Die Farbe Rot im LED-Band signalisiert den Gefahrzustand. Zusätzlich simuliert der rotierende Farbblock im LED-Band eine Rundumleuchte. (Terefenko 2024)

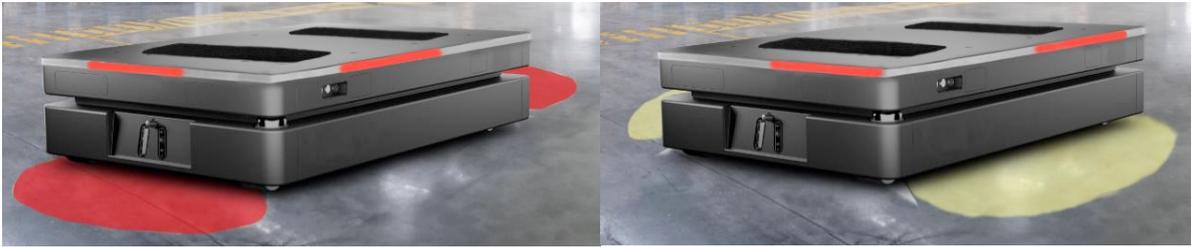


Abbildung 32: Visualisierung zur Intention 11 "Ich stelle eine Gefahr/Bedrohung dar.", die Unterbodenbeleuchtung wechselt rot/gelb, die roten Streifen rotieren auf dem LED-Band um den AMR

Intention 12: „Emergency status in the plant.” / „Notfallzustand im Betrieb.”

Für Intention 12 wurde ähnlich wie bei Intention 9 kein akustisches Signal gewählt, sondern ein weiß leuchtendes LED-Band mit roten Ecken (siehe Abbildung 33). Die Farbe Rot wurde aufgrund der Gefahrensituation als angemessen betrachtet (DIN EN 60073:2002). Ursprünglich sollte Intention 12 genau wie Intention 11 aufgebaut sein, jedoch mit dem Zusatz einer Sprachausgabe des Textes "Emergency Status in the Plant". Dieses Konzept wurde jedoch verworfen, da die Diskussion aufkam, wie stark der AMR tatsächlich an der Signalgebung beteiligt sein sollte, wenn ein Notfallzustand im Lager herrscht. Da der Roboter selbst nicht für den Notfall verantwortlich ist und keine direkte Verbindung dazu hat, könnte eine zu starke Fokussierung auf den AMR den eigentlichen Alarm im gesamten Lager (z. B. Feuersalarm) überdecken oder ablenken. Obwohl es grundsätzlich sinnvoll erscheint, den AMR den Notfall signalisieren zu lassen, wurde entschieden, die Signale für Intention 12 schlicht zu halten, um in einer Notfallsituation keine fehlgeleitete Aufmerksamkeit auf den AMR zu lenken. (Terefenko 2024)



Abbildung 33: Visualisierung zur Intention 12 "Notfallzustand im Betrieb."

5 Evaluierung des Baukastens

Die abschließende Studie im RoboLingo Projekt hatte nun das Ziel, den synthetisierten Interaktionsbaukasten zu evaluieren.

Nach der Konzipierung des Kommunikationskonzepts für AMR steht die praktische Überprüfung und Bewertung an. Hierfür werden "shop-floor"-Mitarbeiter, die bereits Erfahrung mit AMR haben, befragt. Die Expertise von AMR-Entwicklern wird dabei klar von der der "shop-floor"-Mitarbeiter unterschieden. Der Evaluierungskreis umfasst Mitarbeiter von Unternehmen des RoboLingo-Projektausschusses, die AMR in Logistik- und Produktionshallen einsetzen und zum Teil auch

selbst herstellen. Ziel ist es, die Effektivität und Verständlichkeit der gewählten Kommunikationsmittel zu bewerten und abschließende Empfehlungen für den Interaktionsbalken zu geben. (Terefenko 2024)

5.1 Vorgehen

Ein Online-Fragebogen wurde in LimeSurvey erstellt, um die Kommunikation in den verschiedenen Interaktionsszenarien von AMRs mit Personen zu bewerten. Vor Durchführung wurde ein Ethik-Votum der Ethikkommission der TUM eingeholt. Der Fragebogen begann mit einer Einführung, Datenschutzerklärung und Einwilligungserklärung. Es wurden demografische Informationen erfragt und dann die Hauptbewertung eingeleitet. Die Teilnehmer bewerteten die verschiedenen Kommunikationsmethoden der AMRs aus Kapitel 4.6.2. Jede Intention wurde einzeln bewertet, wobei die Relevanz der Intention und die Qualität der Kommunikation nach verschiedenen Kriterien beurteilt wurden (Terefenko 2024):

1. **Relevanz der Intention:** Wie wichtig ist es, dass der AMR diese Intention kommunizieren kann?
2. **Verständlichkeit:** Wie klar und eindeutig sind die Signale zur Übermittlung der Intention?
3. **Aufmerksamkeitserregung:** Wie stark erregen die Signale Aufmerksamkeit?
4. **Störpotenzial:** Wie wahrscheinlich ist es, dass die Signale im Arbeitsalltag stören?
5. **Angemessenheit der Intensität:** Sind die Aufmerksamkeitserregung und das Störpotenzial der Umsetzung in der jeweiligen Situation angemessen?

Für jede Intention gab es je Kriterium eine Likert-Skala von 1 bis 4 und ein optionales Kommentarfeld. Bei Intention 2 zum allgemeinen Anzeigen autonomer Fahrt („I am driving autonomously.“) wurden, wie in Kapitel 4.6.2 erwähnt, zwei verschiedene Kommunikationskonzepte vorgestellt und die Präferenz abgefragt. Die vierstufige Skala erzwingt eine Tendenz zu Extremen, was eine gezieltere Einschätzung ermöglicht. Freitextfelder erlauben zusätzliche Meinungsäußerungen. (Terefenko 2024)

Insgesamt nahmen zwischen dem 29.1.2024 und dem 6.3.2024 $n = 13$ Mitarbeitende aus drei Unternehmen an der Evaluierung teil. Sieben Befragungen fanden vor Ort in Anwesenheit der Studienleitung statt, fünf wurden parallel zu einem online-Termin ausgefüllt. Bei diesen beiden Terminen wurde auf einen möglichst ähnlichen Ablauf geachtet. Eine Person füllte den Fragebogen allein aus. Es nahmen $n = 2$ Frauen und $n = 11$ Männer teil, eine in der Logistik-Branche nicht unübliche Verteilung. Die Berufsbilder der Befragten waren primär Logistiker / Lageristen, ein Teamleiter der Produktion, außerdem ein AMR-Betreuer sowie ein Mitarbeiter aus dem Bereich der operativen Exzellenz. Die Altersverteilung ist in Abbildung 34 dargestellt, die Vorerfahrung mit AMRs in Abbildung 35. (Terefenko 2024)

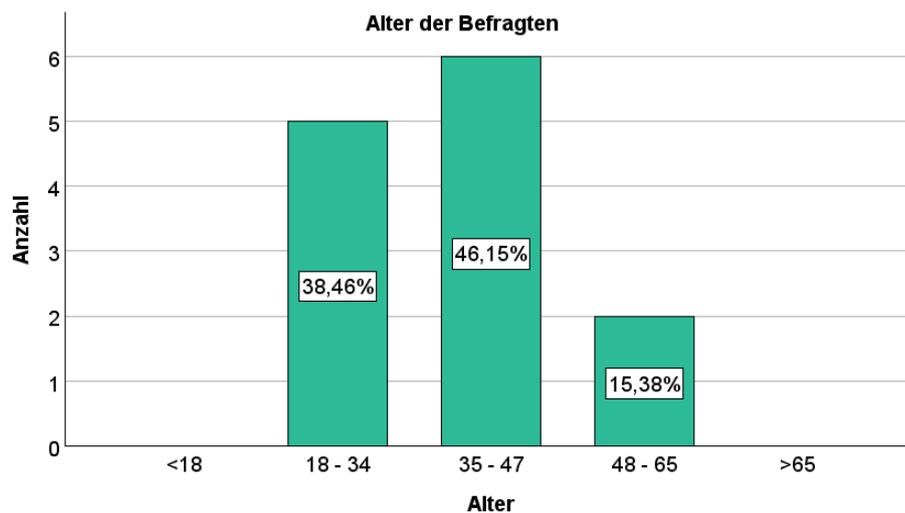


Abbildung 34: Altersverteilung der Teilnehmenden der Evaluierung

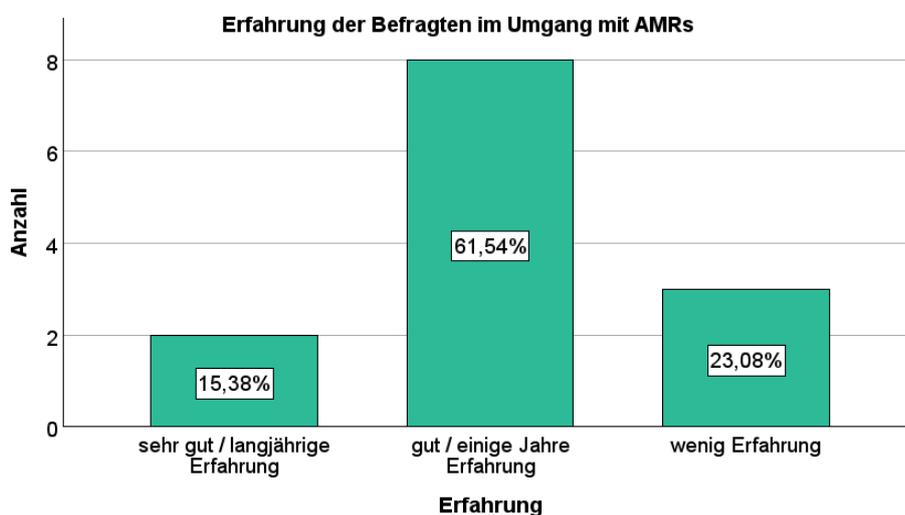


Abbildung 35: Vorerfahrung der Evaluierungs-Teilnehmenden mit AMRs

5.2 Ergebnisse

Die Auswertung in **Abb. XY-YX** erfolgt mittels Boxplots für die Kriterien jeder Intention nach Terefenko (2024). Sie visualisieren den Median, Quantile und Ausreißer und bieten einen Überblick über die Bewertungen.

Abbildung 36 bis Abbildung 40 zeigen eine Übersicht über die Mittelwerte der verschiedenen Kriterien. Die einzelnen Ergebnisse der freien Kommentare sind in Terefenko (2024) zu finden.

5.2.1 Übersicht

Zur besseren Verständlichkeit der Grafiken sind hier nochmals die 12 Intentionen aufgelistet:

1. „Ich möchte mich bald losbewegen.“
2. „Ich bewege mich autonom.“
3. „Ich werde abbiegen/meine Trajektorie in diese Richtung ändern.“
4. „Ich führe eine Aufgabe mit Priorität aus.“

5. „Dies ist mein Schutzfeld.“
6. „Du bist in meinem Schutzfeld. / Du verletzt mein Schutzfeld.“
7. „Ich warte auf deinen Input.“
8. „Ich habe ein Problem, bitte hilf mir!“
9. „Ich warte auf ein Fahrzeug/AMR/...“
10. „Achtung! Ich kann dich nicht sehen. Sei vorsichtig um mich herum.“
11. „Ich stelle eine Gefahr/Bedrohung dar.“
12. „Notfallzustand im Betrieb.“

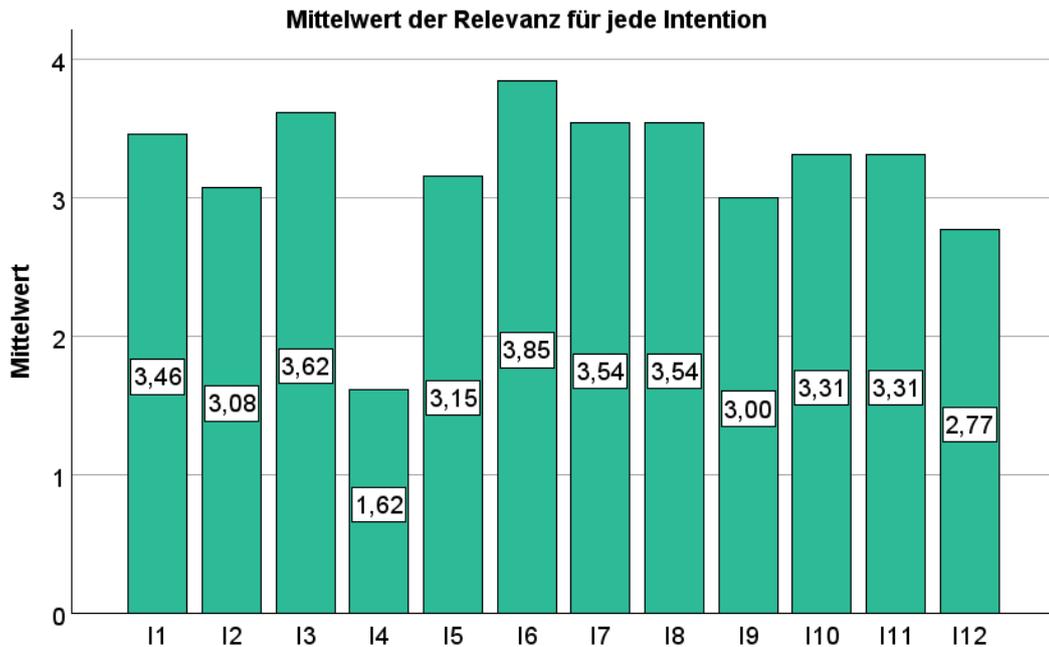


Abbildung 36: Bewertete Relevanz der Umsetzungen aller Intentionen

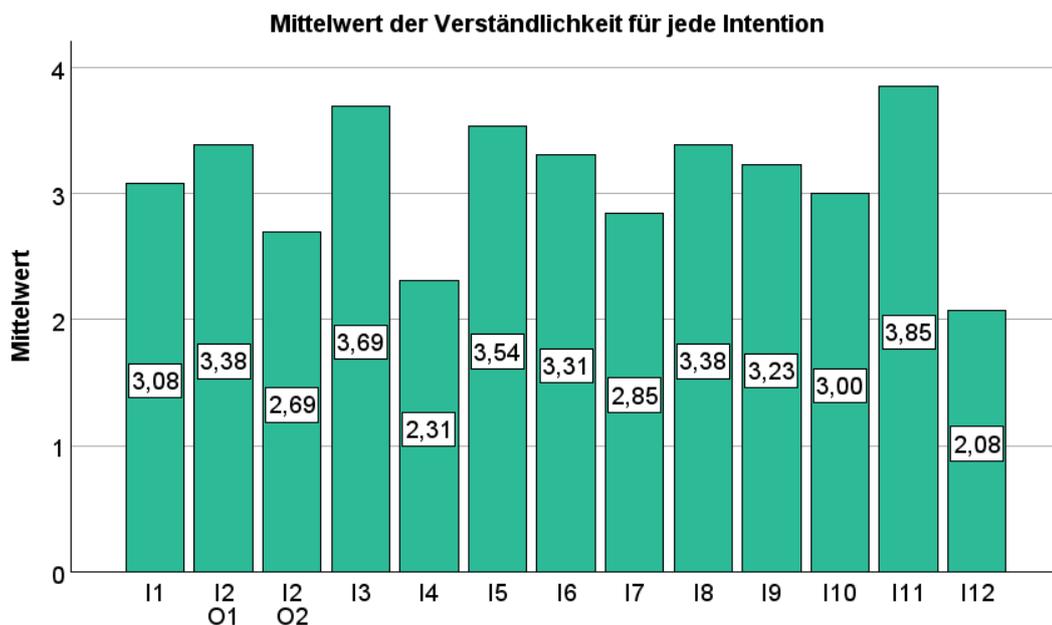


Abbildung 37: Bewertete Verständlichkeit der Umsetzungen aller Intentionen

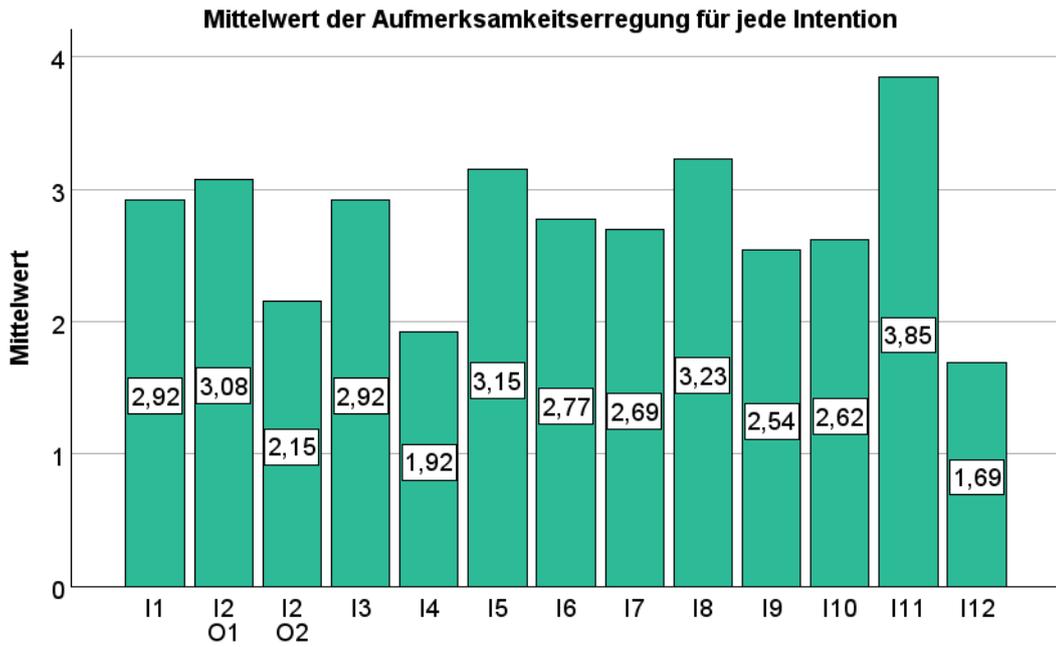


Abbildung 38: Bewertete Aufmerksamkeitserregung der Umsetzungen aller Intentionen

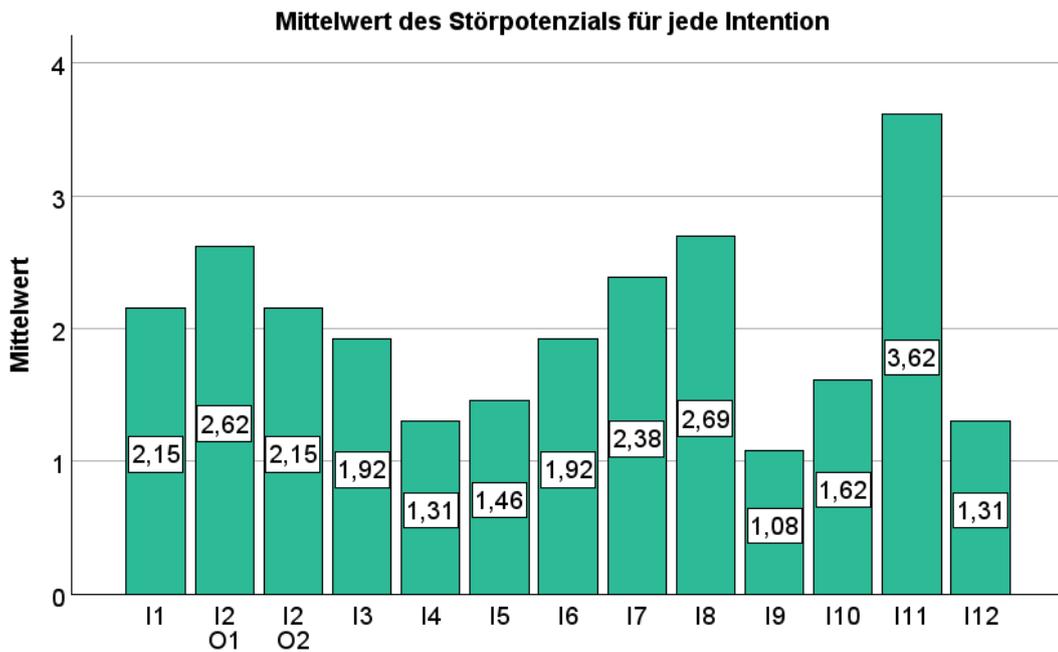


Abbildung 39: Bewertetes Störpotenzial der Umsetzungen aller Intentionen

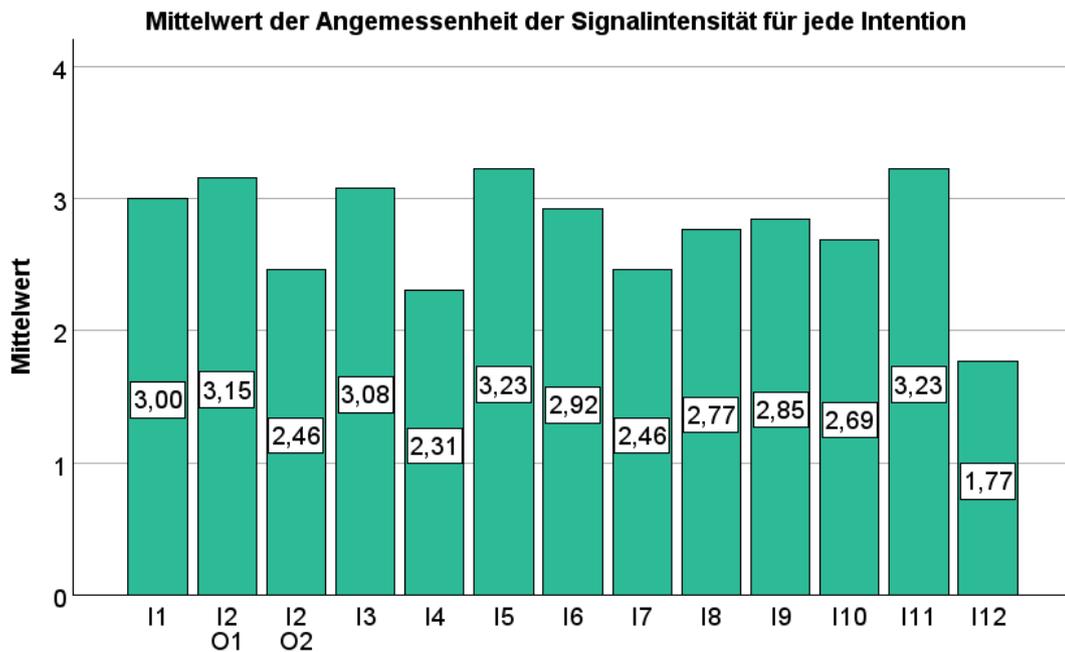


Abbildung 40: Bewertete Angemessenheit der Umsetzungen aller Intentionen

5.2.2 Einzelne Intentionen

Intention 1: „I want to move soon.“ / „Ich möchte mich bald losbewegen.“

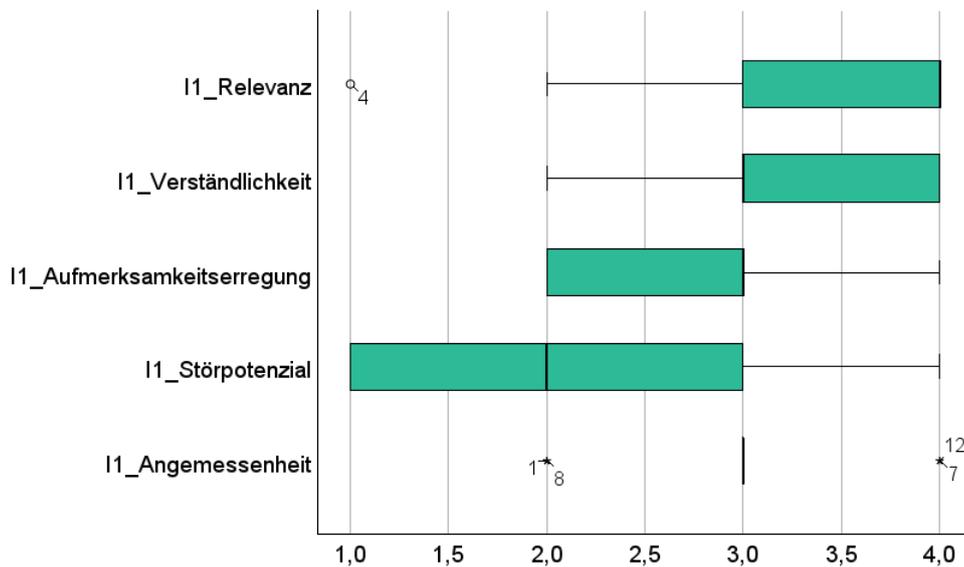


Abbildung 41: Bewertung der Intention 1 "Ich möchte mich bald losbewegen."

Intention 2: „I am moving autonomously.“ / „Ich bewege mich autonom.“

Variante 1: Grünes LED-Band + Beweglicher Lichtpunkt

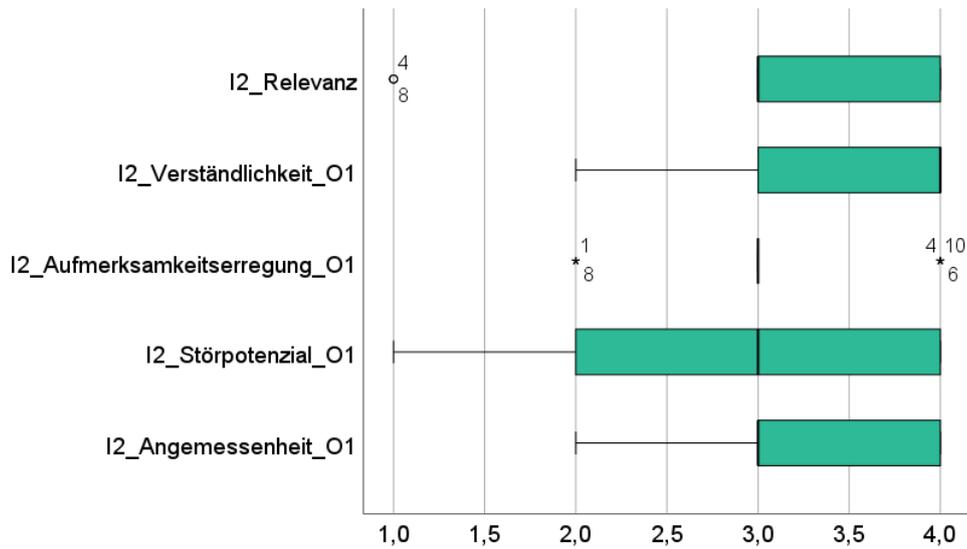


Abbildung 42: Bewertung der Intention 2 "Ich bewege mich autonom.", Variante 1

Variante 2: Rote + weiße Leuchten am LED-Band analog zum PKW

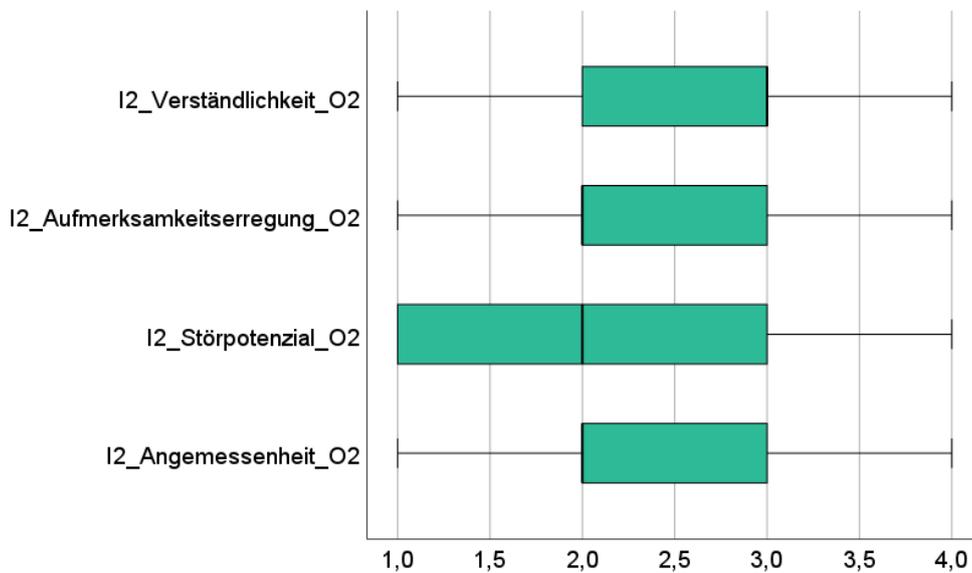


Abbildung 43: Bewertung der Intention 2 "Ich bewege mich autonom.", Variante 2. Die Relevanz ist bei Variante 1 bereits abgedeckt.

Die Präferenz war dabei genau ausgeglichen mit jeweils fünf Stimmen für Variante 1 und 2 und drei Stimmen für „gleich gut“.

Intention 3: „I will turn/change my trajectory in this way.“ / „Ich werde abbiegen/meine Trajektorie in diese Richtung ändern.“

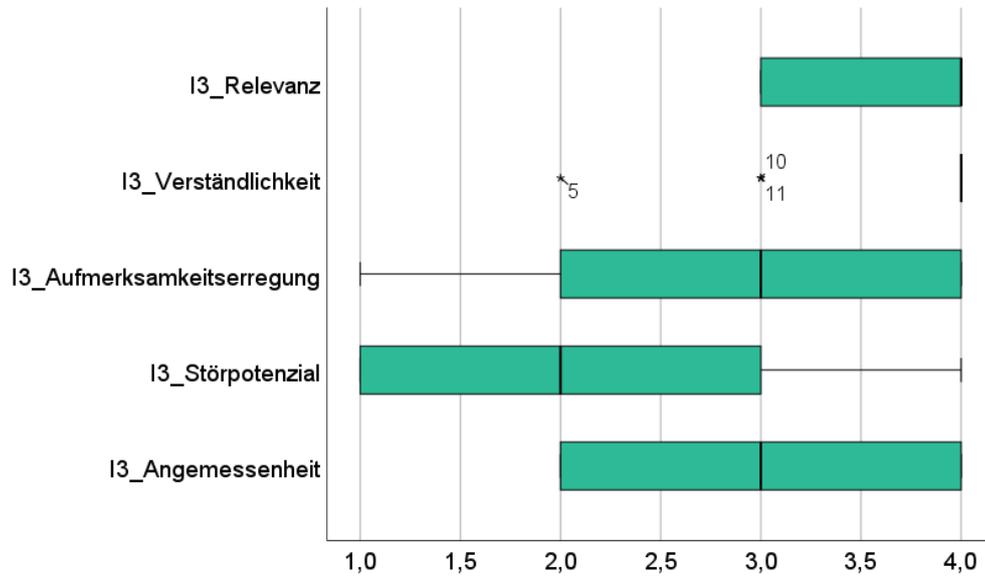


Abbildung 44: Bewertung der Intention 3 "Ich werde abbiegen/meine Trajektorie in diese Richtung ändern."

Intention 4: „I have a priority task.” / „Ich führe eine Aufgabe mit Priorität aus.“

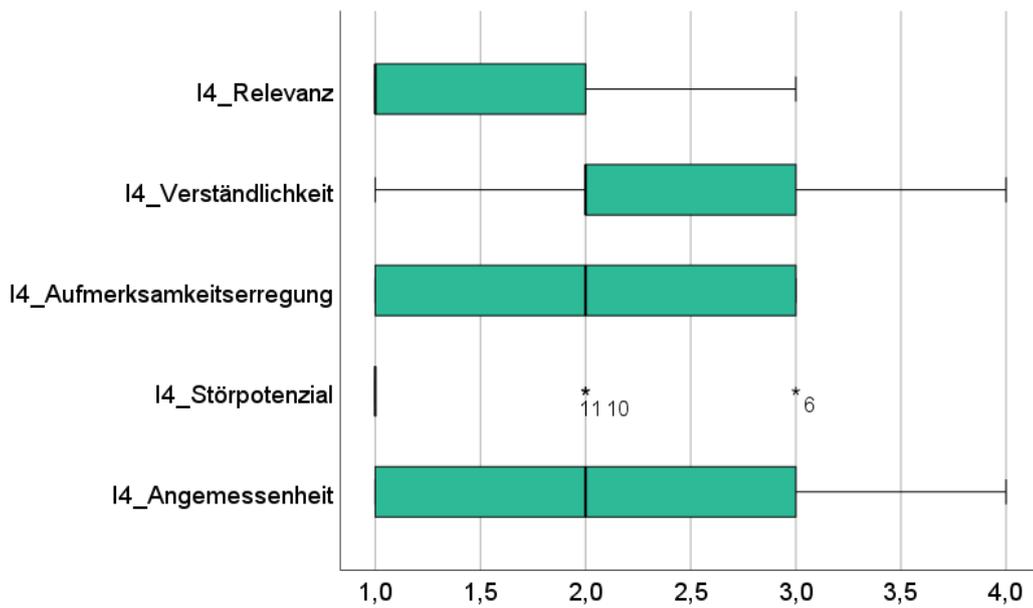


Abbildung 45: Bewertung der Intention 4 "Ich führe eine Aufgabe mit Priorität aus."

Intention 5: „This is my safety area.” / „Dies ist mein Schutzfeld.”

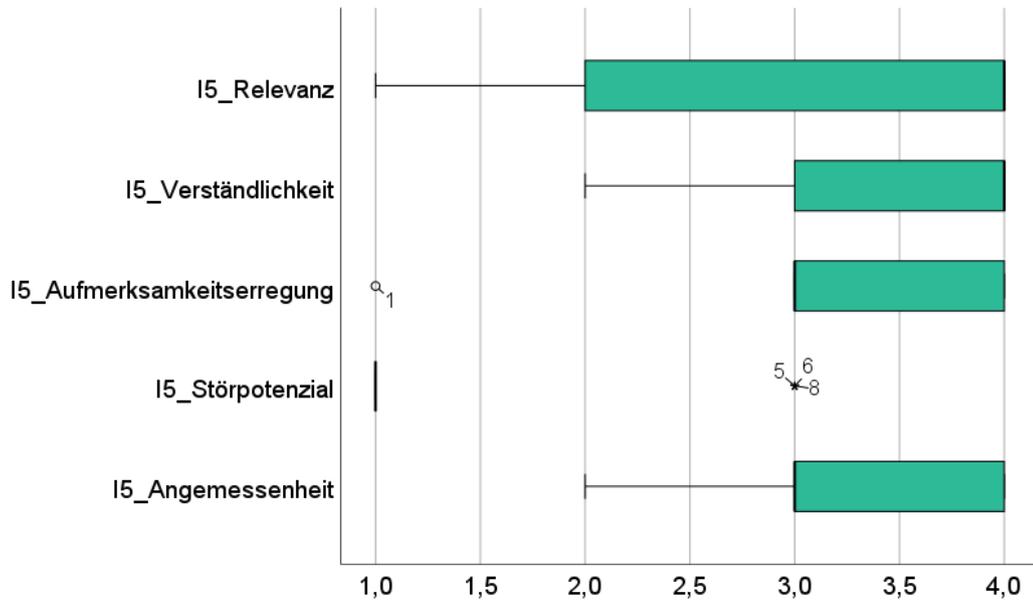


Abbildung 46: Bewertung der Intention 5 "Dies ist mein Schutzfeld."

Intention 6: „You are in my/violating my safety area.” / „Du bist in meinem Schutzfeld./Du verletzt mein Schutzfeld.”

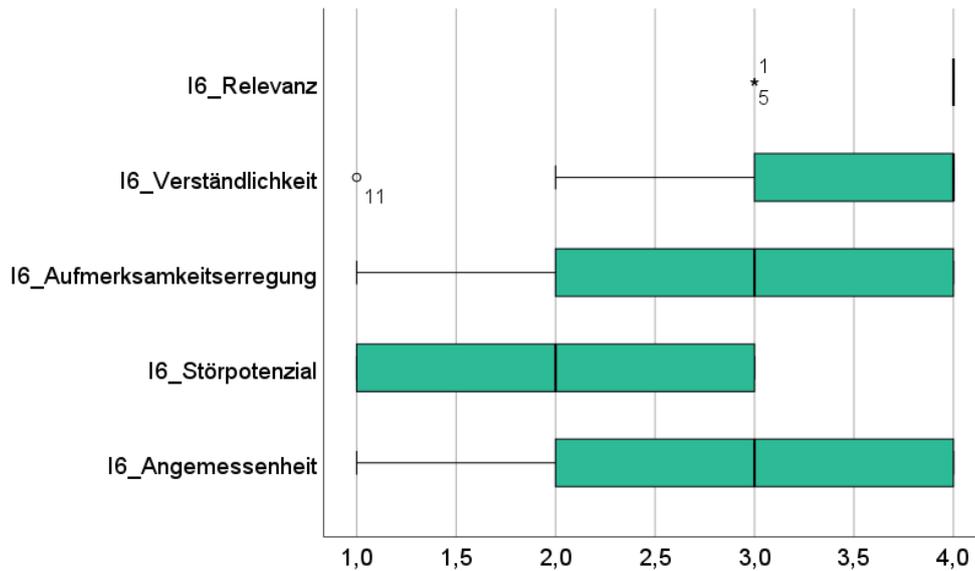


Abbildung 47: Bewertung der Intention 6 "Du bist in meinem Schutzfeld. / Du verletzt mein Schutzfeld."

Intention 7: „I'm waiting for your input/action.” / „Ich warte auf deinen Input.”

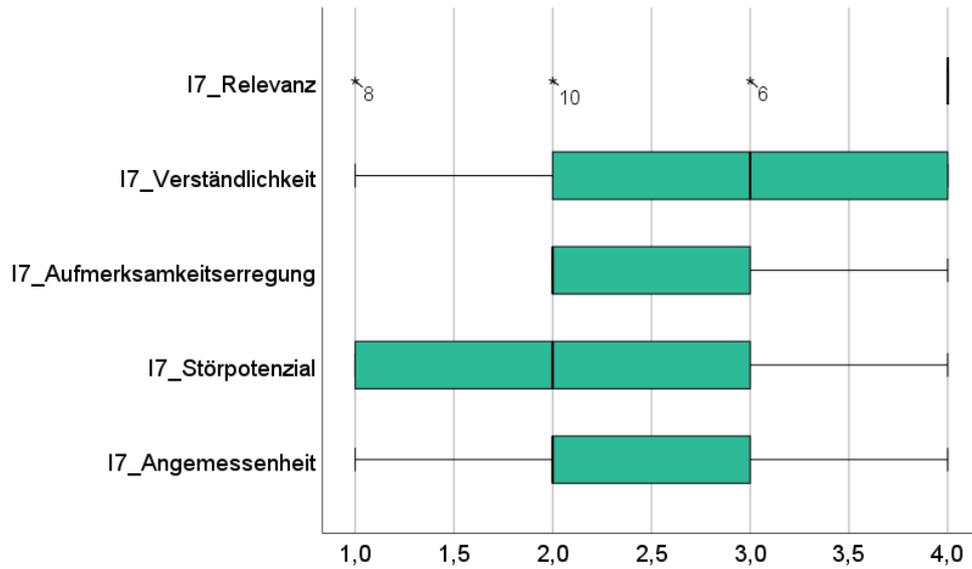


Abbildung 48: Bewertung der Intention 7 "Ich warte auf deinen Input."

Intention 8: „I have a problem, please help me!“ / „Ich habe ein Problem, bitte hilf mir!“

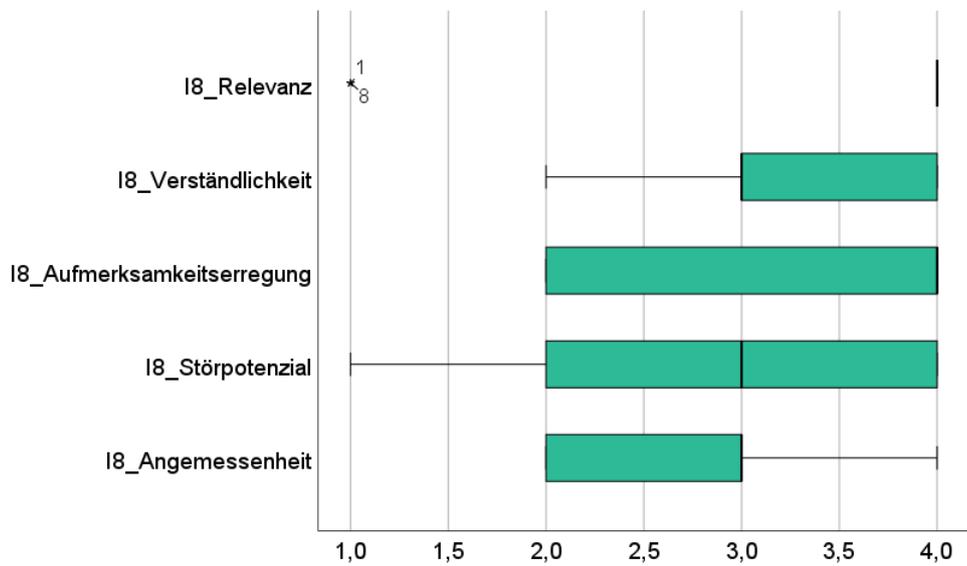


Abbildung 49: Bewertung der Intention 8 "Ich habe ein Problem, bitte hilf mir!"

Intention 9: „I'm waiting for a vehicle/AMR/...“ / „Ich warte auf ein Fahrzeug/AMR/...“

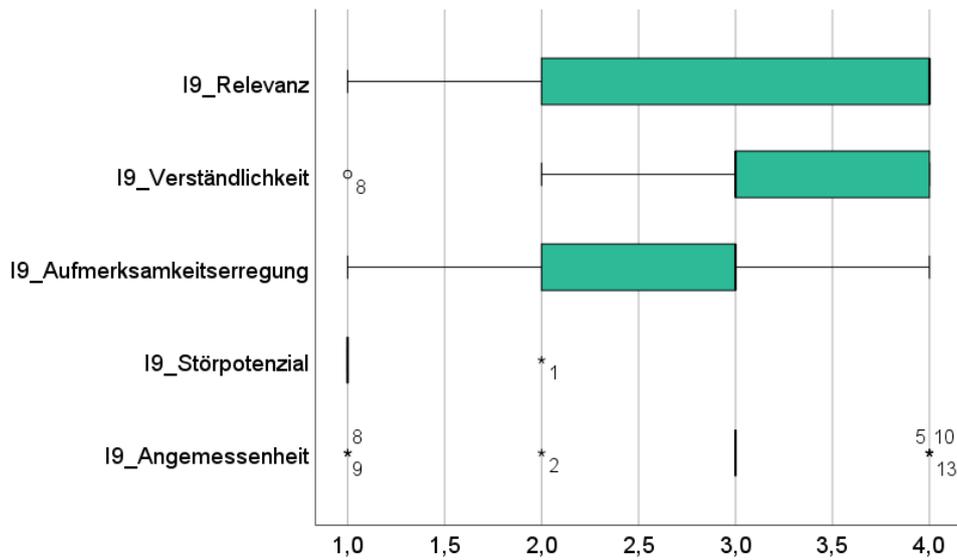


Abbildung 50: Bewertung der Intention 9 "Ich warte auf ein Fahrzeug/AMR/..."

Intention 10: „Warning! I can’t see you. Be cautious around me!” / „Achtung! Ich kann dich nicht sehen. Sei vorsichtig um mich herum.“

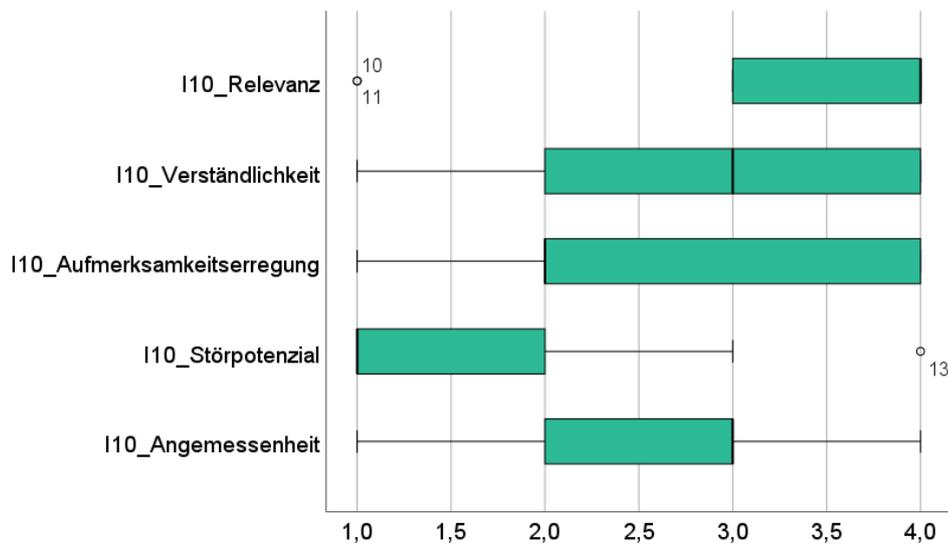


Abbildung 51: Bewertung der Intention 10 "Achtung! Ich kann dich nicht sehen. Sei vorsichtig um mich herum."

Intention 11: „I am posing a danger/threat.” / „Ich stelle eine Gefahr/Bedrohung dar.“

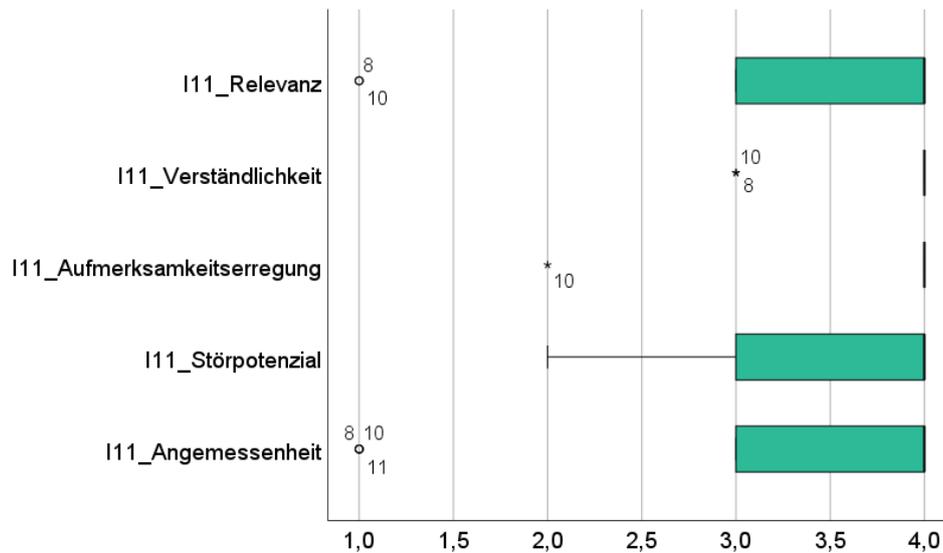


Abbildung 52: Bewertung der Intention 11 "Ich stelle eine Gefahr/Bedrohung dar."

Intention 12: „Emergency status in the plant.” / „Notfallzustand im Betrieb.”

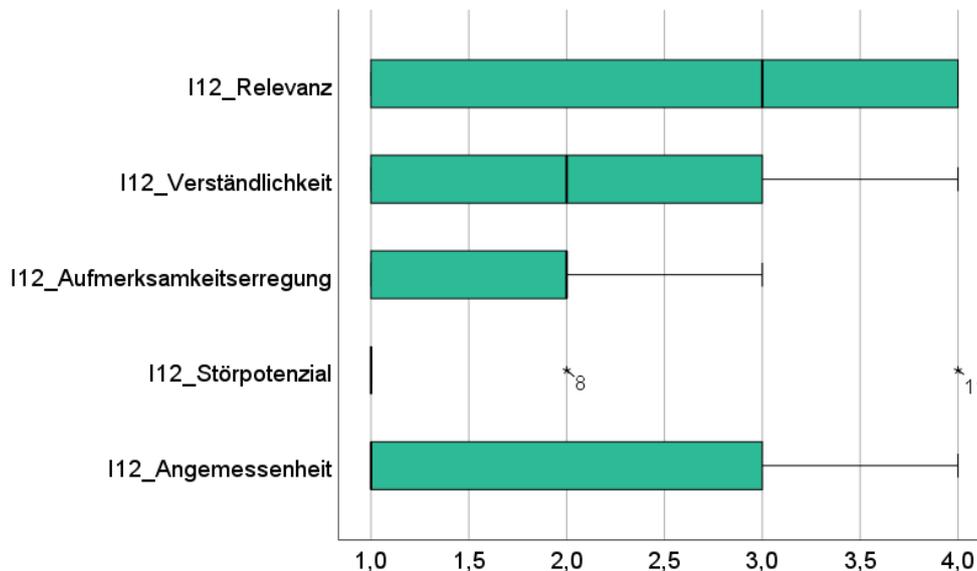


Abbildung 53: Bewertung der Intention 12 "Notfallzustand im Betrieb."

5.3 Diskussion

Die Ergebnisse des in Kapitel 4.6.2 beschriebenen Fragebogens werden interpretiert und auf einen prototypischen Baukasten bezogen. Die positiven Ergebnisse variieren je nach Intention, da die Bewertungskriterien nicht unbedingt für "1 - negativ" und "4 - positiv" stehen. Nur Verständlichkeit und Angemessenheit bedeuten bei hoher Wertung eine positive Umsetzung der Intention. Die Relevanz wird so interpretiert, dass eine häufige Einstufung von 3 und 4 die Aufnahme der Intention ins Kommunikationskonzept rechtfertigt. Eine häufige Wahl von 1 und 2 deutet darauf hin, dass viele Teilnehmer die Umsetzung dieser Intention für unnötig halten. Aufmerksamkeitserregung und Störpotenzial hängen von der jeweiligen Intention ab. Bei sicherheitskritischen Intentionen oder solchen, die auf Fehler hinweisen, ist es sinnvoll, Aufmerksamkeit zu erregen. Bei häufig auftretenden Intentionen im Normalbetrieb ist es jedoch unerwünscht, dass die Signale stören. Daher muss für jede Intention individuell entschieden

werden. Am Ende jeder Intention wird die Interpretation der Ergebnisse zusammengefasst und Vorschläge für ein überarbeitetes Kommunikationskonzept gemacht.

Erkenntnisse zu den Umsetzungen im Baukasten

Intention 1: „I want to move soon.” / „Ich möchte mich bald losbewegen.”

Die Evaluierungsergebnisse zeigen, dass die meisten Teilnehmer die Umsetzung der Intention 1 im Kommunikationskonzept befürworten. Trotz einiger Gegenstimmen wurde die Relevanz mit einem Durchschnittswert von 3,46 bewertet, was auf ein hohes Bedürfnis nach Umsetzung hinweist. Die konkrete Umsetzung durch ein grünes LED-Band und einen E-Auto-Bereitschaftssound wurde insgesamt positiv bewertet. Es gab jedoch keine klare Richtung für Verbesserungen, da die Meinungen über die Verständlichkeit und Störfaktoren der Signale auseinander gingen. Einige Teilnehmer fanden die Signale störend, besonders wenn mehrere AMRs gleichzeitig kommunizierten. Trotz dieser Meinungsverschiedenheiten war das Störpotenzial mit einem Durchschnittswert von 2,15 insgesamt gering. Die erzielte mittlere bis hohe Aufmerksamkeit mit einem Durchschnittswert von 2,92 wurde als positiv bewertet. Insgesamt wurde die Umsetzung des Kommunikationssignals durch die überwiegend hoch eingestufte Angemessenheit der Signalintensität als gut bewertet. Ein Kommentar deutete darauf hin, dass die Mitarbeiter in der Anfangsphase der Nutzung von AMRs viele Bewegungen signalisiert haben möchten, während nach der Eingewöhnungsphase viele der Signale als störend empfunden werden. Daher könnte ein Kompromiss darin bestehen, in der Eingewöhnungszeit akustische Signale zu verwenden oder zu verstärken und sie nach einer Weile zu reduzieren oder ganz wegzulassen. Insgesamt zeigt sich jedoch die Schwierigkeit, ein Kommunikationskonzept zu erstellen, das von allen Beteiligten positiv aufgenommen wird. (Terefenko 2024)

Intention 2: „I am moving autonomously.” / „Ich bewege mich autonom.“

Die Intention 2, wurde von den Teilnehmern im Durchschnitt mit 3,08 als sinnvoll für die Umsetzung im Kommunikationsbaukasten bewertet. Die erste vorgeschlagene Umsetzung, die ein grünes LED-Band, einen blauen Projektionspunkt und ein E-Auto-ähnliches Fahrgeräusch beinhaltete, wurde gut aufgenommen. Sie wurde als verständlich und angemessen bewertet, obwohl das kontinuierliche Fahrgeräusch als potenziell störend empfunden wurde. Trotzdem wurde es von den meisten Teilnehmern als angemessen eingestuft, was auf eine gute Balance zwischen Sicherheit und Störung hinweist.

Die alternative Umsetzung, die weiße und rote „Scheinwerfer“ am LED-Band und das gleiche akustische Signal wie die erste Umsetzung beinhaltete, wurde insgesamt schlechter bewertet. Sie wurde als weniger verständlich und angemessen empfunden und hatte ein geringeres Störpotenzial und Aufmerksamkeitserregung. Dies könnte daran liegen, dass kein Projektionspunkt verwendet wurde und die kleineren weißen bzw. roten Abschnitte des LED-Bandes weniger auffällig waren.

Es gab keine eindeutige Präferenz für eine der beiden Umsetzungen, obwohl die erste Umsetzung in Bezug auf Verständlichkeit und Angemessenheit besser bewertet wurde. Die Gesamtbewertung deutet darauf hin, dass die erste Umsetzung eine bessere Balance zwischen Sicherheit und Störung bietet, während die zweite Umsetzung möglicherweise weniger gut verstanden wird und weniger Aufmerksamkeit erregt. (Terefenko 2024)

Intention 3: „I will turn/change my trajectory in this way.” / „Ich werde abbiegen/meine Trajektorie in diese Richtung ändern.”

Die Teilnehmer bewerteten die kommunikative Umsetzung der Trajektorienänderung positiv, insbesondere das optische und akustische Blinksignal. Einige fanden das akustische Signal störend, daher könnte es weggelassen werden. Der blaue Projektionspunkt wurde nicht als störend empfunden und könnte die Verständlichkeit verbessern. (Terefenko 2024)

Intention 4: „I have a priority task.“ / „Ich führe eine Aufgabe mit Priorität aus.“

Die Intention 4 war in der Konzeptionsphase und beim PA-Treffen umstritten, was zur Frage ihrer Relevanz führte. Die Evaluierung ergab, dass die meisten Teilnehmer die Prioritätsanzeige einer Aufgabe durch den Roboter als wenig relevant einstufen. Dies könnte von der persönlichen Wahrnehmung eines Shop-Floor-Mitarbeiters bezüglich der zeitlichen Kritikalität im Arbeitsalltag abhängen. Sollte die Intention in den endgültigen Baukasten aufgenommen werden, müsste sie wahrscheinlich in Bezug auf Verständlichkeit und Signalintensität angepasst werden, da die vorgeschlagene Umsetzung als wenig verständlich/angemessen eingestuft wurde. Die Kommunikation der Intention müsste bei ihrer Umsetzung klarer und intensiver sein. Wenn die Umsetzung optional wäre, könnte sie stärker umgesetzt werden, da kein Kompromiss zwischen geringer Relevanz und Verständlichkeit/Aufmerksamkeitserregung gewährleistet werden müsste. Für die optionale Variante könnte beispielsweise ein neues akustisches Signal vorgeschlagen werden oder die visuellen Signale könnten auffälliger gestaltet werden. (Terefenko 2024)

Intention 5: „This is my safety area.“ / „Dies ist mein Schutzfeld.“

Die Umsetzung von Intention 5 im Kommunikationskonzept wird als wünschenswert angesehen und könnte die Mensch-Roboter-Interaktion verbessern. Obwohl der AMR so programmiert ist, dass Menschen in seinem Schutz- und Warnfeld sicher sein müssen, könnte eine genaue Kommunikation dieses Bereichs das Sicherheitsgefühl erhöhen. Die schlichte Umsetzung wurde positiv aufgenommen, mit mehrheitlich gut verständlichen und angemessenen Signalen. Das Störpotenzial wurde größtenteils als gering eingestuft, da keine akustischen Signale verwendet wurden. Ein Teilnehmer wies jedoch auf eine mögliche Störung der Bodenbeleuchtung hin. Trotzdem wurde die Aufmerksamkeitserregung durch die Bodenbeleuchtung als stark bewertet, was sinnvoll ist, um genügend Aufmerksamkeit auf das sicherheitskritische Schutzfeld zu lenken. Daher scheint die Umsetzung von Intention 5 insgesamt als erfolgreich angesehen zu werden. (Terefenko 2024)

Intention 6: „You are in my/violating my safety area.“ / „Du bist in meinem Schutzfeld./Du verletzt mein Schutzfeld.“

Die sechste Intention wurde in der Evaluierung am höchsten bewertet, was ihre Umsetzung in einem Kommunikationskonzept für AMRs in der Intralogistik rechtfertigt. Die Umsetzung wurde generell gut angenommen, wobei die Signalintensität unterschiedlich wahrgenommen wurde. Das Störpotenzial wurde als gering eingestuft, was je nach Kontext negativ sein könnte. Einige Teilnehmer fanden das Signal nicht störend, was darauf hindeutet, dass eine Erhöhung der Signalintensität sinnvoll sein könnte. Trotz einiger Vorschläge zur Verwendung blinkender visueller Signale im Warnfeld, wurde die Unterscheidung zwischen Schutz- und Warnfeldverletzungen als wichtig erachtet. Daher könnte eine leichte Erhöhung des Störpotenzials und eine Intensivierung der Signale durch die Wahl eines eindringlicheren Tons für die Schutzfeldverletzung in Betracht gezogen werden. (Terefenko 2024)

Intention 7: „I'm waiting for your input/action.“ / „Ich warte auf deinen Input.“

Die Teilnehmer der Evaluierung sehen die Notwendigkeit, Intention 7 in ein Kommunikationskonzept für AMRs in der Intralogistik zu integrieren. Sie betonen, dass eine kontinuierliche Nutzung von AMRs für die Effizienz entscheidend ist und dass es wichtig ist, dass AMRs kommunizieren können, wenn sie Input benötigen. Das Konzept wurde grundsätzlich gut umgesetzt, jedoch gibt es Verbesserungspotential hinsichtlich der Signalintensität. Die Signale wurden als verständlich bewertet, aber sie erregen wenig Aufmerksamkeit und stören kaum. Dies könnte auf die individuelle Wahrnehmung akustischer Signale zurückzuführen sein. Eine Verbesserung der Akzeptanz könnte durch häufigeres Pulsieren des Lichts, intensivere Farben und/oder häufigeres Abspielen des akustischen Signals erreicht werden. Allerdings sollte dies mit Bedacht erfolgen, da einige Teilnehmer die Signale bereits als zu stark und störend empfanden. (Terefenko 2024)

Intention 8: „I have a problem, please help me!“ / „Ich habe ein Problem, bitte hilf mir!“

Die achte Intention wurde ähnlich wie die sechste als sehr relevant angesehen, obwohl zwei Teilnehmer sie als "nicht relevant" ansahen. Die Handhabung von technischen Fehlern des AMRs variiert je nach Unternehmen und Robotertyp. Einige Teilnehmer erklärten, dass sie bei einem Fehler nicht eingreifen können, sondern spezielle Mitarbeiter benachrichtigen, die den Fehler beheben.

Die Umsetzung wurde als gut verständlich und angemessen bewertet, obwohl fast die Hälfte der Teilnehmer sie als nur geringfügig angemessen ansah. Einige Teilnehmer wünschten sich deutlichere Signale, um die Aufmerksamkeit zu erhöhen. Eine Intensivierung der Signale könnte die Aufmerksamkeit weiter erhöhen, aber es sollte sorgfältig überlegt werden, da einige Teilnehmer die Signale bereits als störend empfanden.

Es könnte sinnvoll sein, die Signalintensität auf visuelle Signale zu beschränken, um die Aufmerksamkeit zu erhöhen, ohne das Störpotenzial zu erhöhen. Die Unterschiede in der Häufigkeit der akustischen Signale sollten beibehalten werden, um die Dringlichkeit der achten Intention gegenüber der siebten zu betonen. (Terefenko 2024)

Intention 9: „I'm waiting for a vehicle/AMR/...“ / „Ich warte auf ein Fahrzeug/AMR/...“

Die Kommunikation von Intention 9 und 4 war stark umstritten. Trotz Kritik in den offenen Fragen, dass Intention 9 irrelevant sei, ergab die Auswertung einen hohen Relevanz-Mittelwert von 3,00, was die weitere Arbeit daran rechtfertigt. Ziel ist es, die Aufmerksamkeit der Mitarbeiter nicht unnötig auf den AMR zu lenken, außer wenn sie bereits darauf gerichtet ist. In diesem Fall wird signalisiert, dass keine Handlung erforderlich ist. Die Signalintensität wurde als angemessen und verständlich bewertet. Die Aufmerksamkeitserregung war mit einem Mittelwert von 2,54 höher als gewünscht, während das Störpotenzial mit 1,08 als gering eingestuft wurde. Dies könnte durch die Verwendung einer anderen Farbe oder geringerer Leuchtkraft des LED-Bandes verbessert werden. Ein akustisches Signal scheint nicht ratsam zu sein. (Terefenko 2024)

Intention 10: „Warning! I can't see you. Be cautious around me!“ / „Achtung! Ich kann dich nicht sehen. Sei vorsichtig um mich herum.“

Die Relevanz der Intention 10 ist ähnlich wie bei Intention 8, wobei die Situation nicht bei jedem AMR auftritt und die Sensoren nicht immer ausgeschaltet werden müssen. Die meisten Teilnehmer sahen eine hohe Relevanz für die Sicherheit der Mitarbeiter. Zwei Teilnehmer sahen keine Relevanz, gaben aber keine Begründung ab.

Die Umsetzung wurde von den meisten Teilnehmern als verständlich und angemessen bewertet. Die Aufmerksamkeitserregung ist bei Intention 10 wichtig, da es sich um eine sicherheitskritische

Situation handelt. Die durchschnittliche Bewertung für die Aufmerksamkeitserregung lag bei 2,62. Da es sich nur um eine Warnung handelt, wird diese Bewertung als ausreichend angesehen. Es muss beachtet werden, dass die Aufmerksamkeit der Mitarbeiter nicht unnötig auf den AMR gezogen werden sollte. Das Störpotenzial wurde trotz der intensiven akustischen Signale mit einem Durchschnittswert von 1,62 als sehr gering bewertet. Ein geringes Störpotenzial ist positiv, solange die Aufmerksamkeit stark genug ist, um vor dem potenziellen Sicherheitsrisiko zu warnen. Eine Erhöhung der Signalintensität wird daher nicht empfohlen, insbesondere da einige Kommentare gegen den Einsatz von akustischen Signalen argumentierten, insbesondere wenn mehrere AMRs im Einsatz sind. (Terefenko 2024)

Intention 11: „I am posing a danger/threat.“ / „Ich stelle eine Gefahr/Bedrohung dar.“

Die elfte Intention wurde aufgrund des sicherheitskritischen Kontextes als sehr relevant bewertet. Obwohl autonome mobile Roboter (AMRs) grundsätzlich sicher konstruiert sind, könnten Situationen auftreten, die eine Warnung erfordern. Beispielsweise könnte eine korrekt bemessene Ladung während der Fahrt verrutschen und eine Gefahr darstellen. Selbst bei geringer Wahrscheinlichkeit einer ernsthaften Gefahr sollte ein Sicherheitskonzept für die Mitarbeiter vorhanden sein. Daher ist es unvorstellbar, die elfte Intention vollständig aus dem Kommunikationskonzept zu streichen.

Die Umsetzung durch visuelle und akustische Signale wurde als zweckmäßig und angemessen bewertet. Sie erregen viel Aufmerksamkeit und stören stark, was in einer echten Gefahrensituation erwünscht ist. Die Akzeptanz der Signalstärke zeigt sich in der hohen Bewertung der Angemessenheit der Signalintensität. Ein Teilnehmer fasste dies gut zusammen, indem er das akustische Signal als sehr störend, aber gleichzeitig als passend und angemessen empfand. (Terefenko 2024)

Intention 12: „Emergency status in the plant.“ / „Notfallzustand im Betrieb.“

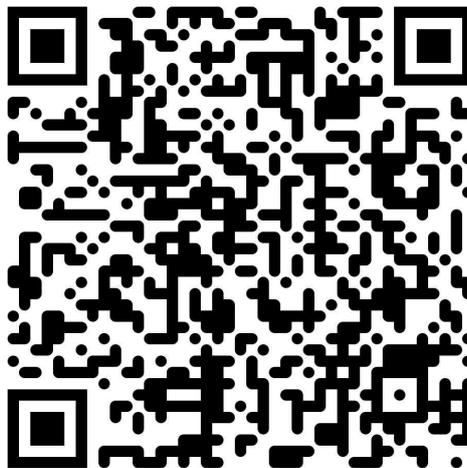
Nach dem PA-Treffen wurde das Kommunikationskonzept der zwölften Intention stark verändert, wobei die Signalintensität deutlich reduziert wurde. Die Meinungen der Evaluierungsteilnehmer zur Relevanz dieser Intention waren gespalten. Einige sahen sie als sehr relevant an, während andere sie als irrelevant ansahen. Die Umsetzung der Intention 12 wurde insgesamt als nicht vollständig zufriedenstellend bewertet. Das Kommunikationskonzept wurde von einer intensiven Signalisierung zu einer schwachen Kommunikation ohne akustische und dynamische visuelle Signale geändert. Einige Teilnehmer äußerten den Wunsch nach intensiveren und eindeutigeren Signalen. Es wurde vorgeschlagen, entweder die Intention nicht aufzunehmen oder sie deutlicher und eindringlicher zu gestalten. Für eine intensivere Darstellung könnte ein neues akustisches Signal gesucht werden, das sich vom übergeordneten Notfallalarm unterscheidet. Es ist jedoch wichtig, dass das Signal des AMRs den übergeordneten Alarm nicht übertönt und deutlich genug hörbar ist. Weitere Studien könnten erforderlich sein, um eine geeignete akustische Umsetzung zu finden. In einer intensiveren Umsetzung könnte das visuelle Signal näher an Intention 11 heranrücken, indem das "Rotieren" des LED-Bandes in Rot übernommen wird. Trotz der Begründungen einiger Teilnehmer, dass Intention 12 sehr relevant ist und stark kommuniziert werden muss, ist es wichtig, den Bezug des AMRs zu den Gefahren-/Notsituationen in den Fällen 11 und 12 zu differenzieren. Während der AMR in Situation 11 selbst die Gefahr darstellt, ist er in Situation 12 lediglich ein unterstützendes Mittel für eine übergeordnete Notsituation, an der er nicht direkt beteiligt ist. (Terefenko 2024)

Insgesamt sind auch einige Limitationen der Studie zu berücksichtigen:

- Unterschiedliche Rahmenbedingungen bei der Befragung (online / vor Ort)
- Evaluierung durch Videos, nicht durch echte Interaktionen
- Mögliche mangelnde Repräsentanz durch Stichprobengröße
- Interpretation der Bewertungskriterien – bspw. Angabe eines geringen Störpotenzials aufgrund von Angemessenheit

5.4 Finaler Baukasten

Der finale Baukasten ist in kompakter Form unter untenstehendem Link bzw. QR-Code inklusive Videos der einzelnen Umsetzungen abrufbar und weicht nur marginal von den in Kapitel Signale der einzelnen Intentionen dargestellten Umsetzungen ab. Es wurden noch einige aus den Erkenntnissen der Evaluierung gewonnene Tipps zur Umsetzung hinzugefügt.



QR-Code und Link zum RoboLingo-Baukasten in kompakter Form:

https://miro.com/app/board/uXjVKLGCnzQ=?share_link_id=671596529650

Abbildung 54 zeigt eine vereinfachte Version dieses Baukastens, welche in Print-Medien dargestellt werden kann.

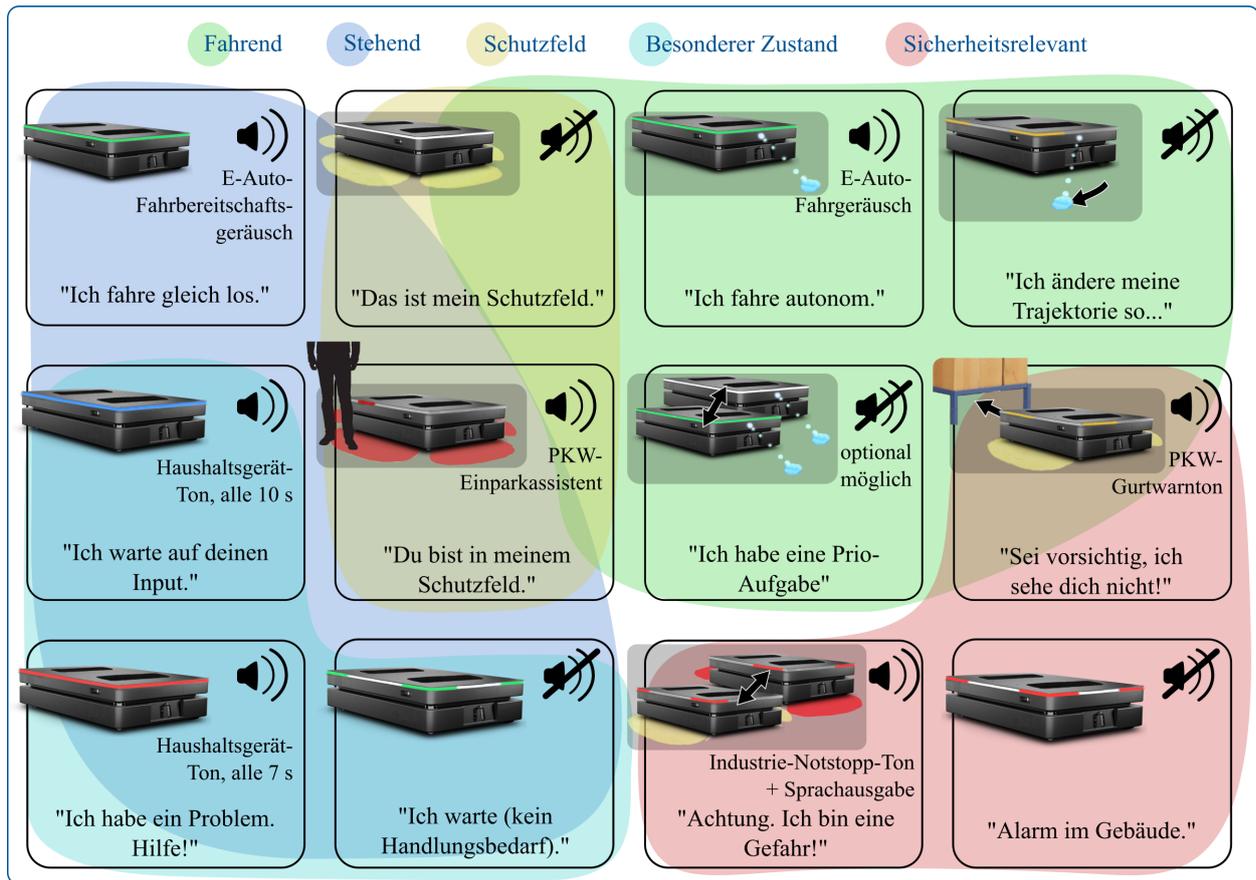


Abbildung 54: Finaler RoboLingo Baukasten als Druckversion. Obenstehender QR-Code führt zum interaktiven Online-Baukasten.

6 Handlungsempfehlungen zum Einsatz des Baukastens

6.1 Erkenntnisse aus Evaluierung

Über die verschiedenen Intentionen hinweg zeigten sich zusätzlich zu den Erkenntnissen aus Kapitel 5.35 folgende Punkte als relevant für die Umsetzung des RoboLingo Interaktionsbaukastens:

- Lautstärke der akustischen Signale:** Die Lautstärke wurde als wichtiger Faktor identifiziert, insbesondere bei kontinuierlichen Begleitgeräuschen der AMRs. Sie sollte stets an die Umgebungslautstärke und Einsatzszenarien der AMRs angepasst werden.
- Eingewöhnungsphase mit stärkeren (akustischen) Signalen:** In der Eingewöhnungsphase besteht ein großer Bedarf an expliziten Signalen. Nach einer gewissen Zeit könnten diese jedoch als störend empfunden werden und sollten daher möglicherweise abgeschaltet werden.

- **Synchronisierung und Priorisierung der Kommunikationssignale:** Die zeitliche Abfolge und Synchronisierung verschiedener Signale sowie ihre Priorisierung untereinander bei mehreren parallel auftretenden Intentionen ist zu bedenken.
- **Quittieren nach Abschluss der Intentionen 7 und 8:** Die kommunikative Darstellung der Erfüllung einer Aufgabe sollte in Kombination mit der Signalgebung betrachtet werden.
- **Einhaltung von Normen und Richtlinien:** Ein Abgleich mit aktuellen Normen und Richtlinien sollte vor Einsatz in der Praxis getätigt werden.
- **Grundstruktur des Baukastens mit optionalen und flexiblen Lösungen:** Der Baukasten soll eine Grundlage für Umsetzungen an verschiedenen AMRs sein. Er muss stets an örtliche Gegebenheiten und Fahrzeuge angepasst werden?
- **Einweisung in das Kommunikationskonzept:** Eine Erläuterung der Bedeutung bestimmter Signale vor deren Einsatz wird ihre Verständlichkeit verbessern. Natürlich wurde eine möglichst selbsterklärende Verständlichkeit der gewählten Kommunikationsmittel angestrebt, jedoch kann eine Einweisung Missverständnissen vorbeugen.
- **Qualität statt Quantität:** Zu viele verschiedene Signale können verwirrend sein und so allgemein die Verständlichkeit behindern.

6.2 Erkenntnisse aus Experten-Workshops (PAs)

Zusätzlich gab es verschiedene Erkenntnisse zum Interaktionsbaukasten und dessen Einsatz bei den Treffen und Workshops des projektbegleitenden Ausschusses. Dazu gehörten:

- **Bedarf und Interesse bestätigt:** Im Laufe des Projekts hatten sowohl Hersteller, als auch Anwender von AMRs über die PA-Treffen hinweg Interesse an der Thematik der Signalisierung und dem Interaktionsbaukasten. Dies spricht erneut für eine hohe Relevanz des Forschungsthemas.
- **Standardisierung wünschenswert:** Viele Hersteller wünschten sich allgemeine Richtlinien für die Signalgebung von AMRs. Die Abweichung von Standards wie dem Vorschlag des VDMA oder dem RoboLingo Baukasten sollten daher überlegt und begründet sein. Beihilfe könnte dabei möglicherweise auch die kommende Neuauflage der ISO 3691-4 schaffen, welche sich mit den Sicherheitsbestimmungen für AMRs befasst.
- **Wartungsaufwand als wichtiges Kriterium:** Bei der Wahl der Kommunikationsmittel wurden anfangs teils „exotischere“ Arten der Kommunikation in Betracht gezogen, wie beispielsweise über die Blickrichtung eines künstlichen Kopfes/Gesichts des AMR. Da diese allerdings bewegliche Teile beinhalten und somit fehleranfällig und teuer sind, stießen sie vor allem bei Herstellern auf große Skepsis. Dieses Erkenntnis ist bei der Technologieauswahl stets zu berücksichtigen.
- **Praxisnähe und Relevanz des finalen Baukastens:** Die PA-Teilnehmer zeigten sich beim Abschlusstreffen sehr erfreut über die Anwendbarkeit und Konkretheit des Baukastens. Er deckte eine große Breite an Situationen ab, ohne an konkreten

Anwendungen zu sparen. Zudem wurden Wünsche nach einer weiteren Zusammenarbeit geäußert.

7 Fazit und Ausblick

Im Forschungsprojekt RoboLingo wurden in zahlreichen Gesprächen mit Herstellern und Anwendern fahrerloser Transportsysteme Anforderungen an die Mensch-Maschine-Schnittstellen zukünftiger Logistik-Roboter ermittelt. Aufgrund dieser priorisierten Anforderungen sowie wissenschaftlicher Erkenntnisse und technischer Randbedingungen wurden mehrere neue Konzepte für die Kommunikation von Logistik-Robotern mit Menschen entworfen und bis in ein demonstratorisches Versuchsstadium weiterentwickelt. Mithilfe dieser Demonstratoren wurden mehrere Probandenstudien durchgeführt und qualitativ sowie quantitativ ausgewertet. Somit konnten belastbare Aussagen zur Gebrauchstauglichkeit innovativer Kommunikationskonzepte auf Basis von Licht-/Bildschirmsignalen, Projektionen, akustischen Signalen sowie impliziten Trajektorienänderungen gewonnen werden.

Aufgrund dieses Sortiments möglicher innovativer Kommunikationsmittel sowie der durch Expertengespräche und Beobachtungen ermittelten, typischen Interaktionssituationen zwischen Logistik-Robotern und Menschen konnte ein Interaktions-Baukasten zusammengestellt werden. Der Baukasten als zentrales Ergebnis des Projekts hat die Form einer n-zu-m-Zuordnung von Kommunikationsmitteln zu Interaktionssituationen, wobei für jede Interaktionssituation die Liste möglicher Kommunikationsmittel mit Prioritäten und zusätzlichen Hinweisen zum praktischen Einsatz ausgestattet ist. Durch eine Evaluation des Baukastens mit Domänenexperten wurde das Projekt abgerundet und seine Praxisnähe sichergestellt.

Bemerkenswert ist unter den zahlreichen Erkenntnissen aus Demonstratorentwicklungen und Probandenstudien, dass sowohl hersteller- als auch käufer- und nutzerseits meist einfache Lösungen bevorzugt wurden. Dies ist möglicherweise einem hohen Kosten- und Effizienzdruck geschuldet, welcher sich in geringer Bereitschaft für eine Komplexitätserhöhung inklusive Inbetriebnahme- und Wartungsaufwands äußert. Allerdings könnte bei der Bewertung der komplexeren der untersuchten Kommunikationslösungen auch der vergleichsweise niedrigere technische Reifegrad der Demonstratoren eine Rolle gespielt haben. Weiterhin wurde als Kriterium für eine praktische Anwendbarkeit der entworfenen Kommunikationsformen stets die Sicherheit betont. Eine Erhöhung der betrieblichen Sicherheit wurde als äußerst positiv bewertet, während gleichzeitig die Notwendigkeit der Konformität mit bestehenden Sicherheitsrichtlinien und -normen große Hürden an die erarbeiteten Konzepte stellte.

7.1 Abgleich von Anforderungen und Ergebnissen

Ein Abgleich der eingangs aufgestellten Anforderungen mit den erreichten Projektergebnissen zeigt eine überwiegende Erfüllung:

Sicherheit + sicherheitsrelevanter Bezug: Die entwickelten Kommunikationsmittel wurden unter anderem auf ihr Potential zur Erhöhung der Sicherheit getestet. Die einschlägigen Normen und Richtlinien, insbesondere die ISO 3691-4, wurden laufend konsultiert und abgeglichen.

Usability, einfache Anwendung, einfacher Aufbau – klare Struktur und Übersicht: Die Gebrauchstauglichkeit und Einfachheit wurde aufgrund von Expertenmeinungen priorisiert. Die

erfolgreiche Berücksichtigung konnte durch Erhebung des System Usability Score (SUS) bei den Probandenstudien belegt werden.

Modularer Aufbau: Dem Baukasten-Charakter der Projektergebnisse ist die unabhängige Anwendbarkeit der verschiedenen Kommunikationsmittel immanent.

Kosteneffizienz: Die Notwendigkeit der Kosteneffizienz wurde weitestmöglich berücksichtigt. Jedoch konnten verschiedene Prototypen aufgrund der beschränkten Entwicklungszeit nicht kostenoptimal umgesetzt werden, was auch von PA-Mitgliedern bemängelt wurde.

Standardisierung: Im Projektverlauf wurde auf bestehende Standards Rücksicht genommen, insbesondere die Sicherheitsnorm ISO 3691-4 sowie die Richtlinie zur Kommunikation zwischen fahrerlosen Transportfahrzeugen und ihren Leitsteuerungen VDA 5050 und verschiedene VDI-Richtlinien. Für die zukünftige Standardisierung können die Ergebnisse des vorliegenden Projekts eine Grundlage bieten. Entsprechend fand während des Projekts ein regelmäßiger Austausch mit Mitgliedern des Überarbeitungsgremiums der ISO 3691-4 statt.

Kompatibilität: Die Projektergebnisse sind bei den meisten Formen heutiger und in der nahen Zukunft verfügbarer Logistik-Roboter anwendbar. Manche Kommunikationsmittel bedingen jedoch einen Bauraum mit einer vertikalen Ausdehnung, die einen Einsatz bei Unterfahr-Robotern ausschließt.

Intuitivität/Verständlichkeit der einzelnen Bausteine: Die Verständlichkeit der für die verschiedenen Situationen vorgeschlagenen Kommunikationsmittel wurde in einer abschließenden Expertenbefragung sowie in den PA-Sitzungen positiv evaluiert.

Erweiterbarkeit: Die Interaktionssituationen und die ihnen zugeordneten Empfehlungen für Kommunikationsmittel sind nicht abgeschlossen und können entsprechend dem technologischen Fortschritt in der Zukunft erweitert werden.

Berücksichtigung verschiedener Situationen, die im Bereich der Intralogistik auftreten: Aufgrund der geführten Expertengespräche und durch Beobachtungen wurden relevante 12 Situationen identifiziert, in denen Logistik-Roboter mit Menschen interagieren.

Priorisierung der Inhalte: Die Vorschläge für Kommunikationsmittel wurden entsprechend ihrer Bewertungen in Probandenstudien priorisiert.

Berücksichtigung verschiedener Intentionen, die Roboter im Bereich der Intralogistik haben: Jede der identifizierten Interaktionssituation wurde mit der damit einhergehenden Intention des Roboters unterfüttert. Somit ist eine verwechslungsfreie Nachvollziehbarkeit der Baukastenbestandteile gewährleistet.

7.2 Ausblick

Aufgrund der im Projektverlauf gewonnenen Erfahrungen sowie gefundener Forschungslücken und erhaltener Rückmeldungen von Experten sind Forschungsideen entstanden, welche nicht im Rahmen des Projekts umgesetzt werden konnten.

Im Bereich der Interaktion von Logistik-Robotern mit Menschen stellt sich die Frage, wie Aktionen von Mensch oder Roboter vorhergesehen werden können. Damit einher geht die Frage nach der Messbarkeit zukünftiger Aktionen, die Modellierung der Prognosen inklusive Unsicherheit und die Interpretation bzw. mögliche Schlussfolgerungen. Diese Fragen sollen zukünftig in einem

Forschungsvorhaben des LfE behandelt werden. Weiterhin gilt es, über die derzeitigen Normen und Richtlinien hinauszudenken und ein dominantes Verhalten von Logistik-Robotern zu erforschen. Hierbei stellen sich Fragen nach konkreten Strategien für die Trajektorienplanung, nach der Auswirkung der Hoheitsumkehr auf den Menschen sowie nach der erreichbaren Transporteffizienz im Vergleich zu bestehenden Mensch-Roboter-Systemen. Dieses Thema soll zukünftig in einem bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingereichten Vorhaben durch den fml und weitere Forschungseinrichtungen untersucht werden. Als angelagerte Fragestellung sollte auch untersucht werden, inwieweit Menschen gegenüber Berührungen und leichten Kollisionen mit mobilen Robotern tolerant sind.

Das Konzept eines Interaktionsbaukastens für die effektive Zusammenarbeit von Mensch und Roboter soll in einem gemeinsamen Folgevorhaben von LfE und fml auf das Bauwesen übertragen werden. Da in der Bauindustrie zunehmend Maschinen mit automatischen oder autonomen Funktionen zum Einsatz kommen, stellt sich die Frage nach der optimalen Instruktion dieser Maschinen. Im Vergleich zur Intralogistik sind die Kommunikationsinhalte komplexer, während die Heterogenität der potentiell interagierenden Menschen wie auch die prozessuale Komplexität und der technische Anspruch aufgrund physischer Störgrößen höher ist. Gleichzeitig sind die heute und zukünftig eingesetzten, (teil-)automatischen Maschinen vielgestaltig, sodass ein breit gefächertes Baukasten für die Integration der Mensch-Roboter-Interaktion für Baumaschinenhersteller von großer Bedeutung ist.

8 Ressourcenverwendung und Ergebnistransfer

8.1 Verwendung der zugewendeten Mittel

8.1.1 Wissenschaftlich-technisches Personal und studentische Hilfskräfte (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

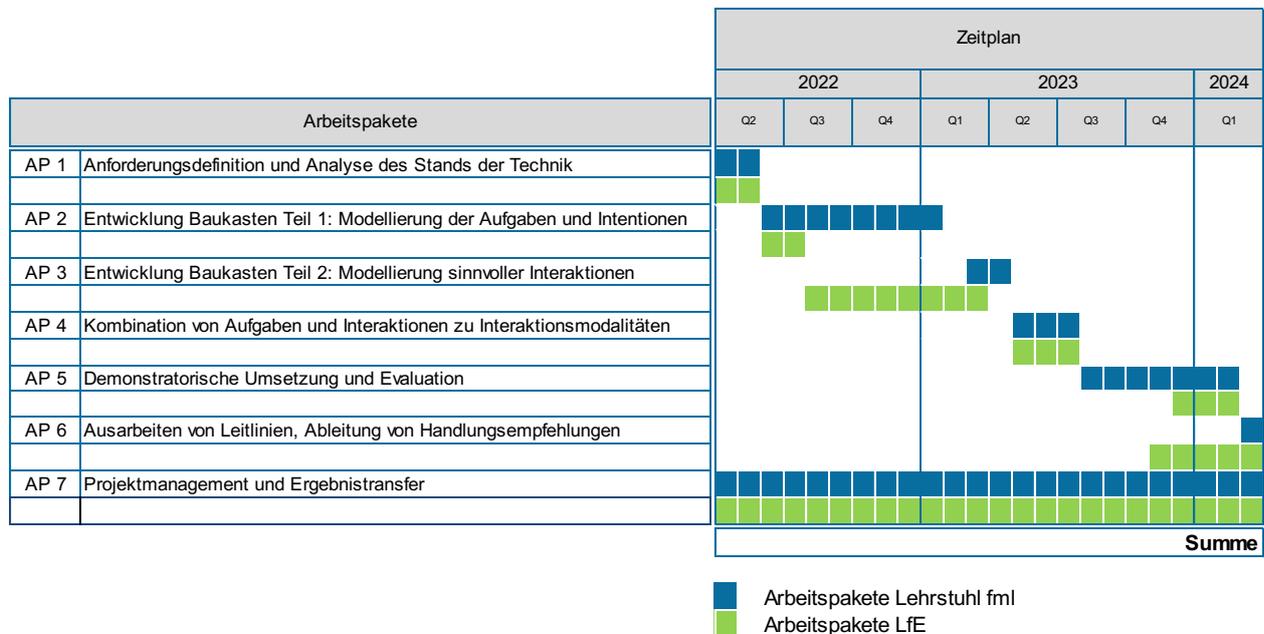


Abbildung 55: Arbeitspakete und Aufteilung der 48 eingesetzten Personenmonate wissenschaftlichen Personals zwischen den beiden Forschungseinrichtungen.

Am fml wurde ein wissenschaftlicher Mitarbeiter im Umfang von 24 Personenmonaten eingesetzt. Am LfE wurde ein wissenschaftlicher Mitarbeiter im Umfang von 24 Personenmonaten eingesetzt. Die Aufteilung der Personenmonate auf die Arbeitspakete ist in Abbildung 55 über die blauen (fml) und grünen (LfE) Kästchen dargestellt.

8.1.2 Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

Es wurden keine Finanzmittel für Gerätebeschaffungen beantragt.

8.1.3 Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Es wurden keine Leistungen für die Arbeit Dritter beantragt.

8.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines Kommunikationsbaukastens für die Roboter-Mensch Kommunikation. Für einen effizienten Betrieb von Robotern, die im Umfeld mit Menschen arbeiten und interagieren, ist die Kommunikation mit diesen ein entscheidender Faktor. Um die verschiedenen Bestandteile des Baukastens priorisieren und kombinieren zu können, mussten diese demonstratorisch umgesetzt und in Probandenstudien auf ihre Gebrauchstauglichkeit getestet werden. Parallel dazu wurde die Vollständigkeit des Baukastens und die Plausibilität der Studienergebnisse in Expertengesprächen validiert und die Praxisnähe kontinuierlich sichergestellt.

Um die nötige wissenschaftliche Gründlichkeit bei der Bearbeitung zu garantieren, mussten wissenschaftliche Mitarbeiter eingesetzt werden. Entsprechend ihrer Notwendigkeit und ihres Umfangs sind die Arbeiten von den eingesetzten wissenschaftlichen Mitarbeitern durchgeführt worden. Zusätzlich wurden die Arbeiten von studentischen Hilfskräften und den Beteiligten des projektbegleitenden Ausschusses unterstützt.

8.3 Weiterer Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Während der Projektlaufzeit wurden verschiedene Maßnahmen zum Transfer der Zwischen- und Endergebnisse in die Wirtschaft durchgeführt. Sie sind in Tabelle 15 aufgelistet.

Tabelle 15: Durchgeführte Maßnahmen zum Transfer der Projektergebnisse in die Wirtschaft während der Projektlaufzeit

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Maßnahme A: Projektbegleitender Ausschuss (PA)		
Fortlaufende Diskussion und Abstimmung des Forschungsfortschrittes mit Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschuss (PA)	A1 Vorstellung des Projekts und Diskussion der geplanten Arbeiten	03.05.2022
	A2 Vorstellung und Diskussion der Interaktionsszenarien und Reaktionsmöglichkeiten	27.10.2022
	A3 Vorstellung von Zwischenergebnissen, Vorstellung der Evaluationsstudien und des Interaktionsbaukastens, zusätzlich Diskussion und Einholung von Expertenmeinungen	02.05.2023 30.11.2023

	A4 Vorstellung der Projektergebnisse und der demonstratorischen Anwendung	30.04.2024
Maßnahme B: Präsentation auf Kongressen und Konferenzen		
Präsentation von (Teil-)Ergebnissen des Projekts auf Fachtagungen vor Wirtschaft und Wissenschaft	B1 Vortrag, Posterpräsentation oder Vorführung auf dem Deutschen Materialflusskongress oder der International Conference on Human System Integration (HSI)	Ersetzt durch Teilnahme an HCII 2023, Kopenhagen
	B2 Ergebnisdarstellung der Untersuchungen z. B. im Rahmen der International Conference on Human Interaction and Emerging Technologies (IHET)	Ersetzt durch Teilnahme an HFR 2023, München
Maßnahme C: Elektronischer Newsletter und Internetauftritt		
Elektronische Verbreitung der Forschungsinhalte und -ergebnisse, Gewinn weiterer interessierter Unternehmen	C1 Das Projekt wird auf der Homepage des Mittelstand 4.0 (Anwenderzentrum Augsburg) vorgestellt	Ersetzt durch LinkedIn-Beitrag (www.linkedin.com/company/tum-fml) im September 2022
	C2 Ergebnistransfer über den Newsletter des Logistik-Innovationszentrums am fml	Ersetzt durch LinkedIn-Beiträge (www.linkedin.com/company/tum-fml) am 29.09.2023 und 04.04.2024
	C3 Frei zugänglicher Internetauftritt des Forschungsprojekts über die Homepage des fml und des LfE	Gesamte Projektlaufzeit
Maßnahme D: Veröffentlichungen		
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	D1 Publikation in einschlägigen Fachzeitschriften wie „Logistik Heute“, „Hebezeuge Fördermittel“, „ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“ o. ä.	Ergonomie aktuell 08/2022 Logistik heute 05/2024 Ergonomie aktuell 07/2024 ZWF 10/24
Maßnahme E: Übernahme in die Lehre		
Einbringung der erarbeiteten Ergebnisse in den Lehrbetrieb	E1 Mitarbeit studentischer Hilfskräfte	Gesamte Projektlaufzeit
	E2 Anfertigung von Studienarbeiten im Rahmen des Projekts	Gesamte Projektlaufzeit

Maßnahme F: Mittelstand-Digital-Zentrum Augsburg		
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	F1 Vortrag, Posterpräsentation oder Vorführung im Mittelstand-Digital-Zentrum Augsburg	Ersetzt durch Vortrag auf der Messe „all about automation“ in Friedrichshafen am 05.03.2024

Die Verbreitung der Forschungsergebnisse wird auch nach Projektende fortgeführt. Die dafür geplanten Maßnahmen sind in Tabelle 16 aufgelistet.

Tabelle 16: Geplante Maßnahmen zum Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft nach Ende der Projektlaufzeit.

Ziel	Rahmen	Zeitraum
Maßnahme G: Beratung		
Ergebnistransfer an Unternehmen (KMU) ohne eigene Forschungsaktivität	G1 Unterstützung von Unternehmen bei der eigenständigen Anwendung der Ergebnisse durch das Angebot von Seminaren oder Beratungsleistungen	Seit I. Quartal 2024
Maßnahme H: Veröffentlichungen		
Ergebnistransfer in die Wirtschaft	H1 Veröffentlichung des Abschlussberichts auf der Homepage des Lehrstuhls fml	II. Quartal 2024
	H2 Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften wie „Logistik Heute“, „Hebezeuge Fördermittel“, „ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb“ o. ä. sowie auf internationalen Konferenzen wie AHFE, IHSED, IHJET	II. Quartal 2024
	H3 Ergebnisse des Projekts werden bei Lehrstuhlbesichtigungen und öffentlichen Workshops der Wirtschaft vorgeführt	Fortlaufend seit dem III. Quartal 2023
Maßnahme I: Konzepttransfer		
Möglichkeit der Nutzung der Ergebnisse	I1 Das entwickelte Konzept inkl. Demonstrator steht allen Interessierten diskriminierungsfrei zur Begutachtung bereit. Die Veröffentlichungen während und nach der Projektlaufzeit werden für die Bewerbung des Demonstrators genutzt ebenso wie an anderer Forschungsstelle stattfindende Veranstaltungen (bspw. Show-Cases für Unternehmen, Veranstaltungen des Mittelstand-Digital-Zentrums Augsburg oder dem MIRMI).	Seit II. Quartal 2024

8.4 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden mehrere Schrifterzeugnisse veröffentlicht. Diese sind in Tabelle 17 aufgelistet.

Tabelle 17: Liste der Veröffentlichungen des Forschungsprojekts.

Medium / Veranstaltung	Titel	Typ
Ergonomie AKTUELL Ausgabe 023 Sommer 2022	RoboLingo: Ein Interaktionsbaukasten für Roboter in der Intralogistik	Zeitschriftenartikel
25 th International Conference on Human-Computer Interaction (HCII) 2023, Kopenhagen	Explicit vs. Implicit – Communicating the Navigational Intent of Industrial Autonomous Mobile Robots	Konferenzbeitrag
16th International Workshop on Human-Friendly Robotics (HFR) 2023, München	Unpacking the Complexity of Autonomous Mobile Robot (AMR) Communication Intentions through Ontology	Konferenzbeitrag
LOGISTIK HEUTE Ausgabe Mai 2024	Ein Baukasten für die Mensch-AMR-Interaktion	Zeitschriftenartikel
Ergonomie AKTUELL Ausgabe 025 Sommer 2024	RoboLingo: Ein Baukasten für Interaktionen von AMRs mit Menschen	Zeitschriftenartikel
ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 10/24	Effiziente Mensch-Maschine-Interaktion in der Produktionsversorgung: Evaluierung akustischer Signale für fahrerlose Transportfahrzeuge	Zeitschriftenartikel (in Veröffentlichung)
22 nd Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA) August 2024	Communication of Safety Area Violations in Interactions with Industrial Autonomous Mobile Robots	Konferenzbeitrag (in Veröffentlichung)

8.5 Studienarbeiten

Im Forschungsprojekt wurden 12 Studienarbeiten durchgeführt. Sie sind in Tabelle 18 aufgelistet.

Tabelle 18: Liste der im Forschungsprojekt durchgeführten Studienarbeiten.

Person(en)	Typ	Titel	Zeitraum
Gabriel Kunkel	Bachelorarbeit	Untersuchung der Interaktionen zwischen Mensch und Robotern in der Intralogistik	Mai–November 2022
Huiyu Chen	Bachelorarbeit	Mensch-Roboter-Interaktion: Intuitive Kommunikation sicherheitsrelevanter Roboterzustände	Juni–Dezember 2023
Florian Spitzer	Bachelorarbeit	Studie zur User-Experience von akustischen Signalen für Roboter in der Intralogistik	Februar–August 2023
Sina Herrmann, Florian Spitzer	Forschungspraxis	Auswertung und Validierung einer Studie zur User-Experience von akustischen Signalen für Roboter in der Intralogistik	Oktober 2023–Juni 2024
Gioele Micheli	Masterarbeit	Human-Centered Approach to Communicating Trajectories of Autonomous Mobile Robots	Oktober 2022 – Mai 2023
Hannes Duml	Semesterarbeit	Ermittlung von Anforderungen an einen Baukasten für die Mensch-Roboter Kommunikation	Mai–Oktober 2022
Damla Bayramoglu	Semesterarbeit	Mensch-Roboter-Interaktion: Intuitive Kommunikation besonderer Roboterzustände in der Industrieumgebung mit Menschen	Juni – November 2023
Julian Rehm	Semesterarbeit	HowTo: Artificial Eyes	Oktober 2022 – Januar 2023
Tobias Schmidbaur	Masterarbeit	Effiziente Navigation für Intralogistik-Roboter: Vergleich von Prinzipien für die kollisionsfreie Navigation in geteilten Arbeitsumgebungen	Juli – Dezember 2023
Clemens Senft	Bachelorarbeit	Entwicklung und Umsetzung einer Trajektorienprojektion für mobile Roboter in der Intralogistik	Oktober 2022–April 2023

Matthias Watzl	Masterarbeit	Analyse und Bewertung von Faktoren für die Skalierbarkeit von mobilen Transportrobotersystemen in der Intralogistik	Mai–November 2022
Sophie Ziegler	Masterarbeit	Untersuchung verschiedener Kommunikationsmittel für ein Roboterschutzfeld im Rahmen der Mensch-Roboter-Interaktion	November 2022 – Juni 2023

9 Literaturverzeichnis

Aaltonen, Iina; Salmi, Timo; Marstio, Ilari (2018): Refining levels of collaboration to support the design and evaluation of human-robot interaction in the manufacturing industry. In: *Procedia CIRP* 72, S. 93–98. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.214.

Agilox Services GmbH (2023): Betriebsanleitung AGILOX ONE / AGILOX NFK.

Baraka, Kim; Paiva, Ana; Veloso, Manuela (2016): Expressive Lights for Revealing Mobile Service Robot State. In: *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference* 417, S. 107–119. DOI: 10.1007/978-3-319-27146-0_9.

Bayramoglu, Damla (2023): Mensch-Roboter-Interaktion: Intuitive Kommunikation besonderer Roboterzustände in der Industrieumgebung mit Menschen. Semesterarbeit. Technische Universität München.

Bengler, Klaus; Rettenmaier, Michael; Fritz, Nicole; Feierle, Alexander (2020): From HMI to HMIs: Towards an HMI Framework for Automated Driving. In: *Information* 11 (2), S. 61. DOI: 10.3390/info11020061.

Betella, Alberto; Inderbitzin, Martin; Bernardet, Ulysses; Verschure, Paul F.M.J. (2013): Non-anthropomorphic Expression of Affective States through Parametrized Abstract Motifs. In: 2013 Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction: IEEE.

Breiting, Alois; Knosala, Ryszard (1997): Bewerten technischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2017): Toolbox zur kontinuierlichen Website-Evaluation und Qualitätssicherung – Zusammenstellung von Screening-Fragen und Instrumenten zu User Experience und Usability.

Cha, Elizabeth; Kim, Yunkyung; Fong, Terrence; Mataric, Maja J. (2018): A Survey of Nonverbal Signaling Methods for Non-Humanoid Robots. In: *FNT in Robotics* 6 (4), S. 211–323. DOI: 10.1561/23000000057.

Chadalavada, Ravi Teja; Andreasson, Henrik; Schindler, Maike; Palm, Rainer; Lilienthal, Achim J. (2020): Bi-directional navigation intent communication using spatial augmented reality and eye-tracking glasses for improved safety in human-robot interaction. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 61, S. 101830.

Chen, Huiyu (2023): Mensch-Roboter-Interaktion: Intuitive Kommunikation sicherheitsrelevanter Roboterzustände. Bachelorarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik.

DIN EN ISO 9241: DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion.

Dragan, Anca; Srinivasa, Siddhartha (2013): Generating Legible Motion. In: Robotics: Science and Systems IX: Robotics: Science and Systems Foundation.

Dragan, Anca D.; Bauman, Shira; Forlizzi, Jodi; Srinivasa, Siddhartha S. (2015): Effects of Robot Motion on Human-Robot Collaboration. In: Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. New York, NY, USA. New York, NY, USA: ACM.

Dragan, Anca D.; Lee, Kenton C.T.; Srinivasa, Siddhartha S. (2013): Legibility and predictability of robot motion. In: 2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). 2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). Tokyo, Japan, 03.03.2013 - 06.03.2013: IEEE, S. 301–308.

Dumml, Hannes (2022): Ermittlung von Anforderungen an einen Baukasten für die Mensch-Roboter Kommunikation. Bachelorarbeit. Technische Universität München.

Fernandez, Rolando; John, Nathan; Kirmani, Sean; Hart, Justin; Sinapov, Jivko; Stone, Peter (2018): Passive Demonstrations of Light-Based Robot Signals for Improved Human Interpretability. In: 2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN): IEEE.

DIN EN ISO 3691-4, 2020: Flurförderzeuge - Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung.

Grice, H. P. (1968): Utterer's Meaning, Sentence-Meaning, and Word-Meaning. In: *Foundations of Language* 4 (3), S. 225–242. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/25000329>.

Grice, Paul (1991): *Studies in the Way of Words*. [Place of publication not identified]: Harvard University Press.

DIN EN 60073:2002, 2003-05: Grund- und Sicherheitsregeln für die Mensch-Maschine-Schnittstelle, Kennzeichnung.

Hart, Sandra G.; Staveland, Lowell E. (1988): Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: *Advances in Psychology*: Elsevier, S. 139–183.

Hulin, Thomas (2011): VibroTac. DLR. Online verfügbar unter <https://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-8753/#gallery/29307>, zuletzt geprüft am 17.06.2022.

Jünemann, Reinhardt (1989): *Materialfluß und Logistik: Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen*. Hg. v. R. Jünemann und H.-C. Pfohl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen). Online verfügbar unter <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-08532-5>, zuletzt geprüft am 24.03.2024.

Karagiannis, Panagiotis; Kousi, Niki; Michalos, George; Dimoulas, Konstantinos; Mparis, Konstantinos; Dimosthenopoulos, Dimosthenis et al. (2022): Adaptive speed and separation monitoring based on switching of safety zones for effective human robot collaboration. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 77, S. 102361. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102361.

Kidman, Martin (2021): Die perfekte Größe des Schutzfeldes für autonome industrielle Fahrzeuge. Online verfügbar unter <https://www.sick.com/de/de/die-perfekte-groesse-des->

schutzfeldes-fuer-autonome-industrielle-fahrzeuge/w/blog-size-protective-field-industrial-autonomous-vehicle/, zuletzt geprüft am 15.05.2023.

VDI 4451 Blatt 7, 2005: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) - Leitsteuerung für FTS.

Körber, Moritz (2018): Theoretical considerations and development of a questionnaire to measure trust in automation. In: 20th Triennial Congress of the IEA. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/323611886_Theoretical_considerations_and_development_of_a_questionnaire_to_measure_trust_in_automation.

Kunkel, Gabriel (2022): Untersuchung der Interaktionen zwischen Mensch und Robotern in der Intralogistik. Bachelorarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik.

Linde (2022): Linde BlueSpot™. Online verfügbar unter <https://www.linde-mh.de/de/Ueberuns/Innovationen-von-Linde/Linde-BlueSpot.html>, zuletzt aktualisiert am 14.09.2022, zuletzt geprüft am 15.09.2022.

Mortensen, C. David (2008): Communication theory. Second edition. London [England], New York: Routledge.

Niessen, Nicolas; Micheli, Gioele; Bengler, Klaus (2023): Explicit vs. Implicit - Communicating the Navigational Intent of Industrial Autonomous Mobile Robots. In: Constantine Stephanidis, Margherita Antona, Stavroula Ntoa und Gavriel Salvendy (Hg.): HCI International 2023 – late breaking posters. 25th International Conference on Human-Computer Interaction, HCII 2023, Copenhagen, Denmark, July 23-28, 2023, proceedings. International Conference on Human-Computer Interaction. Cham: Springer (Communications in computer and information science, 1958), S. 148–156. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-49215-0_18.

Niessen, Nicolas; Rothmeyer, Florian; Rücker, Andreas; Fottner, Johannes; Bengler, Klaus (2024a): Unpacking the Complexity of Autonomous Mobile Robot (AMR) Communication Intentions Through Ontology. In: Cristina Piazza, Patricia Capsi-Morales, Luis Figueredo, Manuel Keppler und Hinrich Schütze (Hg.): HUMAN-FRIENDLY ROBOTICS 2023. Hfr, Bd. 29. [S.l.]: Springer (Springer Proceedings in Advanced Robotics), S. 229–239.

Niessen, Nicolas; Ziegler, Sophie; Bengler, Klaus (2024b): Communication of Safety Area Violations in Interactions with Industrial Autonomous Mobile Robots. In: *accepted for 22nd Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA)*.

Ogorodnikova, Olesya (2008): Methodology of safety for a human robot interaction designing stage. In: 2008 Conference on Human System Interactions. IEEE, S. 452–457.

Otto Motors (2023): Light pipe and visual indications. Online verfügbar unter <https://docs.ottomotors.com/en/30495-64135-light-pipe-and-visual-indications.html>, zuletzt geprüft am 24.07.2024.

Pelikan, Hannah R. M.; Jung, Malte F. (2023): Designing Robot Sound-In-Interaction. In: Proceedings of the 2023 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. New York, NY, USA. New York, NY, USA: ACM.

Rauer, Matthias (2011): Quantitative Usability-Analysen mit der System Usability Scale (SUS). Online verfügbar unter <https://blog.seibert-media.net/blog/2011/04/11/usability-analysen-system-usability-scale-sus/>, zuletzt geprüft am 06.08.2023.

- Rehm, Julian (2022): Artificial Eyes: A Prototype for Human-Robot-Communication via Viewing Direction. Semesterarbeit. Technische Universität München.
- Shannon, C. E. (1948): A Mathematical Theory of Communication. In: *Bell System Technical Journal* 27 (3), S. 379–423. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.
- Spitzer, Florian (2023): Studie zur User-Experience von akustischen Signalen für Roboter in der Intralogistik. Bachelorarbeit, München. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik.
- Terefenko, Katherina (2024): Evaluierung eines prototypischen Interaktionsbaukastens zur Mensch-Roboter-Interaktion von AMRs in der Intralogistik. Bachelorarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Ergonomie.
- VDMA e.V. (22.11.2023): Mobile Roboter richtig verstehen. Juliane Kluge. Online verfügbar unter <https://vdma.org/viewer/-/v2article/render/85848152>, zuletzt geprüft am 18.04.2024.
- Williams, M.; Moser, T. (2019): The art of coding and thematic exploration in qualitative research.
- Ziegler, Sophie (2023): Untersuchung verschiedener Kommunikationsmittel für ein Roboterschutzfeld im Rahmen der Mensch-Roboter-Interaktion. Masterarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Ergonomie.
- Aaltonen, Iina; Salmi, Timo; Marstio, Ilari (2018): Refining levels of collaboration to support the design and evaluation of human-robot interaction in the manufacturing industry. In: *Procedia CIRP* 72, S. 93–98. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.214.
- Agilox Services GmbH (2023): Betriebsanleitung AGILOX ONE / AGILOX NFK.
- Baraka, Kim; Paiva, Ana; Veloso, Manuela (2016): Expressive Lights for Revealing Mobile Service Robot State. In: *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference* 417, S. 107–119. DOI: 10.1007/978-3-319-27146-0_9.
- Bayramoglu, Damla (2023): Mensch-Roboter-Interaktion: Intuitive Kommunikation besonderer Roboterzustände in der Industrieumgebung mit Menschen. Semesterarbeit. Technische Universität München.
- Bengler, Klaus; Rettenmaier, Michael; Fritz, Nicole; Feierle, Alexander (2020): From HMI to HMIs: Towards an HMI Framework for Automated Driving. In: *Information* 11 (2), S. 61. DOI: 10.3390/info11020061.
- Betella, Alberto; Inderbitzin, Martin; Bernardet, Ulysses; Verschure, Paul F.M.J. (2013): Non-anthropomorphic Expression of Affective States through Parametrized Abstract Motifs. In: 2013 Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction: IEEE.
- Breijing, Alois; Knosala, Ryszard (1997): Bewerten technischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2017): Toolbox zur kontinuierlichen Website-Evaluation und Qualitätssicherung – Zusammenstellung von Screening-Fragen und Instrumenten zu User Experience und Usability.
- Cha, Elizabeth; Kim, Yunkyung; Fong, Terrence; Mataric, Maja J. (2018): A Survey of Nonverbal Signaling Methods for Non-Humanoid Robots. In: *FNT in Robotics* 6 (4), S. 211–323. DOI: 10.1561/23000000057.

Chadalavada, Ravi Teja; Andreasson, Henrik; Schindler, Maike; Palm, Rainer; Lilienthal, Achim J. (2020): Bi-directional navigation intent communication using spatial augmented reality and eye-tracking glasses for improved safety in human-robot interaction. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 61, S. 101830.

Chen, Huiyu (2023): Mensch-Roboter-Interaktion: Intuitive Kommunikation sicherheitsrelevanter Roboterzustände. Bachelorarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik.

DIN EN ISO 9241: DIN EN ISO 9241: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion.

Dragan, Anca; Srinivasa, Siddhartha (2013): Generating Legible Motion. In: *Robotics: Science and Systems IX: Robotics: Science and Systems Foundation*.

Dragan, Anca D.; Bauman, Shira; Forlizzi, Jodi; Srinivasa, Siddhartha S. (2015): Effects of Robot Motion on Human-Robot Collaboration. In: *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*. New York, NY, USA. New York, NY, USA: ACM.

Dragan, Anca D.; Lee, Kenton C.T.; Srinivasa, Siddhartha S. (2013): Legibility and predictability of robot motion. In: *2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*. 2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). Tokyo, Japan, 03.03.2013 - 06.03.2013: IEEE, S. 301–308.

Duml, Hannes (2022): Ermittlung von Anforderungen an einen Baukasten für die Mensch-Roboter Kommunikation. Bachelorarbeit. Technische Universität München.

Fernandez, Rolando; John, Nathan; Kirmani, Sean; Hart, Justin; Sinapov, Jivko; Stone, Peter (2018): Passive Demonstrations of Light-Based Robot Signals for Improved Human Interpretability. In: *2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*: IEEE.

DIN EN ISO 3691-4, 2020: Flurförderzeuge - Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung.

Grice, H. P. (1968): Utterer's Meaning, Sentence-Meaning, and Word-Meaning. In: *Foundations of Language* 4 (3), S. 225–242. Online verfügbar unter <http://www.jstor.org/stable/25000329>.

Grice, Paul (1991): *Studies in the Way of Words*. [Place of publication not identified]: Harvard University Press.

DIN EN 60073:2002, 2003-05: Grund- und Sicherheitsregeln für die Mensch-Maschine-Schnittstelle, Kennzeichnung.

Hart, Sandra G.; Staveland, Lowell E. (1988): Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: *Advances in Psychology*: Elsevier, S. 139–183.

Hulin, Thomas (2011): VibroTac. DLR. Online verfügbar unter <https://www.dlr.de/rm/desktopdefault.aspx/tabid-8753/#gallery/29307>, zuletzt geprüft am 17.06.2022.

Jünemann, Reinhardt (1989): Materialfluß und Logistik: Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Hg. v. R. Jünemann und H.-C. Pfohl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen). Online verfügbar unter <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-08532-5>, zuletzt geprüft am 24.03.2024.

Karagiannis, Panagiotis; Kousi, Niki; Michalos, George; Dimoulas, Konstantinos; Mparis, Konstantinos; Dimosthenopoulos, Dimosthenis et al. (2022): Adaptive speed and separation monitoring based on switching of safety zones for effective human robot collaboration. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 77, S. 102361. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102361.

Kidman, Martin (2021): Die perfekte Größe des Schutzfeldes für autonome industrielle Fahrzeuge. Online verfügbar unter <https://www.sick.com/de/de/die-perfekte-groesse-des-schutzfeldes-fuer-autonome-industrielle-fahrzeuge/w/blog-size-protective-field-industrial-autonomous-vehicle/>, zuletzt geprüft am 15.05.2023.

VDI 4451 Blatt 7, 2005: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) - Leitsteuerung für FTS.

Körper, Moritz (2018): Theoretical considerations and development of a questionnaire to measure trust in automation. In: 20th Triennial Congress of the IEA. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/323611886_Theoretical_considerations_and_development_of_a_questionnaire_to_measure_trust_in_automation.

Kunkel, Gabriel (2022): Untersuchung der Interaktionen zwischen Mensch und Robotern in der Intralogistik. Bachelorarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik.

Linde (2022): Linde BlueSpot™. Online verfügbar unter <https://www.linde-mh.de/de/Ueberuns/Innovationen-von-Linde/Linde-BlueSpot.html>, zuletzt aktualisiert am 14.09.2022, zuletzt geprüft am 15.09.2022.

Mortensen, C. David (2008): Communication theory. Second edition. London [England], New York: Routledge.

Niessen, Nicolas; Micheli, Gioele; Bengler, Klaus (2023): Explicit vs. Implicit - Communicating the Navigational Intent of Industrial Autonomous Mobile Robots. In: Constantine Stephanidis, Margherita Antona, Stavroula Ntoa und Gavriel Salvendy (Hg.): HCI International 2023 – late breaking posters. 25th International Conference on Human-Computer Interaction, HCII 2023, Copenhagen, Denmark, July 23-28, 2023, proceedings. International Conference on Human-Computer Interaction. Cham: Springer (Communications in computer and information science, 1958), S. 148–156. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-49215-0_18.

Niessen, Nicolas; Rothmeyer, Florian; Rücker, Andreas; Fottner, Johannes; Bengler, Klaus (2024a): Unpacking the Complexity of Autonomous Mobile Robot (AMR) Communication Intentions Through Ontology. In: Cristina Piazza, Patricia Capsi-Morales, Luis Figueredo, Manuel Keppler und Hinrich Schütze (Hg.): HUMAN-FRIENDLY ROBOTICS 2023. Hfr, Bd. 29. [S.l.]: Springer (Springer Proceedings in Advanced Robotics), S. 229–239.

Niessen, Nicolas; Ziegler, Sophie; Bengler, Klaus (2024b): Communication of Safety Area Violations in Interactions with Industrial Autonomous Mobile Robots. In: *accepted for 22nd Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA)*.

Ogorodnikova, Olesya (2008): Methodology of safety for a human robot interaction designing stage. In: 2008 Conference on Human System Interactions. IEEE, S. 452–457.

Otto Motors (2023): Light pipe and visual indications. Online verfügbar unter <https://docs.ottomotors.com/en/30495-64135-light-pipe-and-visual-indications.html>, zuletzt geprüft am 24.07.2024.

Pelikan, Hannah R. M.; Jung, Malte F. (2023): Designing Robot Sound-In-Interaction. In: Proceedings of the 2023 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. New York, NY, USA. New York, NY, USA: ACM.

Rauer, Matthias (2011): Quantitative Usability-Analysen mit der System Usability Scale (SUS). Online verfügbar unter <https://blog.seibert-media.net/blog/2011/04/11/usability-analysen-system-usability-scale-sus/>, zuletzt geprüft am 06.08.2023.

Rehm, Julian (2022): Artificial Eyes: A Prototype for Human-Robot-Communication via Viewing Direction. Semesterarbeit. Technische Universität München.

Shannon, C. E. (1948): A Mathematical Theory of Communication. In: *Bell System Technical Journal* 27 (3), S. 379–423. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

Spitzer, Florian (2023): Studie zur User-Experience von akustischen Signalen für Roboter in der Intralogistik. Bachelorarbeit, München. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik.

Terefenko, Katherina (2024): Evaluierung eines prototypischen Interaktionsbaukastens zur Mensch-Roboter-Interaktion von AMRs in der Intralogistik. Bachelorarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Ergonomie.

VDMA e.V. (22.11.2023): Mobile Roboter richtig verstehen. Juliane Kluge. Online verfügbar unter <https://vdma.org/viewer/-/v2article/render/85848152>, zuletzt geprüft am 18.04.2024.

Williams, M.; Moser, T. (2019): The art of coding and thematic exploration in qualitative research.

Ziegler, Sophie (2023): Untersuchung verschiedener Kommunikationsmittel für ein Roboterschutzfeld im Rahmen der Mensch-Roboter-Interaktion. Masterarbeit. Technische Universität München. Lehrstuhl für Ergonomie.