

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19527 N

Thema

Mobile Mensch-Maschine-Interaktion zur Beauftragung und Steuerung von FTF (MobiMMI)

Berichtszeitraum

01.01.2018 – 30.06.2020

Forschungsvereinigung

Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V. - GVB

Forschungseinrichtung(en)

IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Hannover, 30.08.2020

Ort, Datum

Andreas Seel

i.A. Seel

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) bestehen aus einem oder mehreren Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF), einer Leitsteuerung, Einrichtungen zur Standortbestimmung und Lageerfassung und peripheren Einrichtungen. Sie werden gemäß der VDI 2510 neben bspw. Hängebahnen und Stetigförderern den Fördertechniken zugeordnet. Sie bieten im Vergleich mit konventionellen Transportlösungen von innerbetrieblichen Materialflüssen, z. B. die Verwendung von bemannten Gabelstaplern, einige markante Vorteile: geringere Unfallraten, geringerer Verschleiß durch Fehlbedienung und kostenneutraler Einsatz zu jeder Zeit (Wochenenden, Feiertage, Nachtschicht usw.).

Eine Schwachstelle, durch die FTS ihr volles Potenzial nicht nutzen können, zeigt sich beim FTS-Einsatz in kritischen Betriebsituationen. Unter kritischen Betriebsituationen versteht man in diesem Kontext bspw. außerordentliche Transportaufträge (z. B. Sperr- oder Gefahrgüter), die Adressierung von Aufträgen, die nicht im Aktionsbereich des FTS liegen, und Verhalten bei Störungen (z. B. bei blockierten Wegen). Ein Aktionsbereich eines FTS wird durch das verwendete Navigationsverfahren definiert. FTF bewegen sich auf virtuellen Leitlinien (z. B. Lasernavigation) oder physischen Leitlinien (z. B. optische Markierungen auf dem Boden). Für beide Navigationsarten ist im Voraus die Festlegung eines Aktionsbereichs erforderlich. Nur dieser Bereich kann von den Fahrzeugen befahren werden. Aus diesem Grund kann ein FTF z. B. für das Umfahren von Hindernissen oder das Aufnehmen von fehlerhaft abgestellten Transportgütern nicht den Aktionsbereich verlassen (vgl. Bild 1).

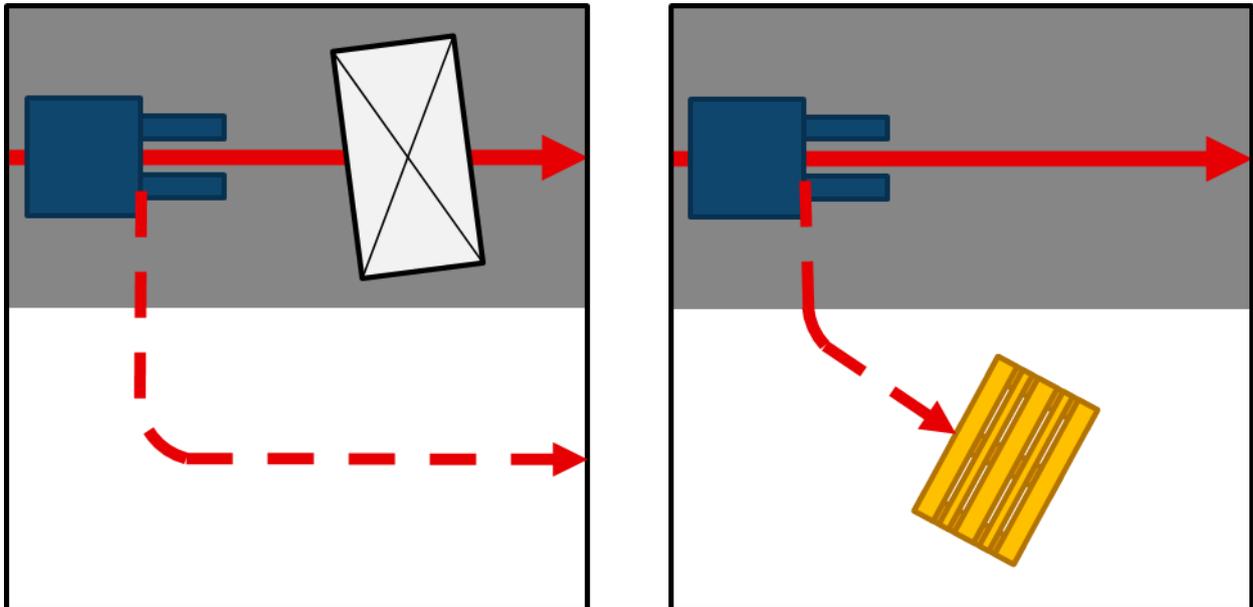


Bild 1: Situationen, in denen ein FTF seinen Aktionsbereich verlassen muss: Ein Gegenstand blockiert den Weg (links) und ein Transporthilfsmittel befindet sich außerhalb des Aktionsbereichs (rechts)

Aktuell wartet das Fahrzeug, bis ein Mitarbeiter den Grund der Störung manuell beseitigt hat. Dafür sind speziell geschulte Mitarbeiter notwendig, die über die Leitsteuerung den Transportauftrag oder den Aktionsraum des FTS anpassen. Diese Mitarbeiter sind insbesondere in KMU häufig gar nicht im eigenen Unternehmen vorhanden, sodass ein externer Dienstleister hinzugezogen werden muss. Eine kostengünstige und schnelle Lösung von kritischen Betriebsituationen ist also nur in den wenigsten Fällen möglich. Darüber hinaus ist es in vielen Fällen so, dass die Mitarbeiter nicht genau feststellen können, was für ein Problem gerade vorliegt. Sie können dem Fahrzeug bzw. dem FTS nicht mitteilen, ob ein Problem bereits

behooben wurde. Diese beiden effizienzsenkenden Zustände lassen auf eine unzureichende Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) schließen.

2. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Das Ziel des Vorhabens war die Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) zwischen Mitarbeitern und FTS bzw. FTF. Dafür sollte ein Assistenzsystem entwickelt werden, das spezielle Fachkenntnisse wie bspw. bzgl. Leitsteuerung oder Programmierung überflüssig macht. Um die inhaltliche Distanz zwischen dem Transportbefehl eines Mitarbeiters und einem Transportauftrag in der Leitsteuerung zu überwinden, sollte die Bedienung des Assistenzsystems multimodal gestaltet sein. Eine multimodale MMI funktioniert über Gesten und Sprache. Eine derartige Interaktion ist den menschlichen Interaktionen aus dem Alltag ähnlich und erfordert deswegen keine besonderen Fachkenntnisse oder Schulungen. Für die multimodale Interaktion wurden eine sprachbasierte Beauftragung, eine gestenbasierte Steuerung und eine blickbasierte Adressierung ausgewählt, da diese die oben beschriebenen kritischen Situationen am besten adressieren.

Die genannte Zielsetzung wurde im Forschungsantrag in drei Teilzielen konkretisiert und wird im Folgenden den erzielten Ergebnissen gegenübergestellt.

Teilziel 1: Erstellung eines Handgestenkatalogs

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag

Erstellung eines Katalogs mit geeigneten Handgesten zur Beauftragung und Steuerung von FTF sowie Regeln zur Auswahl und Interaktion mit mehreren FTF.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens

Zusammen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) wurden in mehreren Sitzungen ein Sprachbefehlskatalog (vgl. Tabelle 1) und ein Handgestenkatalog (vgl. Tabelle 2) erarbeitet. Die Definition der Befehle erfolgte dabei iterativ, sodass erstmal die Anforderungen und Wünsche aus dem PA aufgenommen wurden und anschließend in einer nachgelagerten Arbeit die Umsetzbarkeit vom IPH geprüft wurde. Die Ergebnisse der Prüfung wurden danach dem PA vorgestellt und dienten als Grundlage für eine gemeinsame Optimierung der Sprach- und Handgestenbefehle. Bei diesem Prozess stellte sich heraus, dass es ineffizient war neue Handgesten zu entwickeln, da in Kombination mit dem ausgewählten Assistenzsystem (Datenbrille) bereits Handgesten zur Verfügung standen (vgl. AP 4), die für die Umsetzung einer gestenbasierten Steuerung gemäß der in Arbeitspaket 1 (AP 1) definierten Anforderungen verwendet werden konnten.

Die Adressierung von verschiedenen FTF wurde über einen sprachbasierten Befehl realisiert. Die dafür zur Auswahl stehenden Fahrzeuge wurden dem Anwender über AR-Technik in der Datenbrille angezeigt.

Teilziel 2: Algorithmen zur Gesten- und Objekterkennung

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag

Entwicklung einer kostengünstigen, menschentragbaren Hardware sowie effizienter Algorithmen zur Gesten- und Objekterkennung auf der mobilen Recheneinheit.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens

Nach der ersten PA-Sitzung wurde von der Entwicklung von Hardware abgesehen, da zum Zeitpunkt der Durchführung des Vorhabens bereits geeignete Produkte in Form von Datenbrillen zu erwerben waren (vgl. Einleitung zu Kapitel 3 und AP 3), nicht jedoch zum Zeitpunkt der Antragstellung. Gemäß der mit dem PA definierten Anforderungen wurde in diesem Rahmen die *Microsoft HoloLens*¹ als Assistenzsystem verwendet. Die ausgewählte Datenbrille enthielt bereits die erforderlichen Sensoren sowie eine integrierte und damit mobile Recheneinheit.

Für die Gestenerkennung wurden das *Microsoft Reality Toolkit* und die damit korrespondierende Tap-Geste verwendet. Die Verwendung dieser Elemente hatte den Vorteil, dass eigene Gesten nicht erst zeitaufwendig entwickelt werden mussten und dem Vorhaben trotzdem robuste Gesten zur Umsetzung der multimodalen Interaktion zur Verfügung standen (vgl. AP 4.2).

Für die Objekterkennung wurde ein effizientes Verfahren des Maschinellen Lernens (Überwachtes Lernen) entwickelt. Als besonders geeignete Grundlage hat sich das Neuronale Netz *Yolo3 Tiny* herausgestellt, da es einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenleistung anbot (vgl. AP 4.2).

Teilziel 3: Umsetzung und Validierung

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag

Umsetzung der mobilen MMI als Demonstrator und Validierung im Praxisumfeld.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens

Für die Validierung der mobilen MMI wurde ein Demonstrator realisiert. Der Demonstrator bestand im Wesentlichen aus einem Assistenzsystem in Form einer Datenbrille und einem FTS mit einem FTF. Die Validierungen der einzelnen Funktionalitäten des Demonstrators wurden separat in Versuchsfeld des IPH durchgeführt (vgl. AP 5).

Das verwendete FTS war bereits im Bestand des IPH und musste deswegen nicht extra für das Vorhaben beschafft werden. Für die Umsetzung des Demonstrators hat es sich gemäß den Anforderungen sehr gut geeignet. Darüber hinaus war das FTS bereits in die Infrastruktur des IPH integriert und es bestanden bereits umfangreiche Erfahrungen mit dem Umgang, sodass die Integration sehr effizient gestaltet werden konnte.

Insbesondere die Implementierung der entwickelten Algorithmen z. B. zur Objekterkennung stellte sich als sehr umfangreich heraus. Da bei einer MMI prinzipiell viele Teilsysteme berücksichtigt werden müssen, stellte auch in diesem Vorhaben die Kompatibilität eine besondere Herausforderung bei der Umsetzung dar.

3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Bei der Bearbeitung des AP 1 wurde zu Projektbeginn der Arbeitsplan in Abstimmung mit dem PA aus den folgenden Gründen angepasst:

- Im bisherigen Arbeitsplan war die Entwicklung eines mobilen und menschentragbaren Assistenzsystems zur Mensch-Maschine-Interaktion vorgesehen. Die Entwicklung sollte in den Arbeitspaketen 2 und 3 durchgeführt werden. Eine eingehende Recherche des aktuellen Stands der Technik hat gezeigt, dass solche Assistenzsysteme seit

¹ <https://docs.microsoft.com/de-de/hololens/hololens1-hardware>

Antragstellung in Form von Datenbrillen bereits erhältlich sind. Aus diesem Grund konnten die AP 2 und 3 mit neuen Arbeitsinhalten gefüllt werden.

- Die Recherche hat außerdem ergeben, dass die Algorithmen aus den Bereichen der Bildverarbeitung um Algorithmen des Maschinellen Lernens ergänzt werden müssen, sodass der Aufwand für die Entwicklung deutlich größer geworden ist als zuerst angenommen. Daraus resultierend wurden mehr AP bzw. mehr Personenmonate (PM) für die Entwicklung der Algorithmen notwendig. Diese zusätzlich entstandenen Aufwände wurden in die AP 2 und 3 integriert.

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Gründe wird der bisherige Arbeitsplan angepasst. Der überarbeitete Arbeitsplan ist in

Arbeitspakete	Aufwand				2018												2019												2020					
	Wiss. MA (TV-L E13)	Wiss. MA (TV-L E14)	Techn. MA (TV-L E10)	Hilfswiss. MA	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6						
1 Anforderungsaufnahme	4	0	0	0																														
1.1 Definition von Anwendungsfällen	2																																	
1.2 Erstellung eines Lastenhefts	2																																	
2 Erstellen eines Katalogs zur sprach- und gestenbasierten MMI	2	0	0	2																														
2.1 Definition von Sprachbefehlen	1			1																														
2.2 Definition von Handgesten	1			1																														
3 Konzeption eines Assistenzsystems	7	0	2	7																														
3.1 Definition von Schnittstellen	1		1	1																														
3.2 Konzeption der sprachbasierten Interaktion	2			2																														
3.3 Konzeption der blickbasierten Interaktion	2			2																														
3.2 Konzeption der gestenbasierten Interaktion	2		1	2																														
4 Realisierung des Konzepts für das Assistenzsystem	4	0	4	5																														
4.1 Integration der Algorithmen	1		1	2																														
4.2 Implementierung und Test der Algorithmen	3		3	3																														
5 Verifizierung des Assistenzsystems im intralogistischen Umfeld	7	0	0	6																														
5.1 Validierung der sprachbasierten Interaktion	2			2																														
5.2 Validierung der gestenbasierten Interaktion	3			2																														
5.3 Validierung der blickbasierten Interaktion	2			2																														
6 Projektmanagement und Dokumentation	1	2		1																														
	25	2	6	21																														

★ Meilenstein

Bild 2 dargestellt. Im überarbeiteten Arbeitsplan sind die Konzeption und Umsetzung eines Assistenzsystems nicht vorgesehen. Die frei gewordenen PM wurden für die Entwicklung von Algorithmen eingeplant. Die Gesamtsumme der Personalkosten wurde um einen Personalmonat im Jahr 2020 (AP 5.2) erweitert. Im Gegenzug wurden keine Sachmittel beansprucht, da die notwendige Hardware im IPH bereits vorhanden war.

Arbeitspakete	Aufwand				2018						2019						2020											
	Wiss. MA (TV-L E13)	Wiss. MA (TV-L E14)	Techn. MA (TV-L E10)	Hilfswiss. MA	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
1 Anforderungsaufnahme	4	0	0	0																								
1.1 Definition von Anwendungsfällen	2																											
1.2 Erstellung eines Lastenhefts	2																											
2 Erstellen eines Katalogs zur sprach- und gestenbasierten MMI	2	0	0	2																								
2.1 Definition von Sprachbefehlen	1			1																								
2.2 Definition von Handgesten	1			1																								
3 Konzeption eines Assistenzsystems	7	0	2	7																								
3.1 Definition von Schnittstellen	1		1	1																								
3.2 Konzeption der sprachbasierten Interaktion				2																								
3.3 Konzeption der blickbasierten Interaktion	2			2																								
3.2 Konzeption der gestenbasierten Interaktion	2		1	2																								
4 Realisierung des Konzepts für das Assistenzsystem	4	0	4	5																								
4.1 Integration der Algorithmen	1		1	2																								
4.2 Implementierung und Test der Algorithmen	3		3	3																								
5 Verifizierung des Assistenzsystems im intralogistischen Umfeld	7	0	0	6																								
5.1 Validierung der sprachbasierten Interaktion	2			2																								
5.2 Validierung der gestenbasierten Interaktion	3			2																								
5.3 Validierung der blickbasierten Interaktion	2			2																								
6 Projektmanagement und Dokumentation	1	2		1																								
	25	2	6	21																								

★ Meilenstein

Bild 2: Überarbeiteter Arbeitsplan

AP 1: Anforderungsaufnahme

AP 1.1: Definition von Anwendungsfällen

Durchgeführte Arbeiten

Die Definition von Anwendungsfällen erfolgte in zwei Schritten. Zuerst werden mögliche Anwendungsfälle definiert. Diese Anwendungsfälle dienen als Diskussionsgrundlage für ein Workshops zur endgültigen Definition von Anwendungsfällen. Dieser Workshop wurde mit dem PA durchgeführt und erfolgte im Rahmen des ersten Projekttreffens. Im Folgenden sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Erzielte Ergebnisse

Folgende Anwendungsfälle wurden für das Vorhaben definiert:

- A. Ein Bediener adressiert sprachbasiert ein Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF)
- B. Ein Bediener beauftragt ein FTF sprachbasiert ein bekanntes Förderhilfsmittel von einem bekannten Lagerplatz aufzunehmen
- C. Ein Bediener beauftragt ein FTF sprachbasiert ein bekanntes Förderhilfsmittel auf einem bekannten Lagerplatz abzulegen
- D. Ein Bediener adressiert blickbasiert ein unbekanntes Förderhilfsmittel
- E. Ein Bediener adressiert blickbasiert einen unbekanntes Lagerplatz
- F. Ein Bediener steuert gestenbasiert ein aktives Lastaufnahmemittel (LAM) eines FTF

Für die Umsetzung der gestenbasierten Befehle der Anwendungsfälle D und E soll ein unbekanntes Förderhilfsmittel bzw. ein unbekannter Lagerplatz im Bildbereich des Kamerasystem der Datenbrille positioniert werden. Anschließend wird Anhand von Bildverarbeitung und Machine Learning ein Identifiziert.

In dem Workshop hat sich gezeigt, dass die Entwicklung einer gestenbasierten Steuerung die größte Herausforderung darstellt. Im Vorgängerprojekt „FTF Out of the box“ (BMWi-Vorhaben 01MA13005E) wurde im IPH zwar eine gestenbasierte Steuerung umgesetzt, diese für aber nur für die Erkennung von Körpergesten entwickelt. Das Vorhaben MobiMMI benötigt jedoch Handgesten für die Steuerung von FTF. Für den Fall, dass der Anwendungsfall F nicht umgesetzt werden kann, wurde ein weiterer Anwendungsfall definiert, der alternativ verwendet werden kann:

- G. Ein Bediener steuert mit einer Fernbedienung wie z. B. einem Game-Controller ein aktives Lastaufnahmemittel eines FTF.

Das LAM und das Förderhilfsmittel sind nicht näher definiert, um den Lösungsraum und damit den denkbaren Anwendungsfall nicht zu stark einzuschränken. In Bezug auf das LAM und das Förderhilfsmittel wird die Entwicklung des Assistenzsystems zuerst auf den einfachsten Fall ausgelegt, ohne die Erweiterbarkeit auf komplexere Fälle einzuschränken.

AP 1.2: Erstellung eines Lastenhefts

Durchgeführte Arbeiten

Das Lastenheft beinhaltet u. A. alle Ergebnisse, die bei dem ersten Projekttreffen erarbeitet worden sind. Es enthält Anwendungsfälle für das Vorhaben, Anforderungen an das Assistenzsystem und Rahmenbedingungen für das Vorhaben. Das Lastenheft wurde im Anschluss an das erste Projekttreffen erstellt und an die Mitglieder des PA verschickt.

Erzielte Ergebnisse

Das Ergebnis dieses AP ist ein Lastenheft zur Entwicklung eines Assistenzsystems zur mobilen Mensch-Maschine-Interaktion. Das Lastenheft wurde dem Schlussbericht gesondert beigelegt.

AP 2: Erstellen eines Katalogs zur sprach- und gestenbasierten MMI

AP 2.1: Definition von Sprachbefehlen

Durchgeführte Arbeiten

Die Anwendungsfälle aus AP 1.1 wurden in diesem AP genutzt, um daraus Sprachbefehle für die sprachbasierten Funktionen abzuleiten. Der Katalog wurde anschließend mit Sprachbefehlen für eine sprachbasierte Menünavigation wie z. B. Schlüsselwörter ergänzt.

Für erste Experimente soll die sprachbasierte Interaktion mit FTF auf einem Fahrerlosen Transportsystem (FTS) der Götting KG (Mitglied mit PA) umgesetzt werden. Das FTF mit einem einfachen aktiven Hub-LAM ist in Bild 3 dargestellt. Die Sprachbefehle wurde an Bedingungen, die durch das FTS gegeben sind, angepasst. Um eine die Entwicklung der Algorithmen zur sprachbasierten Interaktion zu vereinfachen, werden die Sprachbefehle in Englischer Sprache erstellt.



Bild 3: Ein Bediener steuert multimodal ein FTF

Erzielte Ergebnisse

Die für das Vorhaben definierten Sprachbefehle sind in Tabelle 1 aufgelistet. Da die sprachbasierte Beauftragung nicht für die direkte Steuerung eines FTF vorgesehen war, wurde von Steuerbefehlen wie z. B. „vor“, „zurück“ oder „nach links“ abgesehen. Die *kursiv* dargestellten Inhalte stellen Variablen dar, sodass eine Vielzahl an Befehlen daraus generiert werden kann. Auf diese Weise ließ sich das gesamte Aktionsspektrum bei einer FTF-Beauftragung mit nur fünf Sprachbefehlen abbilden.

Tabelle 1: Definierte Sprachbefehle

Befehl	Beschreibung
MobiMMI	Schlüsselwort
AGV <i>NUMMER</i>	Adressierung der FTF <i>NUMMER</i>
Go to storage place <i>LAGERNUMMER</i> and dip	Ablegen eines Förderhilfsmittels am Lagerort <i>LAGERNUMMER</i>
Go to storage place <i>LAGERNUMMER</i> and lift	Aufnehmen eines Förderhilfsmittels vom Lagerort <i>LAGERNUMMER</i>

AP 2.2: Definition von Handgesten

Durchgeführte Arbeiten

Die Anwendungsfälle aus AP 1.1 wurden in diesem AP genutzt, um daraus Handgesten für die gestenbasierten Funktionen abzuleiten.

Erzielte Ergebnisse

Die für das Vorhaben definierten Handgesten sind in Tabelle 2 aufgelistet. Anfangs war die gestenbasierte Steuerung nur auf die Steuerung des LAM beschränkt, daher fehlen in diesem Handgestenkatalog Befehle zur Steuerung des FTF. Bei der Projektbearbeitung (vgl. Kapitel 3) stellte sich heraus, dass mit der ausgewählten Datenbrille eine aufwandsarme Implementierung

gestenbasierter FTF-Steuerung möglich war. Aus diesem Grund wurde der Handgestenkatlog bei der weiteren MMI-Entwicklung durch eine Tap-Geste ersetzt.

Tabelle 2: Definierte Handgesten

Befehl	Beschreibung
Beide Hände mit der inneren Handfläche nach oben gedreht nach oben bewegen	<ul style="list-style-type: none"> – Heben des LAM – Die Bewegungsgeschwindigkeit der Hände gibt die Bewegungsgeschwindigkeit des LAM im Rahmen der technischen Machbarkeit an – Die Endposition der Hände gibt die Endposition des LAM im Rahmen der technischen Machbarkeit an
Beide Hände mit der inneren Handfläche oben gedreht nach unten bewegen	<ul style="list-style-type: none"> – Senken des LAM – Die Bewegungsgeschwindigkeit der Hände gibt die Bewegungsgeschwindigkeit des LAM im Rahmen der technischen Machbarkeit an – Die Endposition der Hände gibt die Endposition des LAM im Rahmen der technischen Machbarkeit an

AP 3: Konzeption eines Assistenzsystems

Durchgeführte Arbeiten

In diesem AP wurden einige vorbereitende und einleitende Arbeiten für die AP 3.1 bis AP 3.4 durchgeführt. Mit diesem Ziel wurden zuerst Untersuchungen des Gesamtsystems vorgenommen, um diese Ergebnisse einer hohen Abstraktionsebene als Struktur für die feingranulareren, folgenden AP nutzen zu können. Dafür wurde die erforderliche Hardware für das Gesamtsystem identifiziert und charakterisiert. Anschließend wurden Systembestandteile inhaltlich zur besseren Entwicklung und Fehlerbehebung in funktionale Gruppen eingeteilt.

Die AP 3.2 bis 3.4 enthalten konzeptionelle Arbeiten. Aus diesem Grund sind die Methodik und Vorgehensweise in diesen AP identisch. Um Redundanzen zu vermeiden, werden die durchgeführten Arbeiten für diese AP schon vorab erläutert.

Für jede der drei funktionalen Gruppen wurden in Zusammenarbeit mit dem PA u. a. in Ausschusssitzungen zuerst die Anforderungen definiert. Im darauffolgenden Schritt wurden die Anforderungen als Grundlage für das Ableiten von technischen Spezifikationen für die erforderliche Hardware verwendet. Anschließend wurden Konzepte entwickelte, in Form von Aktivitätsdiagrammen visualisiert und bewertet.

Erzielte Ergebnisse

In Bild 4 ist das Grobkonzept des Assistenzsystems illustriert, das im Rahmen der vorbereitenden und einleitenden Tätigkeiten entstanden ist. Im Mittelpunkt steht der Anwender, der das Assistenzsystem mit sich führt. Die wesentlichsten Bestandteile des Assistenzsystems sind

- ein Positionierungssystem für Indoor-Umgebungen (engl. *Indoor Positioning System; IPS*),
- mindestens eine RGB-Kamera für die Datenerfassung,

- eine Form der mobilen Energieversorgung (hier: Lithium-Ionen-Akkumulator),
- eine Recheneinheit zur Datenverarbeitung und
- ein Mikrofon mit Kopfhörern für die akustische Interaktion.

Die Interaktion erfolgt mit mehreren FTF (hier: FTF 1 bis 3), die sich in der gleichen Produktions- und Logistikumgebung wie der Anwender befinden.

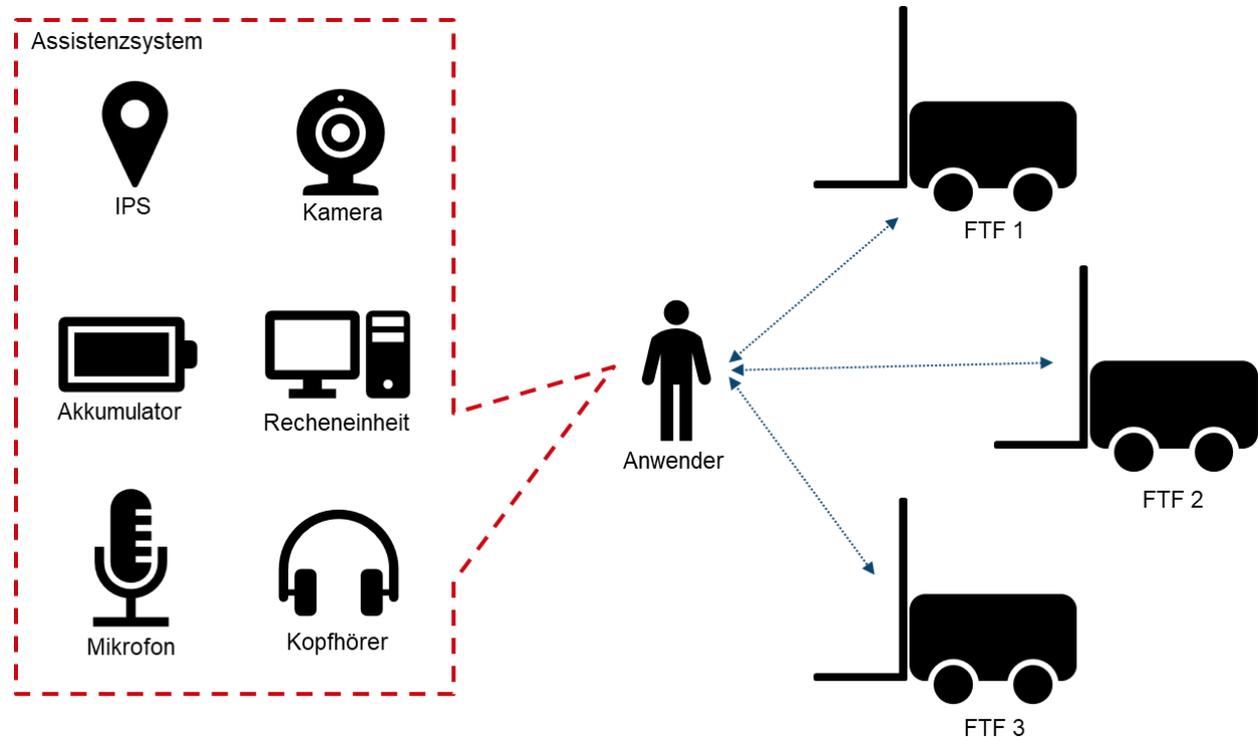


Bild 4: Grobkonzept für das Assistenzsystem für die multimodale Mensch-Maschine Interaktion

Bereits in dieser grobkonzeptionellen Projektphase zeichnete sich ab, dass eine Datenbrille allen wesentlichen Anforderungen entsprach. Die Verwendung einer Datenbrille brachte gleichzeitig den Vorteil, dass ohne großen zeitlichen und finanziellen Aufwand ein in sich voll funktionsfähiges System zur Weiterentwicklung zur Verfügung stand. Weitere Analysen ergaben, dass sich bedingt durch die technischen Spezifikationen (insbesondere der verfügbaren Rechenleistung) die Microsoft HoloLens besonders gut für diesen Einsatzzweck eignete. Diese Datenbrille war darüber hinaus bereits im Bestand des IPH.

Die funktionale Gruppierung der Assistenzsystems ist in Bild 5 dargestellt. Das Assistenzsystem wurde in die vier funktionalen Gruppen

- sprachbasierte Beauftragung,
- gestenbasierte Steuerung und
- blickbasierte Adressierung

eingeteilt. Diese Einteilung war im Sinne einer einfacheren Bearbeitbarkeit und effektiveren Softwareentwicklung zielführend. Außerdem lassen sich durch diese Einteilung Teil-Anwendungsfälle leichter abbilden, sodass eine Validierung der funktionalen Gruppen separat vorgenommen werden konnte.

Darüber hinaus zeigt Bild 5, welche essenziellen Bestandteile der Hardware zu welchen funktionalen Gruppen zugeordnet wurden. Die Kopfhörer wurden in allen Gruppen für eine visuelle Rückmeldung benötigt. Der Akkumulator und die Recheneinheit wurden ebenfalls bei allen Gruppen für die Datenverarbeitung verwendet.

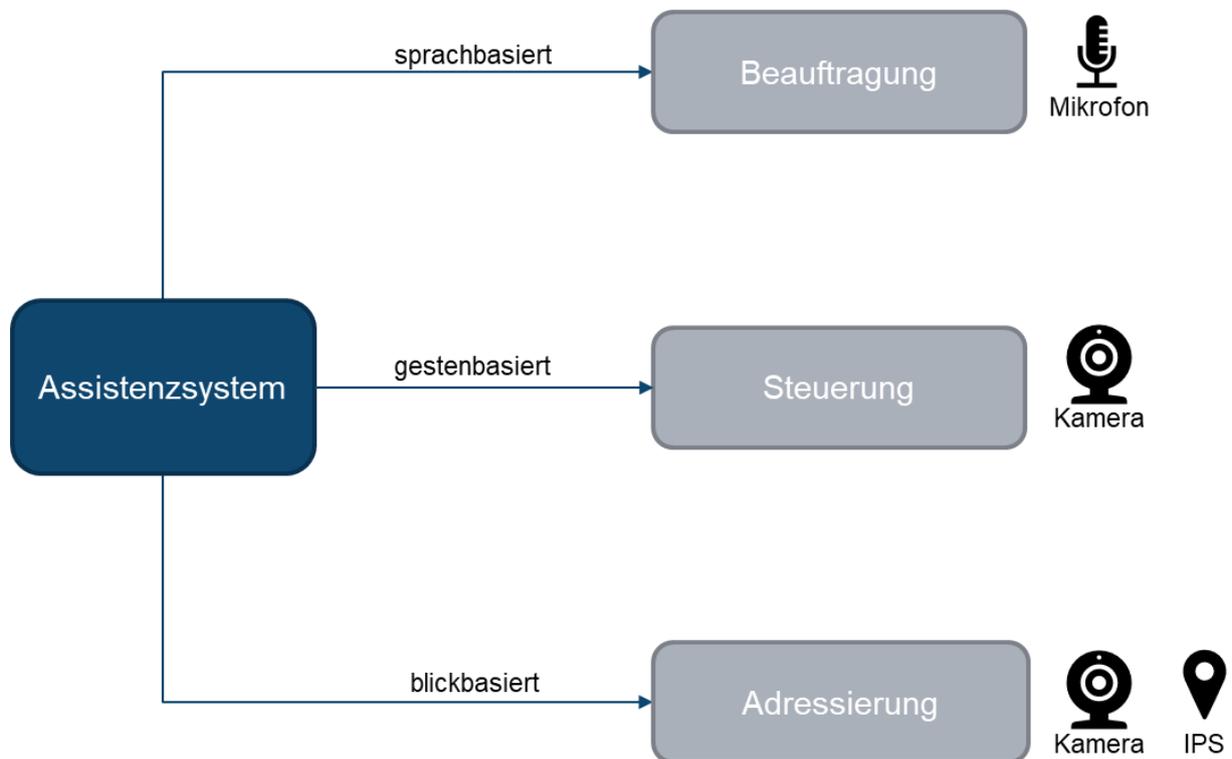


Bild 5: Einteilung des Assistenzsystems in funktionale Gruppen

AP 3.1: Definition von Schnittstellen

Durchgeführte Arbeiten

In diesem AP wurde das Grobkonzept des Assistenzsystems (vgl. Bild 4) verwendet und zwischen den einzelnen Elementen Verknüpfungen für den Informationsfluss erstellt und dafür geeignete Schnittstellen definiert.

Das primäre Ziel der Schnittstellendefinition ist die Sicherstellung der Kompatibilität zwischen den einzelnen Hard- und Softwareelementen des Gesamtsystems.

In einigen Fällen wurden bei der Schnittstellendefinition Diskrepanzen zum Grobkonzept aufgedeckt, sodass das Grobkonzept iterativ angepasst und optimiert wurde.

Erzielte Ergebnisse

Konzeptionell war vorgesehen, dass die vollständige Datenverarbeitung auf der Datenbrille durchgeführt wird, um dem Anwender eine uneingeschränkte Mobilität zu gewährleisten. Bei der Definition der Schnittstellen hat sich gezeigt, dass das nicht möglich war. Für die Demonstration der multimodalen Interaktion musste das angestrebte Assistenzsystem mit einem FTS kommunizieren. Da die Auftragsverwaltung bei FTS über die Leitsteuerung verwaltet werden, war darüber hinaus eine Verbindung zur Leitsteuerung notwendig. Nach Absprache mit dem FTS-Hersteller und PA-Mitglied Götting KG stellte sich heraus, dass es nicht möglich war diese Leitsteuerung auf der Datenbrille zu betreiben. Aus diesem Grund wurde in Ergänzung zu der Recheneinheit, die auf der Datenbrille integriert war, ein stationärer Computer benötigt. Der stationäre Computer wurde mit dem Betriebssystem Ubuntu 16.04 betrieben, da dieses Betriebssystem mit dem auf den FTF verwendeten Robot Operating System (ROS) *Kinetic Kame* kompatibel war. Die Verbindung des stationären Computers mit dem Assistenzsystem bzw. dem FTF wurde mit WLAN eingerichtet.

Das ROS hat eine besondere Bedeutung in der Robotik insgesamt und wurde deswegen auch für dieses Projekt ausgewählt. Es ist eine Open Source Middleware, die die Kommunikation zwischen Algorithmen auf der einen Seite und (Roboter-) Hardware auf der anderen Seite ermöglicht. Im Fall des Assistenzsystems könnte ROS bspw. die Sensordaten des FTF auslesen und sie an eine Recheneinheit auf der Datenbrille schicken. In der Recheneinheit werden die Daten verarbeitet, wobei hierfür verschiedene Programmiersprachen wie bspw. Python oder C# verwendet werden können. Anschließend werden die Ergebnisse der Datenverarbeitung wieder bspw. als Aktionsbefehl über ROS an das FTF gesendet.

Im Rahmen der Grobkonzeption hat es sich darüber hinaus auch gezeigt, dass die Technik der erweiterten Realität (engl. *Augmented Reality*, AR) der Datenbrille sehr vorteilhaft für visuelle 3D-Rückmeldungen an den Anwender genutzt werden konnte. Neben vorimplementierten Schnittstellen für verschiedenen Bibliotheken, Programmiersprachen und Sensoren bietet ROS ebenfalls eine Schnittstelle für AR-Visualisierungen Datenbrille über die Entwicklungsumgebung *Unity*² der.

AP 3.2: Konzeption der sprachbasierten Interaktion

Erzielte Ergebnisse

Bei der Konzeption der sprachbasierten Interaktion hat sich eine visuelle Rückmeldung an den Anwender mittels AR-Technik als sehr vielversprechend erwiesen. Anhand dieser virtuellen 3D-Darstellungen erhielt der Anwender die Möglichkeit die vom Assistenzsystem verstandenen Befehle visuell zu überprüfen und mit einem weiteren Sprachbefehl zu bestätigen.

Die Datenbrille wurde mit einigen Softwarebausteinen ausgeliefert. Einer dieser Grundbausteine war eine native Schnittstelle zum .NET-Framework und zu dessen Bibliothek. Dort waren wesentliche Elemente für eine Spracherkennung bereits integriert und sollten deswegen für die sprachbasierte Beauftragung verwendet werden.

In Bild 6 ist das Aktivitätsdiagramm der sprachbasierten Beauftragung aufgezeigt. Aus Gründen der Sicherheit wird zuerst nach einem Schlüsselwort gesucht, das der Anwender sagt. Sobald das Schlüsselwort erkannt wurde, wird die Erkennung von Befehlen für das FTS gestartet. In der Konzeptphase wurden die fünf Befehle

- Prozess abbrechen,
- FTF auswählen,
- Objekt suchen (blickbasierte Adressierung),
- FTF beauftragen (sprachbasierte Beauftragung) und
- FTF steuern (gestenbasierte Steuerung)

vorgesehen. Nachdem ein Befehl erkannt wird, wird das jeweilige Modul zur Umsetzung des Befehls ausgeführt. Wenn kein Schlüsselwort oder kein Befehl erkannt werden kann, wird eine Rückmeldung an den Anwender ausgeführt. Der Anwender hat dann die Möglichkeit die Spracherkennung zu wiederholen oder den Prozess abzubrechen.

² <https://unity.com/>

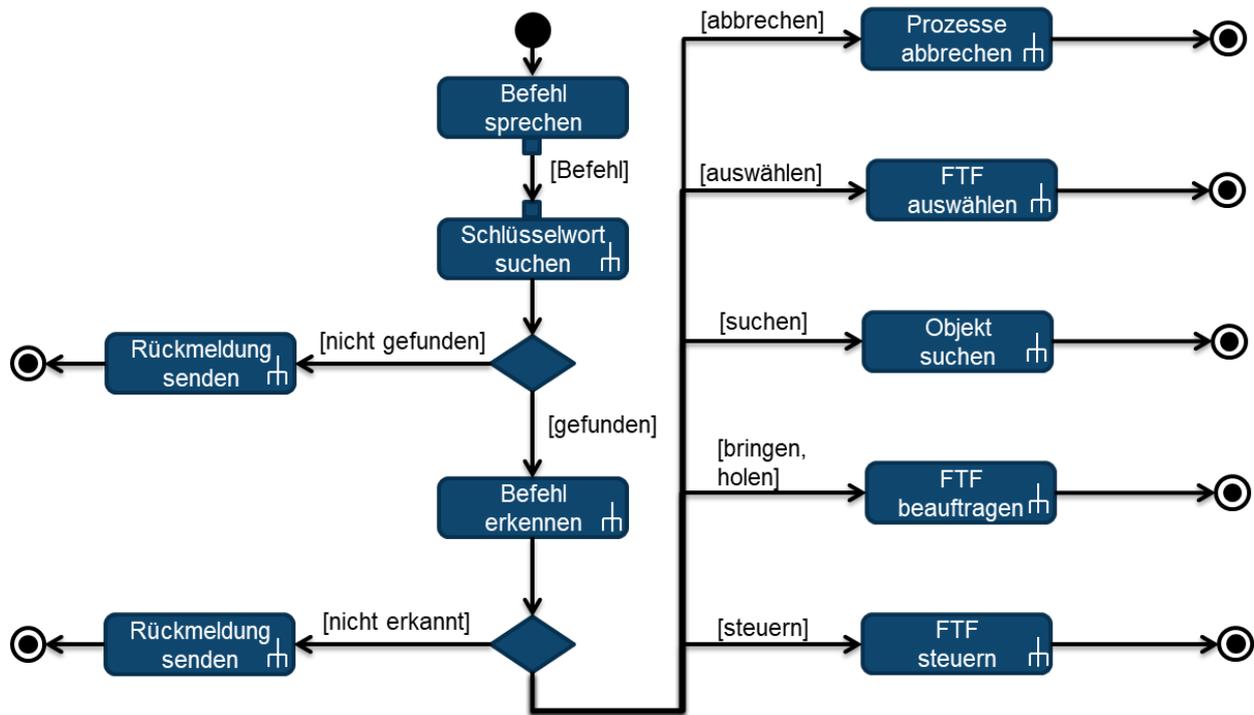


Bild 6: Aktivitätsdiagramm für die sprachbasierte Beauftragung

AP 3.3: Konzeption der blickbasierten Interaktion

Erzielte Ergebnisse

In Bild 7 ist das Aktivitätsdiagramm für die blickbasierte Adressierung dargestellt. Der Ablauf beginnt bei einer Bildakquise, die mit einem Bildsensor wie bspw. einer RGB-Kamera durchgeführt wird. Der Bildsensor erfasst eigentlich eine Sequenz von Bildern. Für eine vereinfachte Darstellung wird in dem Aktivitätsdiagramm nur ein einzelnes Bild berücksichtigt. Jedes Bild wird als Eingabe für einen Algorithmus zur Objekterkennung verwendet. Vielversprechende Ansätze für eine Objekterkennung in Echtzeit lieferten die Methoden des überwachten Lernens aus dem Fachbereich des maschinellen Lernens. Die für dieses Projekt relevanten Objekte waren Förderhilfsmittel wie bspw. Europoolpalletten oder Kleinlastträger. Falls kein Objekt erkannt werden kann, werden so lange neue Bilder ausgewertet bis eine definierte maximale Zeit t_{\max} überschritten wird. Wird bis dahin kein Objekt erkannt, wird eine Rückmeldung an den Anwender gesendet und der Vorgang abgebrochen. Für den Fall, dass ein Objekt erkannt wird, wird das Objekt mittels AR-Technik in der Datenbrille durch bspw. einen kontextsensitiven, roten 3D-Rechteck markiert. Der Anwender hat nun die Möglichkeit das markierte Objekt zu überprüfen und bei Richtigkeit zu bestätigen. Wird kein richtiges Objekt erkannt, beginnt die Objekterkennung bei der Bildakquise erneut. Wenn das richtige Objekt erkannt wird, wird der Bildausschnitt mit dem Objekt an die Objektlagemessung weitergesendet.

Die Lagemessung besteht aus den drei Algorithmen

- Entfernung messen,
- Eigenlage messen und
- Orientierung des Objekts bestimmen.

Diese drei Algorithmen laufen gleichzeitig ab. Die Ergebnisse dieser Algorithmen werden gesammelt und für die Berechnung der Objektlage verwendet. Abschließend wird die Objektlage als Befehl an die Leitsteuerung gesendet und dem Anwender eine Rückmeldung über die erfolgreiche Lagebestimmung eingeblendet.

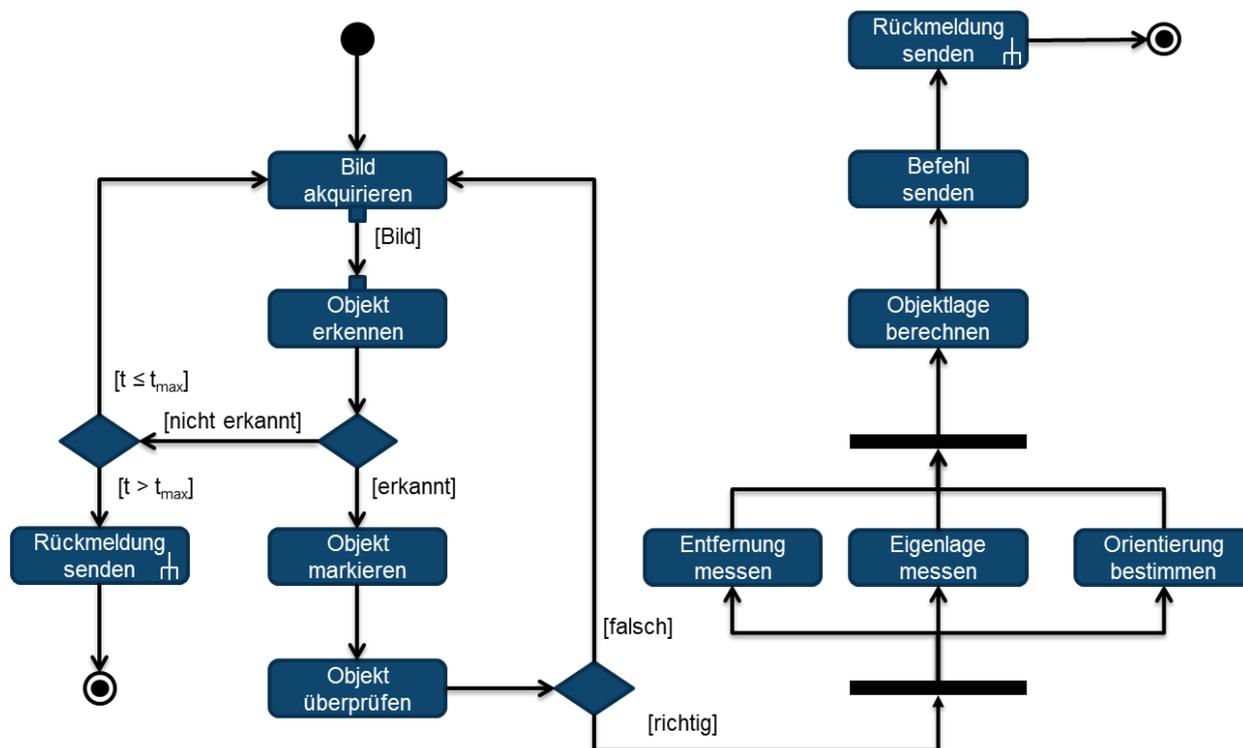


Bild 7: Aktivitätsdiagramm für die blickbasierte Adressierung

AP 3.4: Konzeption der gestenbasierten Interaktion

Erzielte Ergebnisse

In Bild 8 ist das Aktivitätsdiagramm für die gestenbasierte Steuerung dargestellt. Die Erkennung von Gesten besteht aus zwei Schleifen, die gleichzeitig ablaufen. Dabei besteht nur in einer Schleife die Möglichkeit den Ablauf zu beenden.

Die erste Schleife umfasst die Gestenerkennung selbst (linke Schleife in Bild 8). Die Gestenerkennung beginnt mit einer Bildakquise. Ähnlich wie im Aktivitätsdiagramm für die blickbasierte Adressierung (vgl. Bild 7), ist hier zur Vereinfachung nur ein Bild statt einer Bildsequenz dargestellt. Das Bild dient einem Algorithmus zur Gestenerkennung als Eingabe. Im Unterschied zur blickbasierten Adressierung wird die gestenbasierte Steuerung nicht automatisch nach einer Zeit t_{max} abgebrochen. Stattdessen erfolgt die Beendigung der Gestenerkennung manuell in der zweiten Schleife. Im Gegensatz zur Objekterkennung, kann es bei der Gestenerkennung zu längeren Zeiträumen ohne das Ausführen einer Geste durch den Anwender kommen. Ein automatisiertes Abbrechen des Vorgangs würde die Tätigkeiten behindern. Darüber hinaus ist das Ende einer gestenbasierten Steuerung nicht klar definierbar, deswegen muss der Anwender die Möglichkeit haben muss die Steuerung manuell und nach Bedarf beenden zu können.

Die zweite Schleife umfasst eine sprachbasierte Erkennung von Befehlen ähnlich der sprachbasierten Adressierung (vgl. Bild 6). Im Unterschied zur sprachbasierten Adressierung steht hier nur ein Befehl zur manuellen Beendigung der gestenbasierten Steuerung zur Verfügung. Bei erfolgreicher Erkennung dieses Sprachbefehls wird der Ablauf zur gestenbasierten Steuerung beendet werden.

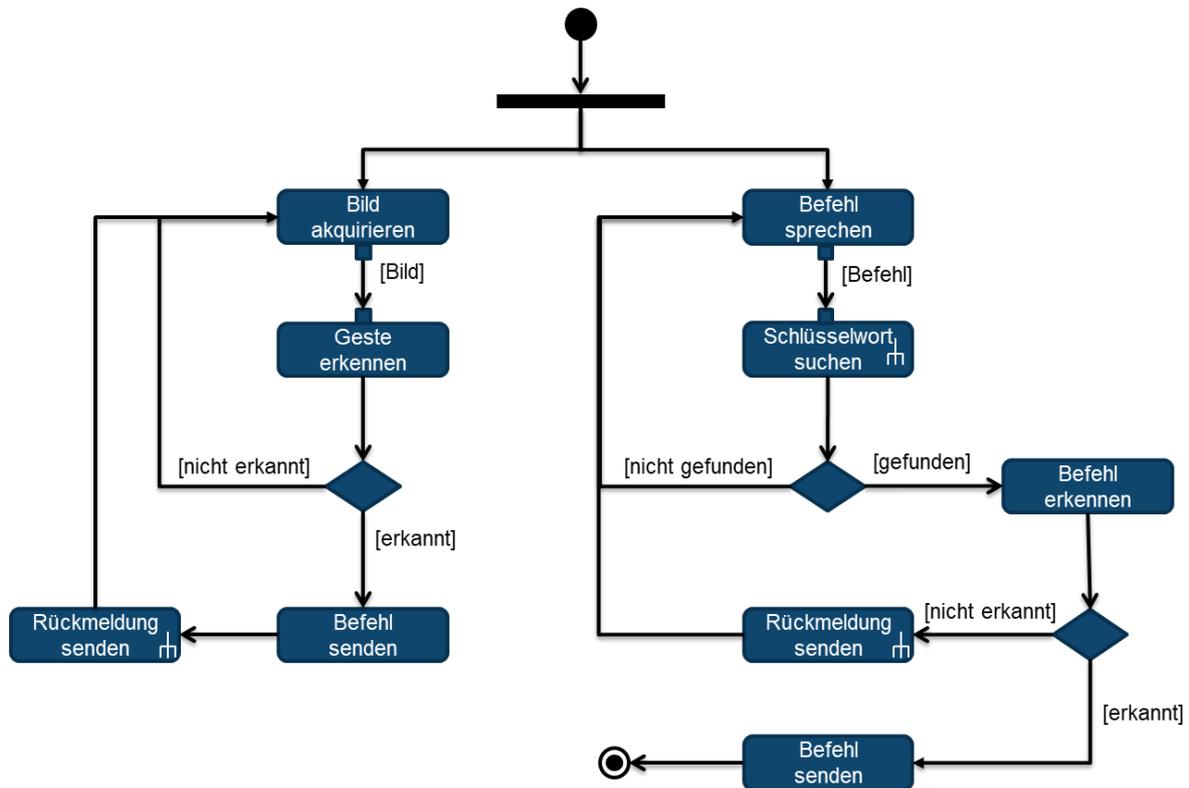


Bild 8: Aktivitätsdiagramm für die gestenbasierte Steuerung

AP 4: Realisierung des Konzepts für das Assistenzsystem

AP 4.1: Integration der Algorithmen

Durchgeführte Arbeiten

Da sich bei Projektstart gemeinsam mit dem PA dafür entschieden wurde auf die Entwicklung eines eigenen Assistenzsystems zugunsten der Anschaffung einer Datenbrille zu verzichten, bestand der Schwerpunkt des Projekts in der Entwicklung von Algorithmen hin zu einer Demonstrationssoftware. Aus Sicht der Softwareentwicklung bietet es sich an die Entwicklung in sog. Branches (engl. Zweige) zu gliedern. Branches bieten die Möglichkeit einzelne Softwareelemente unabhängig zu entwickeln und zu testen, ohne dass dabei die anderen Elemente beeinträchtigt werden. Ausgehen von einem Master Branch lassen sich auf diese Weise zu jeder Zeit neue Branches abspalten und fertig entwickelte Branches problemlos in den Master Branch integrieren.

Die Integration der einzelnen Algorithmen und Module wurden mittels ROS organisiert. Da ROS eine hohe Kompatibilität zu allen Elementen der Demonstrationssoftware aufwies, bot es sich an die Kommunikation von bspw. Zwischenergebnissen und Messdaten über ROS umzusetzen.

Erzielte Ergebnisse

In Anlehnung an die Konzeption des Assistenzsystems in AP 3, wurde die Entwicklung der Demonstrationssoftware zuerst in drei Branches eingeteilt. Diese drei Branches entsprachen der funktionalen Gruppierung der Assistenzsystems (vgl. Bild 5). Im Laufe der Entwicklung zeigte sich, dass die Module der Objekterkennung und der Lagebestimmung aus der funktionalen Gruppe der blickbasierten Adressierung aufwendiger und komplexer waren als es am Anfang eingeschätzt wurde. Aus diesem Grund wurden diese beiden Module nochmals aufgeteilt und separat voneinander entwickelt. Um die volle Integrierbarkeit des Ablaufs weiterhin gewährleisten

zu können, wurde eine neue Schnittstelle (durch den Anwender ausgewählter Bildbereich im RGB-Format mit einer Auflösung von 480x480 px) definiert. Da von Anfang an die Verwendung von Branches vorgesehen war, konnte diese Umstellung ohne große Aufwände in die bestehende Struktur integriert werden.

AP 4.2: Implementierung und Test der Algorithmen

Durchgeführte Arbeiten

In diesem AP wurden die Algorithmen und Module der jeweiligen Branches (vgl. AP 4.1) auf die Datenbrille und auf den stationären Rechner implementiert. Die Auswahl der Zielplattformen erfolgte nach der erforderlichen Rechenleistung und dem Implementierungsaufwand. Während der stationäre Rechner mehr Rechenleistung zur Verfügung stellte, war eine Implementierung auf der Datenbrille durch ihre gute Integration in der Systemarchitektur aufwandsärmer.

Erzielte Ergebnisse

Die sprachbasierte Beauftragung benötigte vergleichsweise wenig Rechenleistung, weswegen sie zugunsten eines geringeren Implementierungsaufwandes auf der Datenbrille umgesetzt wurde. Für die Implementierung wurden Bibliotheken des .Net-Frameworks für Spracherkennung (Cortana) verwendet, was den Aufwand zusätzlich reduzierte. In der Spracherkennung dieser Bibliothek stand nur für die englische Sprache zu Verfügung. Da eine Beauftragung in englischen Sprachen als für ausreichend für Demonstrationszwecke befunden wurde, wurden die Sprachebefehle aus Tabelle 1 nicht in deutsche Sprache implementiert. Die Standardspracherkennung des .NET-Frameworks wurde bei der Implementierung modifiziert und auf den Anwendungsfall in der Produktions- und Logistikumgebung angepasst. Die Modifikation bestand aus der Ergänzung eines Sprachmodells, das relevante Wortkombinationen beinhaltete. Auf diese Weise sollte die Fehlerrate bei der Spracherkennung reduziert werden. Der Ablauf Beauftragung konnte wie in der Konzeption vorgesehen (vgl. Bild 6) realisiert werden. Als Schlüsselwort wurde die Kurzform des Vorhabens „MobiMMI“ verwendet.

Bei der blickbasierten Adressierung sollte sowohl die Objekterkennung als auch die Lagebestimmung auf die stationären Rechenleistung ausgelagert werden, da beide Branches besonders viel Rechenleistung benötigten. Bei der Objekterkennung konnte eine vollständige Implementierung und Validierung auf der Zielplattform vorgenommen werden. Für die Lagebestimmung stellte sich heraus, dass die Bibliothek *AForge.NET*³ notwendig war. Diese Bibliothek besaß eine geringe Kompatibilität zum Gesamtsystem. Aus diesem Grund forderte die Implementierung der Lagebestimmung auf der Zielplattform einen besonders hohen Aufwand und wurde deswegen alternativ auf einer Testplattform validiert.

Für die Implementierung der Objekterkennung wurde Methoden des maschinellen Lernens (überwachtes Lernen) verwendet. Als Grundlage wurde das vortrainierte neuronale Netz *Yo!o3 Tiny* eingesetzt, da es einen geeigneten Kompromiss aus Leistungsfähigkeit und erforderlicher Rechenleistung bot. Das Netz wurde auf die Anforderungen des Anwendungsfalls weitertrainiert, sodass final auch das Erkennen von Förderhilfsmitteln (in diesem Fall Europoolpaletten) ermöglicht wurde.

Für die Implementierung der Lagebestimmung wurde ein weiterentwickeltes modellbasiertes Verfahren basierend auf dem POSIT-Algorithmus⁴ verwendet. Dieser Algorithmus wurde u. a.

³ <http://www.aforogenet.com/framework/>

⁴ DEMENTHON, Daniel; DAVIS, Larry: Model-Based Object Pose in 25 Lines of Code. In: International Journal of Computer Vision (1995)

durch vorangestellte Verfahren der Farbsegmentierung aus der Open Source Bibliothek *OpenCV* und selbst entwickelten Algorithmen zur Zuweisung der aktuellen Perspektive ergänzt.

Für die Implementierung der gestenbasierten Steuerung wurde das *Mixed Reality Toolkit* von Microsoft und die bereits vorimplementierte Tap-Geste der Datenbrille eingesetzt. Auf diese Weise konnte die erforderliche Rechenleistung signifikant reduziert werden, sodass diese funktionale Gruppe auf der Datenbrille umgesetzt wurde. In Bild 9 sind virtuelle AR-Steurelemente abgebildet, die ein Anwender über die Datenbrille eingeblendet bekommt und zur Steuerung von FTF nutzen kann. Die Steuerung erfolgt über einen Steuerknüppel, an dem man mit der Tap-Geste ziehen kann. Die Zugrichtung und die Zugstärke gibt dabei die Richtung bzw. die Fahrgeschwindigkeit des FTF an. Das LAM lässt sich über virtuelle Knöpfe bedienen, die ebenfalls mit der Tap-Geste ausgelöst werden können. Für eine höhere Benutzerfreundlichkeit wurden darüber hinaus Funktionen zur individuellen Anpassung der Steuerelemente implementiert (z. B. vergrößern, verschieben und positionieren der Steuerelemente). Die in Tabelle 2 angestrebten, gestenbasierten Funktionen wurden also anstatt mit neu zu entwickelnden Handgesten vollständig mit der Tap-Geste realisiert.

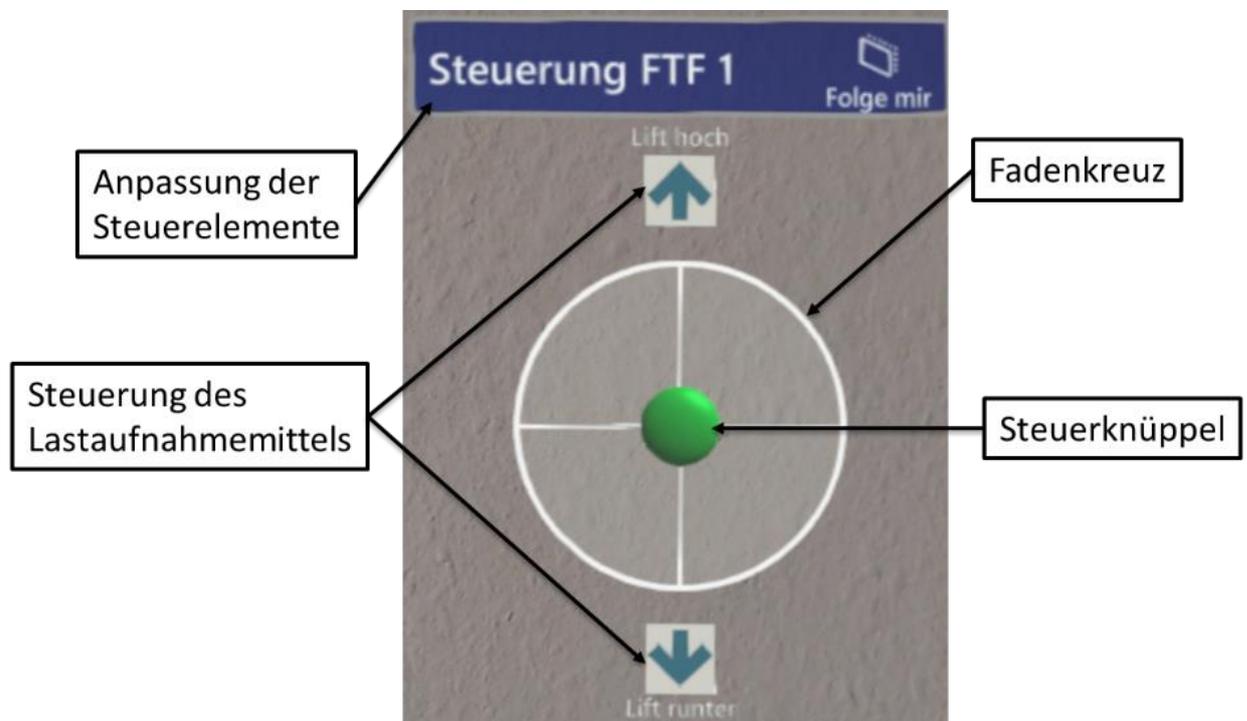


Bild 9: Virtuelle AR-Steurelemente für die gestenbasierte Steuerung

AP 5: Verifizierung des Assistenzsystems im intralogistischen Umfeld

Die Validierung der einzelnen funktionalen Gruppen wurde separat durchgeführt, um Rückkoppelungen zu vermeiden und die damit die Aussagekraft nicht zu reduzieren. Die Anwendungsfälle, die in Kapitel 1 beschrieben wurden, konnte in einer leicht abgeänderten Variante umgesetzt werden. Anstatt die Eurpoolpaletten und ein Gabelhub-FTF zu verwenden, wurden Kleinlastträger und ein Unterfahr-FTF eingesetzt, da diese im IPH bereits vorhanden waren. Wesentliche charakteristische Eigenschaften der Anwendungsfälle, wie z. B. das Verlassen des FTS-Aktionsbereiches wurden dabei beibehalten.

AP 5.1: Validierung der sprachbasierten Interaktion

Durchgeführte Arbeiten

Für die Validierung der sprachbasierten Beauftragung wurden Experimente mit zehn Probanden durchgeführt. Bei den Experimenten wurden die Probanden gebeten, die Datenbrille aufzusetzen und vorgegebene Sprachbefehle durch das integrierte Mikrofon zu sprechen. Beim Sprechen der Sprachbefehle befanden sich die Probanden in einem Büroraum, in dem keine signifikanten akustischen Störungen vorlagen. Die Experimente wurden somit isoliert von potenziellen akustischen Störgrößen, wie sie bspw. in Produktionsumgebungen vorliegen könnten, ausgeführt, um die störungsfreie Funktionsweise der Spracherkennung bewerten zu können. Die Gruppe der Probanden setzte sich aus deutschsprachigen (angehenden) Akademikern aus technischen Bereichen im Alter von 22 bis 62 Jahren zusammen. Sie sprachen keinen oder einen kaum merkbaren Akzent bzw. Dialekt und nutzen die englische Sprache sporadisch im studentischen bzw. beruflichen Kontext.

Jeder Proband hat elf Sprachbefehle jeweils unter Verwendung der Standardspracherkennung und der modifizierten Spracherkennung in die sprachbasierte Beauftragung gesprochen. Auf diese Weise konnte ein aussagekräftiger Vergleich über den Effekt der Modifikation durchgeführt werden.

Erzielte Ergebnisse

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Validierung der sprachbasierten Beauftragung aufgelistet. Für die Validierung wurde die Standardspracherkennung, die keine vorgegebene Grammatik beinhaltet, und die modifizierte Spracherkennung aus Kapitel 4 verwendet. Die Tabelle zeigt an welcher Sprachbefehl mit welcher Häufigkeit richtig erkannt wurde und wie hoch die summierte Fehlerrate für alle Befehle ist.

Unter Verwendung der Standardspracherkennung des .NET-Frameworks wurden insbesondere längere Sprachbefehle, die mehrere Worte enthielten, nicht erkannt. Die Fehlerrate lag insgesamt bei 71 % und war damit unzureichend hoch. Bei der modifizierten Spracherkennung wurden alle Befehle von allen Probanden unabhängig von der Länge des Sprachbefehls erkannt. Damit betrug die Fehlerrate 0 % und stellte im Vergleich zur Ausgangsvariante eine wesentliche Verbesserung dar.

Tabelle 3: Fehlerrate bei der Standardspracherkennung und der modifizierten Spracherkennung des .NET-Frameworks

Sprachbefehl	Standard	Modifiziert
AGV Jungheinrich	8	10
Go to storage place 2 and lift	0	10
Go to storage place 4 and lift	0	10
Go to storage place 1 and dip	3	10
Go to storage place 3 and dip	1	10
Lower forks Slowly	0	10
Lower forks Fast	0	10
Stop all vehicles	9	10
Tilt forks downwards	0	10
AGV A1	6	10
AGV B1	5	10
Fehlerrate	78/110 = 71%	0/110 = 0%

AP 5.2: Validierung der gestenbasierten Interaktion

Durchgeführte Arbeiten

Für die Validierung der gestenbasierten Steuerung wurden zwölf Probanden ausgewählt, die jeweils zweimal eine Teststrecke absolvieren mussten. Die Gruppe der Probanden setzte sich aus (angehenden) Akademikern mit technischem Hintergrund (Alter: 23 bis 31 Jahre) zusammen, die über wenig oder keine Erfahrung mit FTS und AR verfügten. Jeder Proband wurde vor dem ersten Absolvieren der Teststrecke schriftlich und mündlich über den Verlauf des Tests aufgeklärt. Darüber hinaus nutzten die Probanden die Möglichkeit, sich mit der Interaktion von virtuellen AR-Elementen insgesamt vertraut zu machen.

Die zu absolvierende Teststrecke ist im Bild 10 schematisch dargestellt. Sie besteht aus den folgenden vier Abschnitten:

1. Abschnitt: Rechtskurve und Lastaufnahme an einer Übergabestation
2. Abschnitt: Rechtskurve, Linkskurve und Lastabgabe an einer Übergabestation
3. Abschnitt: Zurücksetzen und Wenden
4. Abschnitt: Kurvenfahrt zwischen zwei Hindernissen

Die Probanden konnten sich beim Absolvieren der Teststrecke auf dem Versuchsfeld frei bewegen, um bei Bedarf eine bessere Perspektive für das Navigieren des Fahrzeugs einzunehmen. Wie oben beschrieben, konnten in diesem Kontext die Steuerelemente dynamisch mitbewegt werden, um eine möglichst ergonomische Handhabung zu gewährleisten.

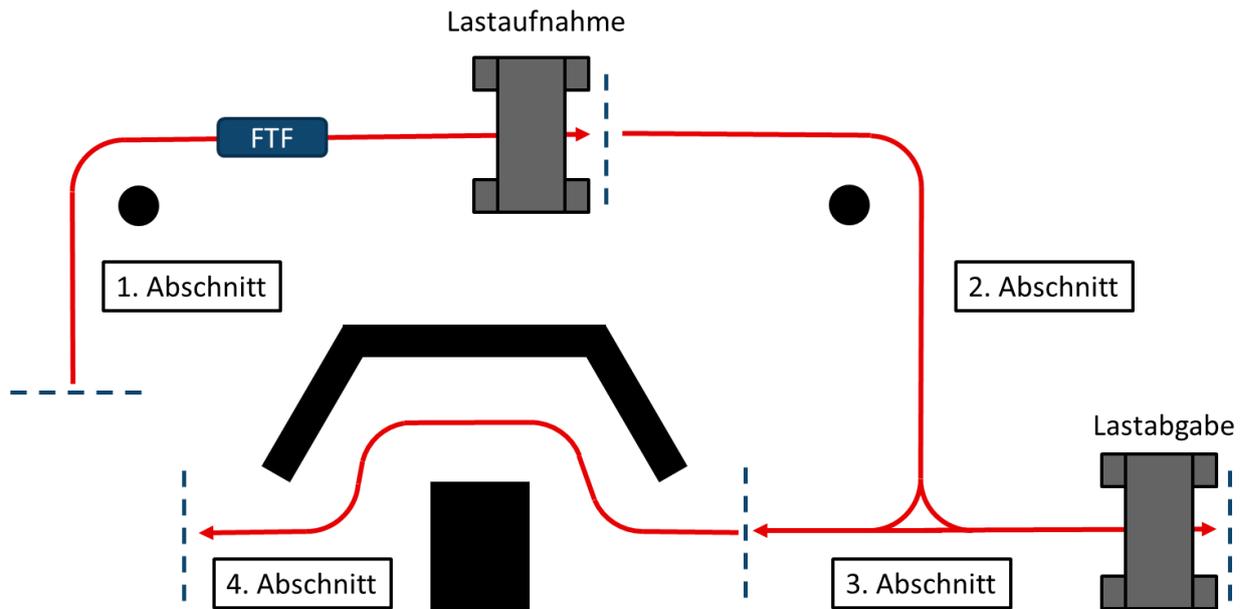


Bild 10: Schematische Darstellung der Teststrecke in der Draufsicht

Erzielte Ergebnisse

Neben der Art der Rückmeldung, der Ergonomie und der Präzision wurde auch die Intuitivität der gestenbasierten Steuerung bewertet. Da die Intuitivität einen entscheidenden Einfluss auf die Akzeptanz bei den Mitarbeitern hat, wird sie in diesem Beitrag näher erläutert. Die Intuitivität kann u. a. dadurch gemessen werden, wie schnell sich ungeübte Mitarbeiter an die Anwendung der gestenbasierten Steuerung gewöhnen. Im Bild 11 sind Box-Plots für die Dauer der Absolvierung der Teststrecke bei der ersten (rot) und bei der zweiten Testfahrt (blau) im Vergleich zu einer idealen Testfahrt dargestellt. In einem Box-Plot liegen 50 % der Daten innerhalb der Box. Der horizontale Strich innerhalb der Box bildet den jeweiligen Median ab. Die vertikalen, aus der Box ausgehenden Striche stellen die restlichen Daten dar und werden durch den Minimal- bzw. Maximalwert beschlossen. Ausreißer sind durch ein + gekennzeichnet. Die ideale Testfahrt dient als Referenzwert und wurde von einem sehr erfahrenen Anwender ausgeführt.

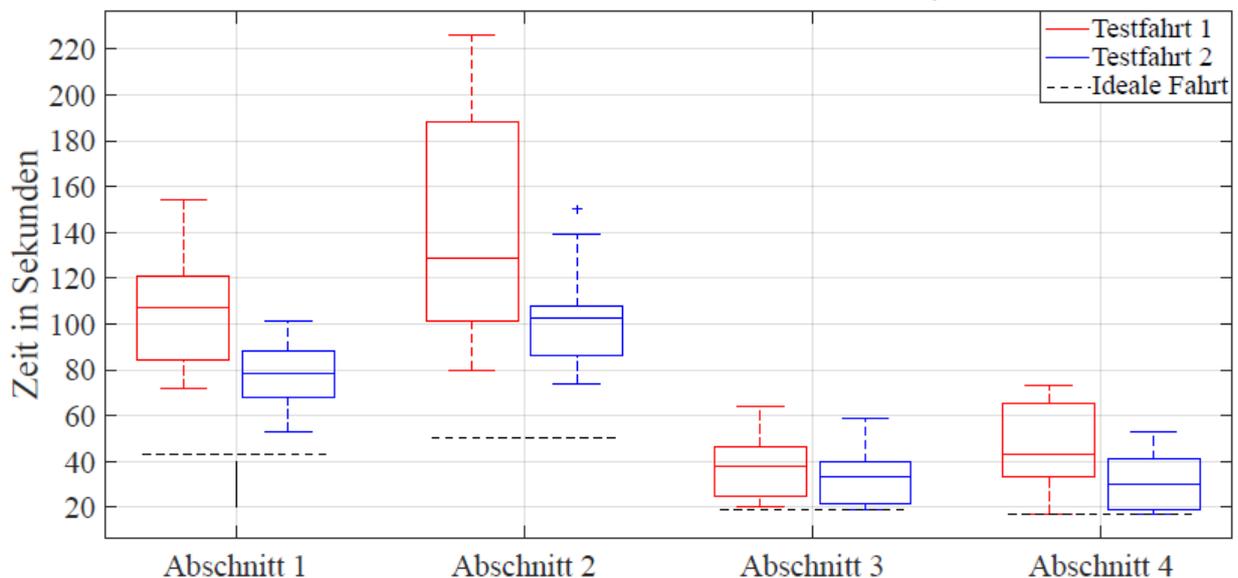


Bild 11: Benötigte Zeit zur Absolvierung der einzelnen Abschnitte der Teststrecke

AP 5.3: Validierung der blickbasierten Interaktion

Durchgeführte Arbeiten

Für die Validierung der blickbasierten Interaktion wurde die Lage eines Transporthilfsmittels (standardisierter Kleinlastträger) aus verschiedenen Positionen gemessen. Dafür wurde die Datenbrille in neun verschiedenen Winkeln (-20 bis +20 °) und drei verschiedenen Abständen (1 bis 3 m) positioniert, um von dort Lagemessungen des Transporthilfsmittels vornehmen zu können. Insgesamt wurden somit 27 Messungen für die Rotation (Verdrehung) und 27 Messungen für die Translation (Abstand) durchgeführt. Bei der Durchführung der verschiedenen Messungen wurde das Transporthilfsmittel im Bildbereich des Bildsensors manuell zentriert. Bei unterschiedlichen Abständen zum Transporthilfsmittel wurden somit verschiedene Neigungswinkel β_i verwendet.

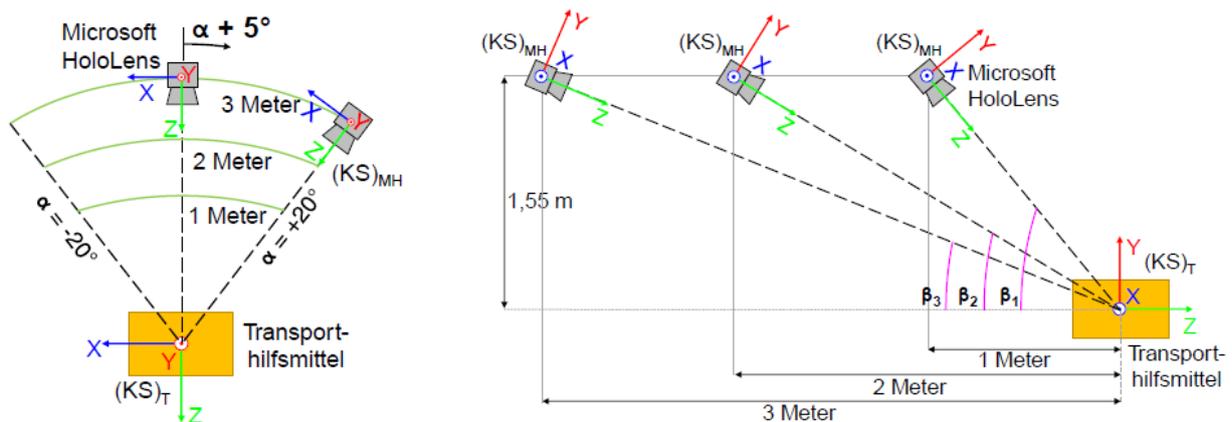


Bild 12: Schematische Darstellung der Variation des Winkels (links) und des Abstands (rechts)

Erzielte Ergebnisse

In Bild 13 ist der Least-Square-Fehler der Rotation für verschiedene Abstände in Abhängigkeit von dem Betrachtungswinkel dargestellt. Insgesamt nimmt der Fehler Werte zwischen ca. 0,67 und 0,81 an und ist damit deutlich größer als der Least-Square-Fehler der Translation. Die Ursache dafür liegt vermutlich in der Eckendetektion des verwendeten Verfahrens für die Merkmalsgewinnung. Anhand der Messdaten lässt sich darüber hinaus keine signifikante Abhängigkeit vom Betrachtungswinkel feststellen. Daraus kann geschlossen werden, dass der verwendete POSIT-Algorithmus invariant gegenüber dem Betrachtungswinkel ist. Außerdem kann anhand der Messdaten keine Abhängigkeit des Fehlers von dem Abstand festgestellt werden. Damit weisen die Daten darauf hin, dass der Algorithmus ebenfalls invariant gegenüber dem Abstand ist (Skaleninvarianz).

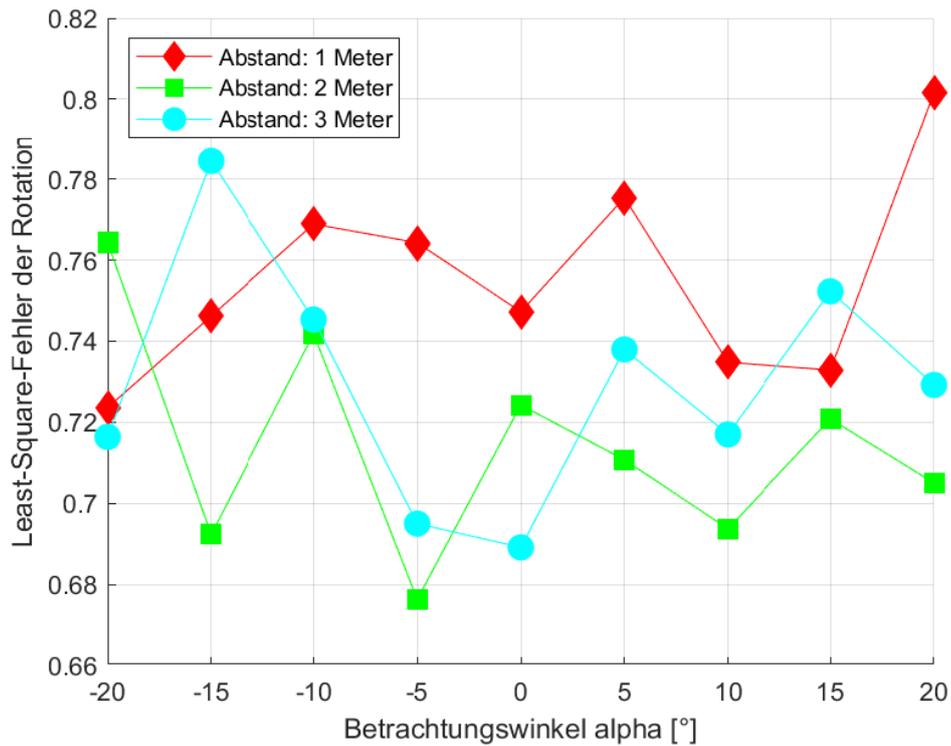


Bild 13: Least-Square-Fehler bei der Rotationsbestimmung für verschiedenen Abstände in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels

In Bild 14 ist der Least-Square-Fehler der Translation für verschiedene Abstände in Abhängigkeit von dem Betrachtungswinkel dargestellt. Analog zu den Messungen der Rotation lässt sich keine Abhängigkeit zwischen der Translation und dem Betrachtungswinkel feststellen. Damit wird das Indiz für die Rotationsinvarianz des POSIT-Algorithmus bei den Messungen der Translation bestärkt. Eine ähnliche Analogie gilt für den statistischen Zusammenhang zwischen dem Translationsfehler und der Abstand zwischen Transporthilfsmittel und Datenbrille. Auch hier lässt sich keine Abhängigkeit feststellen, sodass der POSIT-Algorithmus ebenfalls bei der Translationsbestimmung invariant gegenüber dem tatsächlichen Abstand ist.

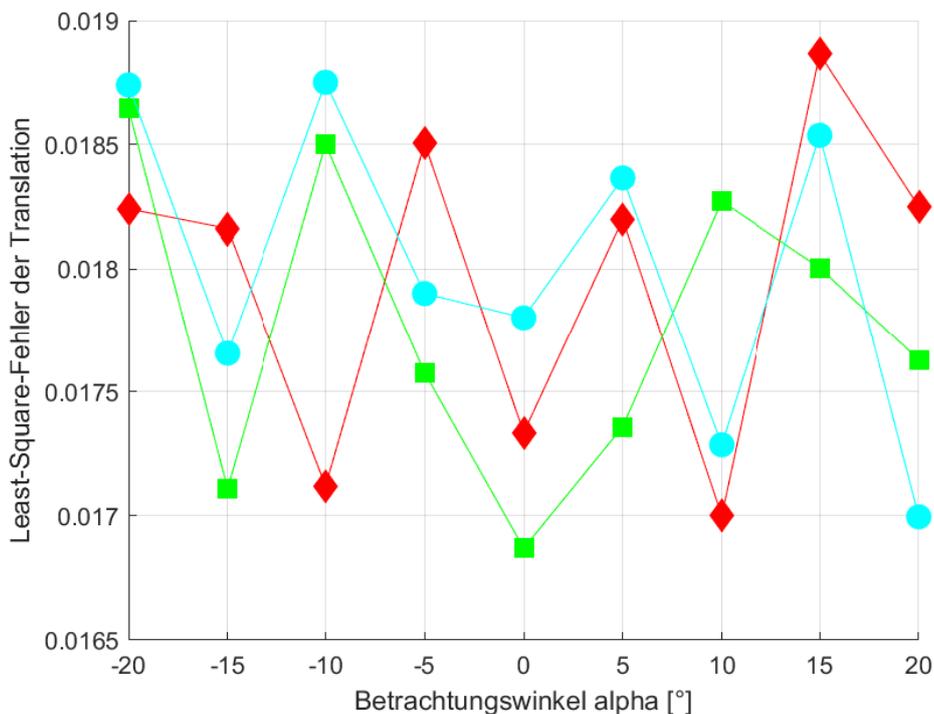


Bild 14: Least-Square-Fehler bei der Entfernungbestimmung für verschiedenen Abstände in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels

4. Durchgeführte Transfermaßnahmen

Viele Schritte zum Ergebnistransfer sind während der Projektlaufzeit durchgeführt worden. Einige Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Über den Austausch zwischen den Unternehmen des PA sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein erster Wissenstransfer stattgefunden. Tabelle 5 zeigt detailliert die bereits durchgeführten Transfermaßnahmen mit den zugehörigen Zeiträumen. In Tabelle 6 sind die geplanten Transfermaßnahmen aufgelistet, die über die Projektlaufzeit hinaus reichen.

Tabelle 4: Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Wissenschaftliche Publikationen / Dissertation, in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Informationstransfer und Austausch mit Interessenten aus Industrie und Wissenschaft	Seel, A.; Küster, B.; Stonis, M. (2018). Ein Konzept für ein Mensch-Maschine-Interaktionssystem. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113(10), S. 623-626.	16.10.2018
		Seel, A.; Kreutzjans, F.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Interaktion per Sprachbefehl – Eine Form manueller intuitiver Beauftragung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen. In: Hebezeuge Fördermittel, HUSS-MEDIEN GmbH, 59. Jg. (2019), H. 10, S. 24-27.	08.08.2019

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
		Overmeyer L.; Dohrmann, L.; Kleinert, S.; Podszus, F.; Seel, A.; Eilert, B.; Küster, B. (2019): Intelligente Flurförderzeuge durch die Implementierung kognitiver Systeme. In: ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-45537-1_9-2.	20.10.2019
Information der Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA)	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegungen, Abstimmung, Erfahrungsaustausch innerhalb des PA	Kick-off mit dem PA	22.08.2018
		2. Projekttreffen	14.05.2019
		3. Projekttreffen	16.04.2020
Treffen mit potenziell interessierten Unternehmen	Informationsaustausch und Austausch mit Interessenten aus der Industrie	Vorstellung des Projekts für interessiertem Unternehmen	laufend
Personaltransfer	Durchführung von Praktika und Abschlussarbeiten in branchenspezifischen Unternehmen	Entwicklung einer sprachbasierten Applikation zur Steuerung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen	01.12.2018 – 28.02.2019
		Entwicklung einer Applikation zur 3D-Lageerkennung von Transporthilfsmitteln	01.07.2019 – 20.02.2020
		Entwicklung einer Applikation zur Gesteuerung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen mittels Datenbrille	05.08.2019 – 02.03.2020
		Entwicklung einer Applikation zum Training eines mobilen Roboters für 2D-Navigation	05.08.2019 – 03.02.2020
Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Vorstellungen der Projektergebnisse bei interessierten Unternehmen	kontinuierlich und auf Anfrage

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Publikation der Projektergebnisse im Internet	Informationstransfer und Austausch mit Interessenten aus Industrie und Wissenschaft	Pflege der eingerichteten Projekt-Homepage	kontinuierlich
	Information von Interessenten aus Industrie und Wissenschaft	IPH Pressemitteilungen, IPH-Newsletter, GVB-Newsletter, GVB-Blog: www.logistik.expert	kontinuierlich

Tabelle 5: Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Wissenschaftliche Publikationen / Dissertation, in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Informationstransfer und Austausch mit Interessenten aus Industrie und Wissenschaft	Seel, A; Schell, V.; Küster, B.; Stonis, M.: Eingriffe bei Hindernissen – Gestenbasierte Steuerung von mobilen Robotern. In: Technische Logistik: Hebezeuge-Fördermittel Sonderpublikation, Huss-Median GmbH, Berlin o. Jg. (2020), H. 0, S. 6 – 9. ISSN 0017-9442.	07.10.2020
Treffen mit potenziell interessierten Unternehmen	Informationsaustausch und Austausch mit Interessenten aus der Industrie	Vorstellung des Projekts für interessiertem Unternehmen	laufend
Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten	Nationaler Ergebnistransfer	Veröffentlichung Schlussbericht	Herbst 2020
Gezielte Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Vorstellungen der Projektergebnisse bei interessierten Unternehmen	kontinuierlich und auf Anfrage
Publikation der Projektergebnisse im Internet	Informationstransfer und Austausch mit Interessenten aus Industrie und Wissenschaft	Pflege der eingerichteten Projekt-Homepage	kontinuierlich
	Information von Interessenten aus Industrie und Wissenschaft	IPH Pressemitteilungen, IPH-Newsletter, GVB-Newsletter, GVB-Blog: www.logistik.expert	kontinuierlich