

# Schlussbericht vom 31.01.2022

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20158 N

## Thema

Virtuelle Sichtverbesserung und intuitive Interaktion durch erweiterte Realität an Flurförderzeugen

## Berichtszeitraum

01.06.2019 bis 30.11.2021

## Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik/Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. - IFL

## Forschungseinrichtungen

Leibniz Universität Hannover, Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA)

Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH (IPH)

Gefördert durch:

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Projektsteckbrief</b> .....	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	2
<b>2</b>	<b>Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse</b> .....	<b>4</b>
2.1	Arbeitsplan .....	5
2.2	AP 1: Anforderungsaufnahme .....	6
2.2.1	AP 1.1: Festlegung des Anwendungsszenarios mit Demonstrations-FFZ (IPH) .....	6
2.2.2	AP 1.2: Festlegung auf Kameratechnik (ITA).....	6
2.2.3	AP 1.2: Festlegung auf AR-Systeme (IPH) .....	7
2.2.4	AP 1.3: Erstellung eines Lastenheftes (IPH).....	8
2.3	AP 2: Konzeption.....	8
2.3.1	AP 2.1: Konzeption der Umgebungsaufnahme (ITA).....	8
2.3.2	2.1: Konzeption der Umgebungsaufnahme (ITA) .....	9
2.3.3	AP 2.2: Konzeption der Blickrichtungserfassung (IPH).....	10
2.3.4	AP 2.3: Konzeption der Kamerakalibrierung (ITA) .....	11
2.4	AP 3: Technische Umsetzung .....	12
2.4.1	AP 3.1: Realisierung der Kamerasysteme für die Umgebungsaufnahme (ITA) .....	12
2.4.2	AP 3.2: Implementierung der Algorithmen zur Kompensation der Sichteinschränkungen (ITA) .....	14
2.4.3	AP 3.3: Implementierung der Blickrichtungserfassung (IPH).....	19
2.4.4	AP 3.4: Implementierung der Algorithmen zur Kalibrierung (ITA).....	23
2.4.5	AP 3.5: Zusammenführung der Teilergebnisse (IPH) .....	27
2.5	Validierung .....	28
2.5.1	AP 4.1: Validierung der Blickrichtungserfassung (IPH).....	28
2.5.2	AP 4.2: Validierung der Umgebungsaufnahme und Sichteinschränkungs-kompensation (ITA) .....	30
2.5.3	AP 4.3: Validierung des Gesamtsystems (ITA).....	34
<b>3</b>	<b>Verwendung der Zuwendung</b> .....	<b>44</b>
3.1	Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) .....	44
3.2	Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH (IPH) .....	45
<b>4</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</b> .....	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen</b> .....	<b>48</b>
5.1	Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse.....	48
5.2	Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU .....	48
<b>6</b>	<b>Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft</b> .....	<b>50</b>
6.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen .....	50
6.2	Geplante Transfermaßnahmen.....	53
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>56</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Darstellung Sichteinschränkungen an einem Gabelstapler .....	2
Abbildung 2-1: Bewilligter Arbeitsplan .....	5
Abbildung 2-2: Überarbeiteter Arbeitsplan .....	5
Abbildung 2-3: Potentielle Anbaupositionen am Demonstrator Linde E16 AP .....	9
Abbildung 2-4: Optimierte Anbaupositionen: Seitenansicht (oben) und Draufsicht (unten) ...	10
Abbildung 2-5: Konzeption der Kamerakalibrierung .....	11
Abbildung 2-6: Überblick der Teilmodule des Gesamtsystems .....	12
Abbildung 2-7: Demonstrator mit Kameras .....	13
Abbildung 2-8: Hochintegrierte Gabelzinkenkameras mit RGB-D-Kamera .....	13
Abbildung 2-9: Umgebungsaufnahme aus verschiedenen Perspektiven: Fahrerperspektive (links) und Standpunkt außerhalb des Fahrzeugs (rechts) .....	14
Abbildung 2-10: Sichteinschränkungen im Sichtfeld (1), Überlagerung der Sichteinschränkungen (2) .....	14
Abbildung 2-11: Programmablaufplan zum Erkennen der Sichteinschränkungen .....	15
Abbildung 2-12: Schrittweise Erstellung der Ist-Maske: (a) Gauß-Filterung beider Bilder, (b) Differenzbild im Farbraum, (c) Grauwertbild des Differenzbildes, (d) Binarisiertes Differenzbild, (e) Entfernung kleiner Konturen, (f) Dilation der Maske .....	16
Abbildung 2-13: Markerbasierte Sichteinschränkungsdetektion mit Einblendung auf der HoloLens 2 .....	17
Abbildung 2-14: Ablauf der Visualisierung auf der HoloLens 2 .....	17
Abbildung 2-15: Einblendung der Staplergeometrie (links), Einblendung von Staplergeometrie und kompletten Punktwolken (rechts) .....	18
Abbildung 2-16: Einblendung der Punktwolken ausschließlich auf den Sichteinschränkungen .....	18
Abbildung 2-17: Anbringung ArUco-Marker im Gabelstapler (links), Detektion der Marker (rechts) .....	19
Abbildung 2-18: Ablauf des Trackings der Staplerbewegung .....	21
Abbildung 2-19: Anbringung der Trackingkamera am Gabelträger (links), Anbringung des Seilzugsensors am Hubmast (rechts) .....	22
Abbildung 2-20: Plausibilitätsprüfung Kopftracking .....	23
Abbildung 2-21: Ablauf der Kamerakalibrierung .....	24
Abbildung 2-22: Random Pattern (links) und April-Tag (rechts), Schachbrettmuster (unten)	25
Abbildung 2-24: Ablauf der Kamerakalibrierung .....	26
Abbildung 2-25: Ergebnisse der Kalibrierung .....	27

Abbildung 2-26: Messaufbau zur Bestimmung der Abweichung zwischen Realität, Tracking der HoloLens 2 und Drehgeber-Skript .....	28
Abbildung 2-27: Normierte Abweichung der Positionsdaten der HoloLens 2 bzw. des Drehgeber-Skripts von den gemessenen Werten Laserdistanzsensors .....	29
Abbildung 2-28: Abweichung der Positionsdaten der HoloLens 2 und des Drehgeber-Skripts von den gemessenen Werten des Laserdistanzsensors abhängig von der Distanz .....	29
Abbildung 2-29: ChArUco Board mit 65 ArUco Makern .....	30
Abbildung 2-30: Versuchsaufbau für die Untersuchung der Einblendungsgenauigkeit .....	31
Abbildung 2-31: Sichteinschränkungskompensation für Blick zwischen Hubgerüst und A-Säule .....	31
Abbildung 2-32: ChArUco Board mit unvollständig rekonstruierten Kanten: Sichteinschränkungen verdecken teilweise die vertikalen Begrenzungen der einzelne Felder .....	32
Abbildung 2-33: Interpolation der durch die Sichteinschränkung verdeckten Markereckpunkte: obere Eckpunkte des Markers (blau) und untere Eckpunkte des Markers (orange). Die Interpolierten Punkte sind hervorgehoben. ....	33
Abbildung 2-34: Interpolierte Kanten des Schachbretts (gelb) .....	33
Abbildung 2-35: Detailaufnahme der Einblendungsgenauigkeit: Interpolierte Schachbrettkanten (gelb und rot) und detektierte obere Kante der Einblendung (blau) .....	34
Abbildung 2-36: Videoausschnitte der Modellüberlagerung im Stillstand .....	35
Abbildung 2-37: Videoausschnitte der Modellüberlagerung beim Heben des Hubmastes im Stillstand .....	35
Abbildung 2-38: Videoausschnitte beim Neigen des Hubmastes im Stillstand .....	36
Abbildung 2-39: Videoausschnitte beim gleichzeitigen Neigen und Senken des Hubmastes im Stillstand .....	36
Abbildung 2-40: Videoausschnitte der Modellüberlagerung während einer geraden Fahrt....	37
Abbildung 2-41: Videoausschnitte beim Neigen des Hubmastes während einer geraden Fahrt .....	38
Abbildung 2-42: Videoausschnitte beim Senken des Hubmastes während einer geraden Fahrt .....	38
Abbildung 2-43: Videoausschnitte beim Neigen und Heben des Hubmastes während einer geraden Fahrt .....	39
Abbildung 2-44: Videoausschnitte bei der Kurvenfahrt .....	39
Abbildung 2-45: Videoausschnitte der kompletten Einblendung im Stillstand .....	40

Abbildung 2-46: Videoausschnitte der kompletten Einblendung beim Heben des Hubmastes im Stillstand.....	40
Abbildung 2-47: Videoausschnitte der kompletten Einblendung bei der geraden Fahrt.....	41
Abbildung 2-48: Videoausschnitte der Einblendung nur auf den Sichteinschränkungen im Stillstand.....	41
Abbildung 2-49: Videoausschnitte der Einblendung nur auf den Sichteinschränkungen bei der geraden Fahrt.....	42
Abbildung 2-50: Latenz des Gesamtsystems in Abhängigkeit der aktiven Kameras .....	43

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Anforderungen an die AR-Brille.....	8
Tabelle 2: Verwendung der Zuwendung (ITA) .....	44
Tabelle 3: Verwendung der Zuwendung (IPH) .....	45
Tabelle 4: Durchgeführte spezifische Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft ..	50
Tabelle 5: Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens .....	54

## 1 Projektsteckbrief

Das Forschungsprojekt Virtuelle Sichtverbesserung und intuitive Interaktion durch Erweiterte Realität an Flurförderzeugen (FFZ) hat die Realisierung eines auf Augmented Reality (AR) basierenden Bedienerassistenzsystems für Gabelstapler zum Ziel, mit dessen Unterstützung Sichteinschränkungen des Fahrers durch Fahrzeugkomponenten und Ladung ausgeglichen und Fahrzeug- sowie Auftragsdaten situationsabhängig mit dem Fahrer vernetzt werden. Das Assistenzsystem besteht aus einer Brille mit zwei Head-up-Displays (AR-Brille) und Sensoren für eine grundlegende Bewegungserfassung sowie aus mehreren am Fahrzeug strategisch verteilten Kamerasystemen. Aus den Einzelbildern der verwendeten Kameras wird eine einschränkungsfreie Rundumsicht des Fahrzeugs errechnet, wobei je nach FFZ-Typ und Ausstattung eine andere Kamerapositionierung und eine individuelle Anzahl an Kameras erforderlich sind. Auf Basis der AR-Brille bzw. der darin enthaltenen Bild- und Bewegungssensoren ermittelten Blickrichtung des Fahrers wird ein einschränkungsfreier Ausschnitt der erfassten Umgebung deckungsgleich mit der tatsächlichen Sicht des Fahrers überlagert, wodurch Fahrzeugkomponenten wie Hubmast oder auch Beladung transparent erscheinen. Auf diese Weise werden die Sichtverhältnisse des Fahrers ohne größere konstruktive Änderungen am Fahrzeug deutlich verbessert. Die Betriebssicherheit des FFZ wird gesteigert und zusätzlicher Konstruktionsspielraum für die Entwicklung zukünftiger FFZ geschaffen, da Anforderungen an die Fahrzeugübersichtlichkeit bei gleichzeitiger Tragfähigkeit des Hubmastes neu überdacht werden können. Das Sichteinschränkungsproblem an Flurförderzeugen ist in folgender Abbildung dargestellt. Die für den Bediener einsehbaren Bereiche sind in Grün dargestellt, die durch Ladung und Fahrzeugkomponenten in Orange.

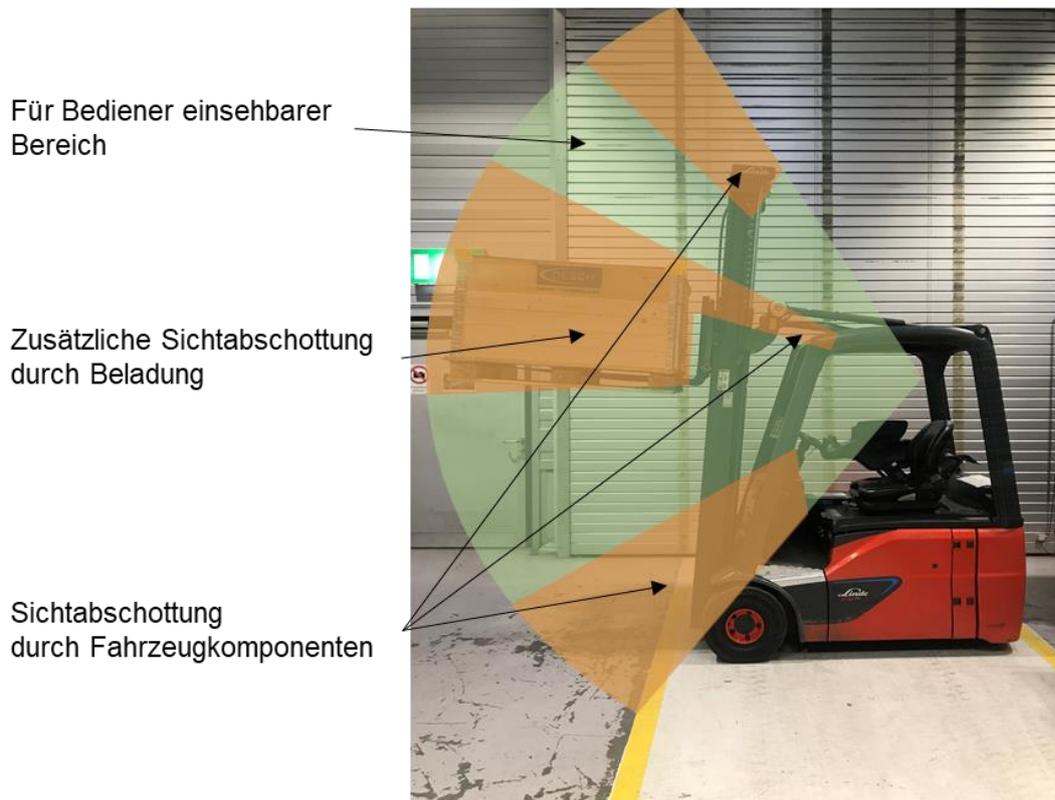


Abbildung 1-1: Darstellung Sichteinschränkungen an einem Gabelstapler

## 1.1 Problemstellung

Eine der größten Herausforderungen bei der Bedienung eines Gabelstaplers ist die eingeschränkte Sicht des Fahrers auf seine Umgebung, insbesondere bei der Ein- und Auslagerung von Ladungsträgern oder dem Transport sperriger Lasten.

Aufgrund der konstruktiven Gestaltung von Gabelstaplern beeinträchtigen Hubmast, Gabelrücken und Schutzeinrichtungen wie das Fahrzeugdach das Fahrersichtfeld erheblich [1]. Für Hersteller von FFZ ist daher die konstruktive Gestaltung des Fahrzeugs hinsichtlich Übersichtlichkeit bei gleichzeitiger Tragfähigkeit der Fahrzeugkomponenten eine wesentliche Herausforderung. Neben konstruktiven Maßnahmen werden unterschiedliche Kamera- und Assistenzsysteme an den Fahrzeugen verwendet, um den Fahrer und seine Umgebung zu unterstützen und die Betriebssicherheit des Fahrzeugs zu steigern. Videoaufnahmen, beispielsweise vom Gabelzinkenbereich oder anderen schwer einsehbaren Zonen der Fahrzeugumgebung, werden auf Bildschirmen in der Fahrerkabine angezeigt und teilweise mit zusätzlichen, ausgewerteten Informationen angereichert [2]. Neben den baulichen Gegebenheiten des Fahrzeugs stellen Bedienelemente und Bildschirme zur Anzeige von Auftragsdaten, Fahrzeugparametern oder der Wiedergabe von Rückfahr- oder Gabelzinkenkameras, wie sie heute bei den meisten Fahrzeugen verwendet werden, eine zusätzliche Sichteinschränkung dar.

Ergänzend zu der Verringerung bzw. Kompensation der Sichteinschränkungen rückt die aktive Informationsbereitstellung und Vernetzung zwischen dem Bediener eines FFZ, dem Lagerverwaltungssystem (LVS) und der direkten Umgebung immer mehr in den Fokus. Intralogistische Prozesse und Arbeitsvorgänge wie z. B. das Ein- und Auslagern von Ladungsträgern sollen hierdurch effizienter und sicherer gestaltet werden [3].

Sowohl die konstruktive Anpassung der Fahrzeugkomponenten als auch die Unterstützung durch elektronische Assistenzsysteme und die Vernetzung mit Informationssystemen haben dazu geführt, dass die Komplexität der Fahrzeugkonstruktion und -bedienung stetig zugenommen hat. Insbesondere bei leistungsstarken Fahrzeugen mit zunehmenden Masthöhen bzw. Traglasten sind weitere Verbesserungen, wenn überhaupt, nur noch durch einen erheblichen Mehraufwand realisierbar. Die größte Herausforderung besteht dabei in der ausschließlichen Bereitstellung relevanter Informationen und Interaktionsmöglichkeiten zur richtigen Zeit, am richtigen Ort und in einer nicht ablenkenden, intuitiven Darstellungsform. Eine Komplexitätssteigerung des Man-Machine-Interface (MMI) durch ggf. nicht erforderliche Informationen sowie zusätzliche Anzeigeelemente oder konkurrierende Bedienkonzepte ist dabei hinsichtlich der Optimierung logistischer Prozesse hinderlich.

Um diesen Herausforderungen an die Übersichtlichkeit und Interaktionsfähigkeit zwischen Fahrzeug, LVS und Fahrer zu begegnen, sind innovative Konzepte der erweiterten Realität ein vielversprechender Ansatz. Die in den letzten Jahren im Bereich der AR erzielten Entwicklungen, mit leichteren, leistungsfähigeren AR-Brillen, Sensoren und Datenverarbeitungsverfahren müssen zu diesem Zweck auf die Anwendung an einem FFZ adaptiert und hinsichtlich ihrer industriellen Tauglichkeit untersucht werden.

Heute verfügbare leistungsfähige und kompakte Kamera- und Analysesysteme, die eine Erfassung der Fahrzeugumgebung ermöglichen, werden in der Praxis hauptsächlich für autonome Systeme eingesetzt und nicht modular miteinander vernetzt oder dezentral ausgewertet. Durch die neuartige Vernetzung mehrerer intelligenter Kamerasysteme an einem FFZ, den Daten des LVS und den Informationen aus der Fahrzeugsteuerung in Form einer AR-Umgebung für den Fahrer, besteht die Möglichkeit den Flurförderzeugbediener situationsabhängig und gezielt zu unterstützen.

Hierdurch werden immer genau die Informationen und Interaktionsmöglichkeiten angeboten, die für den aktuellen Vorgang benötigt werden. Nicht erforderliche Informationen, Anzeige- und Bedienelemente können, ebenso wie konstruktive Sichteinschränkungen, ausgeblendet werden und führen zu einer Verringerung der Bedienkomplexität im Fahrzeug.

## 2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bei der Bearbeitung des Arbeitspakets (AP) 1 wurde zu Projektbeginn der bewilligte Arbeitsplan (s. Abbildung 2-1) in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) aus den folgenden Gründen angepasst:

- Die im PA aktiven Unternehmen legen den Fokus auf ein System zur Überblendung von Sichteinschränkungen des Staplerfahrers. Die intuitive Interaktion wird nur als nachgelagerter Schritt bei einem vorliegenden funktionsfähigen Grundsystem für sinnvoll erachtet. Im bisherigen Arbeitsplan war die Konzeption der Gestenerkennung und intuitiven MMI (AP 2.3), die Konzeption der kontextbasierten Informationsanzeige (AP 2.4), die Umsetzung der Algorithmen zur kontextbasierten Informationsanzeige und intuitiven MMI (AP 3.4) sowie die Validierung des intuitiven MMI und der Informationsanzeige (AP 4.3) vorgesehen. Diese AP werden demnach im aktualisierten Arbeitsplan nicht weiter betrachtet.
- Die Erfahrung der Staplerhersteller hat zudem gezeigt, dass der Aufwand für die Umgebungsaufnahme der relevanten Sichtbereiche sowie die Entwicklung der Bildverarbeitungsalgorithmen deutlich größer ist als zuerst angenommen. Daraus resultierend wurden mehr Personenmonate (PM) für diese AP notwendig.
- Weiterhin wies der PA darauf hin, dass die Kamerakalibrierung näher betrachtet und somit im Arbeitsplan berücksichtigt werden sollte. Ursächlich sind die sich ändernden extrinsischen Kameraparameter in Abhängigkeit von bspw. Hubhöhe und Neigung.

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Gründe wird der bisherige Arbeitsplan angepasst. Zudem erfolgte eine Erhöhung der Personenmonate der beteiligten Forschungsstellen. Der überarbeitete Arbeitsplan ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Die Gesamtsumme der Personalkosten hat sich gegenüber dem bisherigen Arbeitsplan nicht geändert. Im überarbeiteten Arbeitsplan sind die Konzeption und Umsetzung der intuitiven MMI nicht vorgesehen.



## **2.2 AP 1: Anforderungsaufnahme**

### **2.2.1 AP 1.1: Festlegung des Anwendungsszenarios mit Demonstrations-FFZ (IPH)**

#### **Durchgeführte Arbeiten**

Die Definition des Anwendungsszenarios erfolgte in enger Abstimmung mit dem PA innerhalb eines Workshops im Rahmen des ersten Projekttreffens. Im Folgenden sind die Ergebnisse zusammengefasst.

#### **Erzielte Ergebnisse**

Folgendes Anwendungsszenario wurde für das Vorhaben definiert:

- A. Als Demonstrator-FFZ dient ein Linde E16 Frontstapler.
- B. Relevante Sichtachsen liegen in Richtung der Gabelzinken, dabei müssen Mast und Last sowie die Fahrerkabine ausgeblendet werden.
- C. Mögliche Kameraanbaupositionen sind die Gabelträger, Radkasten, Mast und Zinken.
- D. Die Ein- und Auslagerung sollen als Prozesse mit AR-Unterstützung betrachtet werden.
- E. Die minimale Gabelposition ist am Boden, die maximale Gabelposition ist die Ladehöhe eines LKWs.
- F. Die Last besitzt maximal die Größe einer Gitterbox.
- G. Fahrt durch Hochregallager mit sich ändernden Umgebungsbedingungen (bspw. Beleuchtung, Abstände und Hindernissen, die aus dem Regal ragen).
- H. Einlagerung im Hochregal.

### **2.2.2 AP 1.2: Festlegung aufameratechnik (ITA)**

#### **Durchgeführte Arbeiten**

Für die Festlegung auf dieameratechnik wurde in Zusammenarbeit mit dem PA während des ersten Projekttreffens der Einsatz von verschiedenenameratechniken diskutiert. Zudem fand ein Treffen mit Mitarbeitern aus verschiedenen Entwicklungsabteilungen eines FFZ-Herstellers statt, die sich im Vorfeld bereits intensiv mit der Umgebungsaufnahme rund um einen Gabelstapler beschäftigt haben. Ferner hat ein weiterer Informationsaustausch mit einem Kamerahersteller und der einem Hersteller von Mikrospiegelaktoren stattgefunden.

#### **Erzielte Ergebnisse**

Als Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass eine Kombination von 2D- und 3D-ameratechnik eine ausreichend genaue und zugleich für den Anwender eine immersive Überlagerung der Umgebung auf der AR-Brille liefern kann. Die alleinige Darstellung von 3D-Daten auf der

AR-Brille hat zur Folge, dass der Systemanwender (Staplerfahrer) die gelieferten Tiefeninformationen selbst interpretieren muss. Zudem kann es bei der Verwendung von 3D-Kamerasystemen im industriellen Umfeld zur Generation von Fehlinformationen bei der Umgebungsaufnahme kommen. Diese Fehlinformationen können durch Mehrfachreflexionen, Hintergrundlicht sowie durch benachbarte 3D-Kameras entstehen. Um den Einfluss benachbarter 3D-Kameras zu minimieren, besteht die Möglichkeit, die Kamerasysteme zu synchronisieren. Die Anforderung an ein robustes Kamerasystem wurde vom PA revidiert. Dies ermöglicht den Einsatz von speziellen Kameraentwicklerkits. Als potentielle Entwicklerkits haben sich hierbei die Azure Kinect der Firma Microsoft und die Intel Realsense D435i der Firma Intel dargestellt, bei welchen es sich um RGBD-Kameras handelt, die neben eines RGB-Bildes zusätzlich Tiefeninformationen über die aufgenommene Szene bereitstellen. Weiterhin liefert eine inertielle Messeinheit (IMU) Informationen über die aktuelle Drehrate und die Beschleunigung. Die Intel RealSense D435i generiert die Tiefeninformationen über ein aktives Infrarot Stereo Modul. Die Kamera ist für den Innen- und Außeneinsatz geeignet. Die Azure Kinect generiert die Tiefeninformationen über eine Time-of-Flight Kamera. Durch die Verwendung der modulierten IR-Quelle zeichnet sich das System durch eine Robustheit gegenüber nicht modulierten Lichtquellen wie beispielsweise Sonnenlicht aus [4]. Aufgrund dessen wird die Azure Kinect bevorzugt ausgewählt. Da diese jedoch erst ab März 2020 in Deutschland verfügbar sein wird und um den Projektfortschritt nicht zu gefährden, finden erste Entwicklungen von Bildverarbeitungsalgorithmen auf der Intel RealSense statt, welche jedoch nach Erscheinen der Azure Kinect auf dieser implementiert werden können.

### **2.2.3 AP 1.2: Festlegung auf AR-Systeme (IPH)**

#### **Durchgeführte Arbeiten**

Für die Festlegung auf ein AR-System erfolgte zunächst ein Austausch innerhalb des Workshops im Rahmen des ersten Projekttreffens. Des Weiteren wurde eine umfassende Marktrecherche durchgeführt. Abschließend fand ein weiteres Treffen mit der Entwicklungsabteilung eines PA-Mitglieds statt, bei dem ein Austausch über bisherige Erfahrungen stattfand.

#### **Erzielte Ergebnisse**

Die Microsoft HoloLens 2 wurde als geeignetste Lösung für das AR-System identifiziert, sie ist der ursprünglich im Einzelfinanzierungsplan vorgesehenen Microsoft HoloLens technisch deutlich überlegen. Aufgrund der langen Lieferzeit der HoloLens 2 werden zunächst alternative Datenbrillen (Vuzix Blade Smart Glasses, RealWear Head Mounted Tablet 1) beschafft, um den Projektfortschritt nicht zu gefährden.

## 2.2.4 AP 1.3: Erstellung eines Lastenheftes (IPH)

### 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.

### Erzielte Ergebnisse

Das Ergebnis dieses AP ist ein Lastenheft zur Entwicklung eines Bedienerassistenzsystems zur virtuellen Sichtverbesserung durch Erweiterte Realität an Flurförderzeugen. Das Lastenheft fasst die Anforderungen an die AR-Brille, die Kamertechnik und an die Kommunikationsschnittstellen zusammen. Exemplarisch hierfür sind in Tabelle 1 die Anforderungen an die AR-Brille dargestellt.

Tabelle 1: Anforderungen an die AR-Brille

Nr.	Beschreibung
AR01	Messung der eigenen Position mit ausreichender Genauigkeit
AR02	Bereitstellung von Tiefeninformationen im Sichtbereich
AR03	Bereitstellung von Bildinformationen im Sichtbereich
AR04	Bereitstellung von rotatorischen Bewegungsinformationen des Bedieners
AR05	Bereitstellung der Blickrichtungsinformationen des Bedieners
AR06	Ausreichende Rechnerleistung, um das Assistenzsystem in Echtzeit betreiben zu können
O001	Mikrofon zur Aufzeichnung von Sprachbefehlen
O002	Lautsprecher zur Wiedergabe von akustischen Rückmeldungen
O003	Eine Akkubetriebszeit von mind. 2h

## 2.3 AP 2: Konzeption

### 2.3.1 AP 2.1: Konzeption der Umgebungsaufnahme (ITA)

#### Durchgeführte Arbeiten

Während des Projekttreffens wurden verschiedene Anbaupositionen und benötigte Sichtachsen diskutiert und bewertet. Um die Anbaupositionen hinsichtlich der Montage am Versuchsfahrzeug zu konkretisieren, fand ein weiteres Treffen mit einem Mitglied des PA statt. Der Grund hierfür ist, dass an dem von dieser Firma zur Verfügung gestellten Demonstrator technische Veränderungen durchgeführt werden müssen. Hierzu zählen beispielsweise die Anbringung von Kamerahaltern und Kabeldurchführungen. Auf Grundlage dessen wurden mit Experten aus den Bereichen Entwicklung und Kamertechnik, verschiedene Anbaupositionen am Versuchsfahrzeug diskutiert und bewertet.

## Erzielte Ergebnisse

Eine Anforderung an die Umgebungsaufnahme stellt der Einsatz von möglichst wenig Kameratechnik dar. Die Gründe hierfür sind folgende: Zum einen ist eine geringe Datenmenge angestrebt und zum anderen sollen möglichst wenig Veränderungen am Demonstrator durchgeführt werden. In Abbildung 2-3 sind die potentiellen Anbaupositionen am Demonstrator (Linde E16) dargestellt. Es besteht die Möglichkeit die Kameras in Gabelzinken zu integrieren, beispielsweise in Gabelzinkenschuhen. Weiterhin besteht die Möglichkeit Kameras auf dem Gabelzinkenträger, dem Hubmast oder dem Fahrzeugdach zu befestigen. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Anbringung innerhalb der projizierten Fahrzeugstellfläche stattfindet, um Kollisionen zu vermeiden.

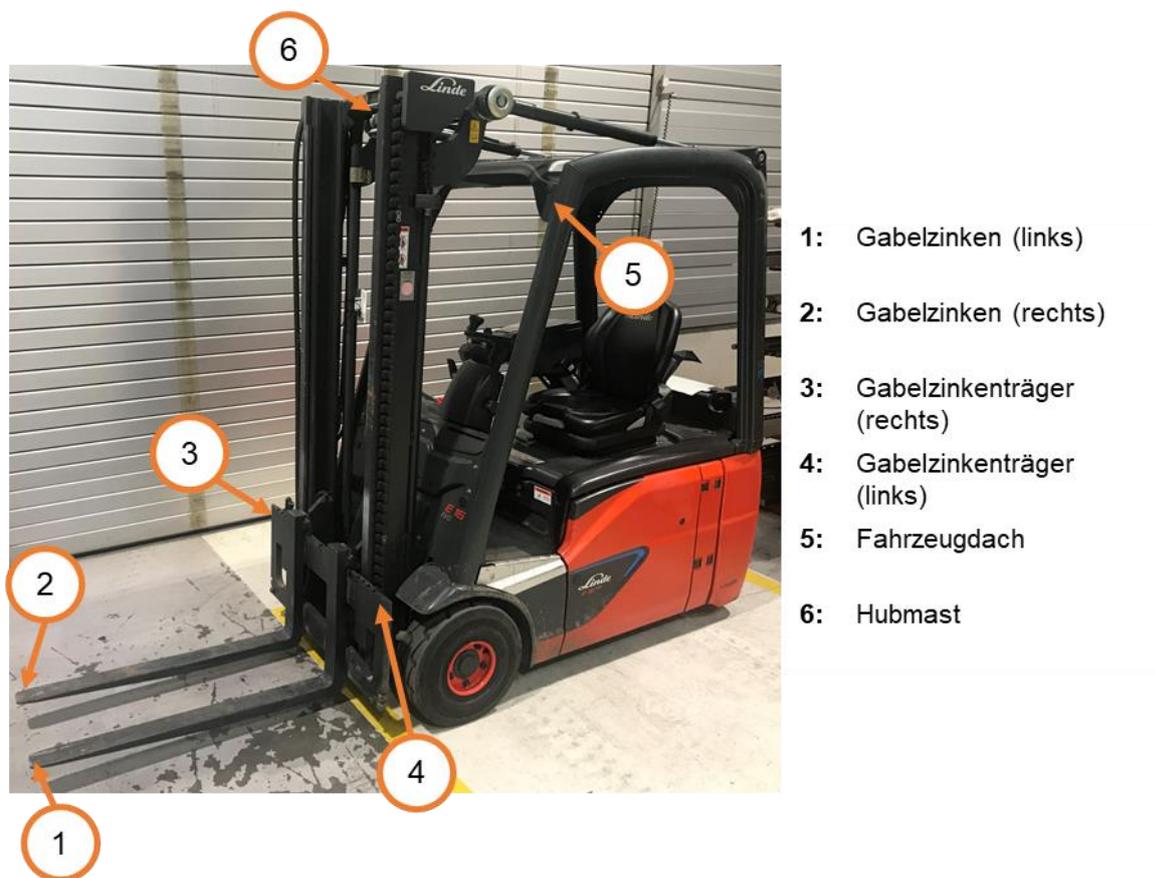


Abbildung 2-3: Potentielle Anbaupositionen am Demonstrator Linde E16 AP

### 2.3.2 2.1: Konzeption der Umgebungsaufnahme (ITA)

#### Durchgeführte Arbeiten

Verschiedene Anbaupositionen und benötigte Sichtachsen wurden mit dem PA diskutiert und bewertet. In den Folgetreffen des PA wurden weitere Anbaupositionen, basierend auf ersten Beispielaufnahmen, analysiert und bewertet. Weiterhin wurden Telefonkonferenzen mit einem Anbaugerätehersteller durchgeführt, in denen die Integration von Kamerasystemen in die Gabelzinken diskutiert wurde.

## Erzielte Ergebnisse

In Abbildung 2-3 sind die durch Beispielaufnahmen optimierten Anbaupositionen dargestellt. Weiterhin sind die einzelnen Sichtfelder in Rot visualisiert. In Blau ist zusätzlich das Sichtfeld der in der AR-Brille integrierten Kameras gezeigt.

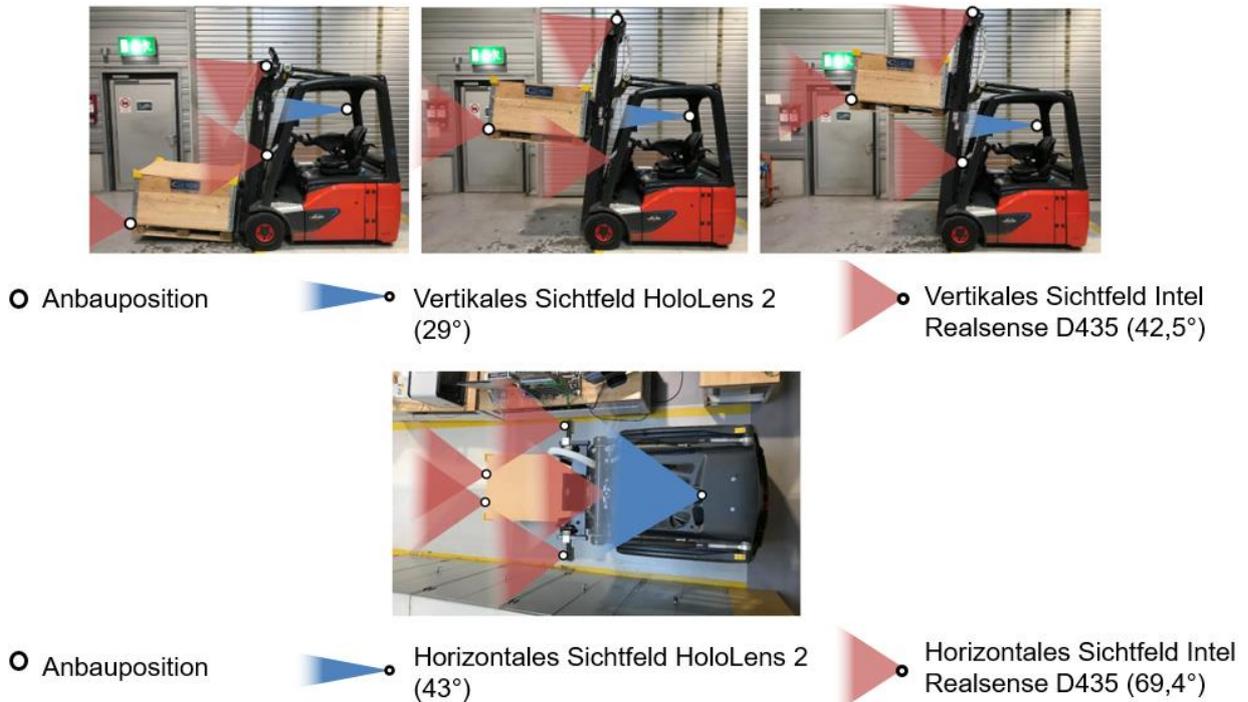


Abbildung 2-4: Optimierte Anbaupositionen: Seitenansicht (oben) und Draufsicht (unten)

### 2.3.3 AP 2.2: Konzeption der Blickrichtungserfassung (IPH)

#### Durchgeführte Arbeiten

Für die Konzeption der Blickrichtungserfassung wurden mit dem PA verschiedene Möglichkeiten diskutiert. Verschiedene Markertypen wie QR-Codes, April-Tags und ArUco-Marker wurden hinsichtlich der Robustheit, Geschwindigkeit und Genauigkeit der Erkennung analysiert.

#### Erzielte Ergebnisse

Die Positionsbestimmung des Bedienerkopfes bzw. der AR-Brille stellt einen wesentlichen Teil der Blickrichtungserfassung dar. Diese soll kamerabasiert unter Verwendung der internen Kameras der AR-Brille erfolgen. Alternativ kann eine externe Kamera am Kopf des Bedieners oder eine Kopfverfolgungskamera in der Fahrerkabine angebracht werden. Diese Alternativen können notwendig werden, wenn die Kameradaten der AR-Brille nicht in Echtzeit zur Verfügung stehen. Allgemein soll die Positionsbestimmung markerbasiert erfolgen. Die jeweiligen Marker müssen zunächst so im Gabelstapler platziert werden, dass immer mindestens einer von der Kamera der AR-Brille erkannt wird. Die Software muss anschließend die Marker detektieren und identifizieren. Daraus kann die Pose der Marker relativ zur Kamera berechnet

werden. Die Position der Marker relativ zum Staplerkoordinatensystem ist bekannt, sodass Transformationsmatrizen aufgestellt werden und zur Koordinatentransformation ins Referenzkoordinatensystem verwendet werden können.

### 2.3.4 AP 2.3: Konzeption der Kamerakalibrierung (ITA)

#### Durchgeführte Arbeiten

Die Konzeption der Kamerakalibrierung fand im Austausch mit dem PA statt. Zusätzlich fanden Diskussionen mit Entwicklungsarbeitern eines Mitglieds des PA statt.

#### Erzielte Ergebnisse

Für die Umgebungsaufnahme wird die Position und Orientierung (Pose) der Kameras benötigt. Diese Pose wird bildbasiert in einem Kalibrierungsprozess ermittelt. Der Kalibrierungsprozess lässt sich in einen On-/Offline-Prozess unterteilen und ist in Abbildung 2-5 dargestellt.

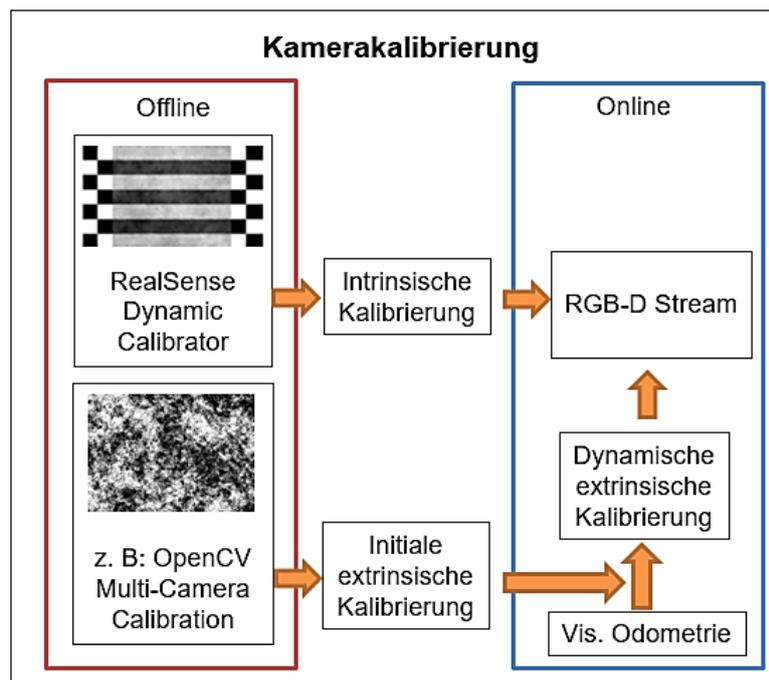


Abbildung 2-5: Konzeption der Kamerakalibrierung

Der Offline-Kalibrierungsprozess beinhaltet eine intrinsische Kalibrierung der einzelnen Kameras sowie eine initiale extrinsische Kalibrierung der Kamerasysteme. Beide Verfahren verwenden für die Kalibrierung ein 2D-Kalibrierungsobjekt, das über markante Bildpunkte verfügt. Mithilfe dieser Algorithmen kann so die Transformation zwischen den einzelnen Kamerasystemen und der Basiskamera bestimmt werden. Neben der initialen extrinsischen Kalibrierung wird eine dynamische extrinsische Kalibrierung benötigt. Dies ist notwendig, da sich die Pose der Kamerasysteme zueinander ändern kann, beispielsweise durch ein Anheben der Gabelzinken

oder durch das Neigen des Hubmastes. Die dynamische extrinsische Kalibrierung soll basierend auf dem Prinzip der visuellen Odometrie erfolgen.

## 2.4 AP 3: Technische Umsetzung

Der Aufbau des finalen Gesamtsystems ist in Abbildung 2-6 dargestellt. Äußere Einflüsse des Systems sind in Grau hinterlegt. Die Umgebungsaufnahme ist rot hinterlegt. Die Teilmodule des Systems, die der Blickrichtungserfassung zugeordnet werden können sind grün hinterlegt. Die Teilmodule des Systems die der Kompensation der Sichteinschränkungen zugeordnet werden können sind orange hinterlegt. Die initiale Kalibrierung ist gelb dargestellt.

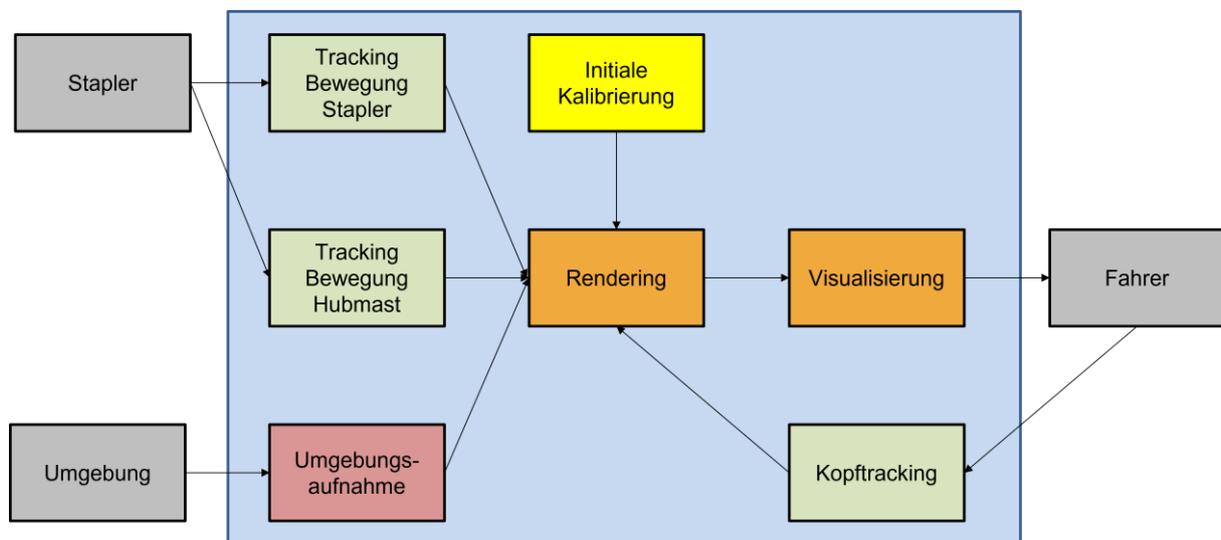


Abbildung 2-6: Überblick der Teilmodule des Gesamtsystems

### 2.4.1 AP 3.1: Realisierung der Kamerasysteme für die Umgebungsaufnahme (ITA)

#### Durchgeführte Arbeiten

Für die Realisierung der Kamerasysteme fand neben den PA-Treffen eine Videokonferenz mit einzelnen Vertretern von Industrieunternehmen statt. Im Vordergrund stand hierbei die Integration der Industrievariante D435e am Demonstrator. Die konstruktive Integration der Kamerasysteme in die Gabelzinken wurde in weiteren Onlinemeetings mit einem Anbaugerätehersteller durchgeführt. Darauffolgend wurden die Kameras sowie die hochintegrierten Gabelzinken am Demonstrator integriert und eine Spannungsversorgung aufgebaut.

#### Erzielte Ergebnisse

Die am Demonstrator montierten Kameras sind in Abbildung 2-7 dargestellt. Bei den verwendeten Kameras der Firma Famos handelt es sich um eine Industrieversion der Intel RealSense D435 RGB-D-Kamera. Diese liefert neben den Farbwerten für jeden Pixel die korrespondierenden Tiefeninformationen. Der in der Kamera verwendete FPGA übernimmt die

Konvertierung der USB-Schnittstelle auf den in der Industrie verwendeten Ethernet-Standard. Die Spannungsversorgung erfolgt mittels *Power-over-Ethernet* (PoE). Für die Versorgung des dafür notwendigen PoE-Switches wurde ein Spannungswandler mit der Staplerbatterie verbunden. Dieser führt eine Spannungswandlung von 48 V auf 220 V durch. Durch verschiedene Adapter lässt sich der Neigungswinkel der Kameras im Projektverlauf variieren.

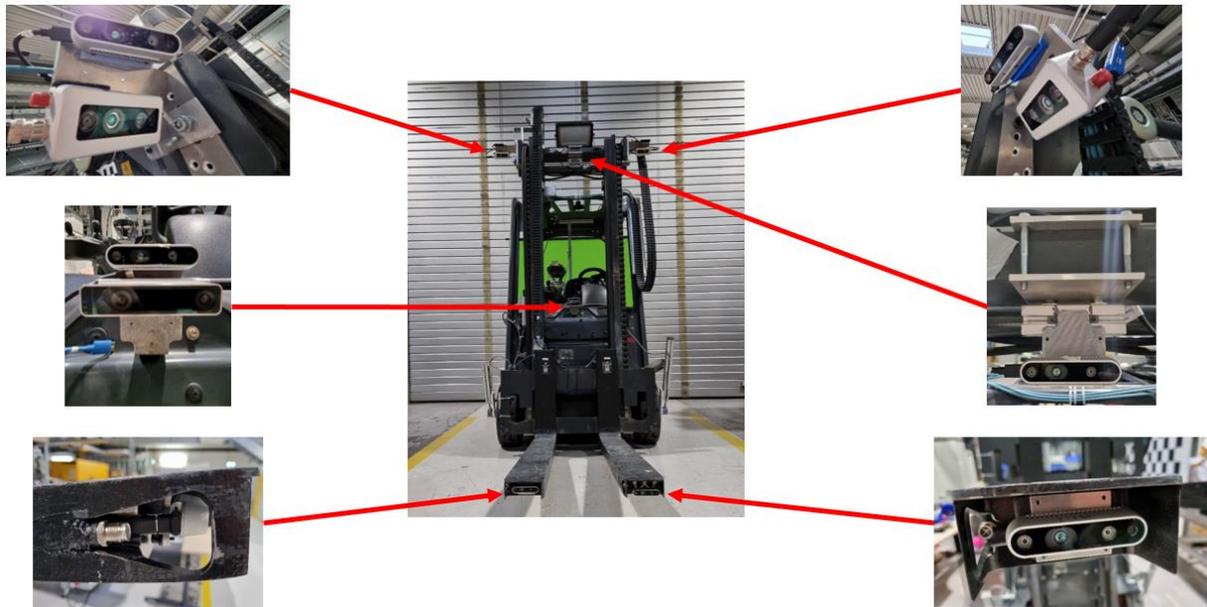


Abbildung 2-7: Demonstrator mit Kameras

Die mit einem Hersteller für Stapleranbaugeräte entwickelten Gabelzinken sind in Abbildung 2-8 dargestellt. Die Framos D435e befindet sich in einer ausgefrästen Aussparung, wodurch eine Beschädigung beim Einfahren unter den Ladungsträger vermieden werden kann. Für die Integration wurden Gabelzinken mit einer Breite von 120 mm gewählt. Die Kabelführung erfolgt durch eine seitliche Nut und anschließend über eine Schleppkette. Die Nut ermöglicht zudem eine Durchführung eines Synchronisationskabels.

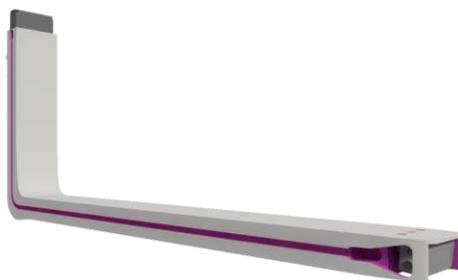


Abbildung 2-8: Hochintegrierte Gabelzinkenkameras mit RGB-D-Kamera

Die durch die Kamera generierten Aufnahmen sind in Abbildung 2-9 aus zwei verschiedenen Perspektiven gerendert dargestellt. Weiterhin ist in der Abbildung die Kontur des Demonstrators dargestellt.

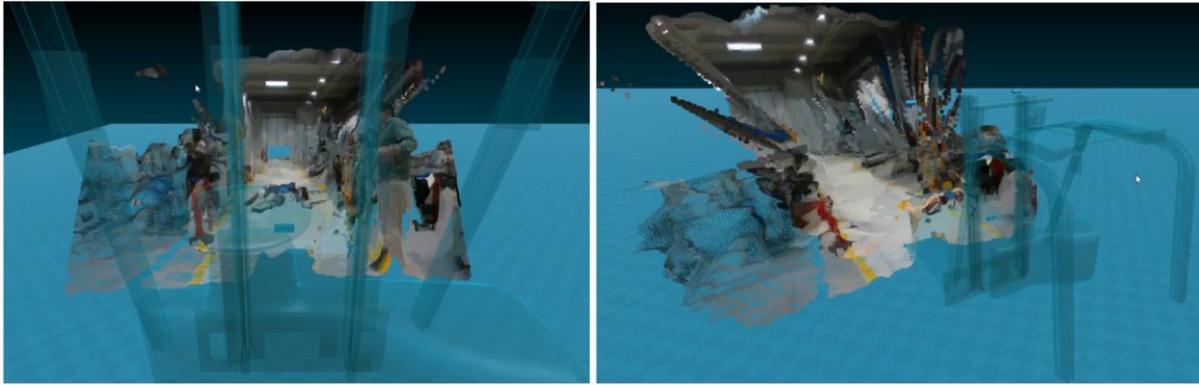


Abbildung 2-9: Umgebungsaufnahme aus verschiedenen Perspektiven: Fahrerperspektive (links) und Standpunkt außerhalb des Fahrzeugs (rechts)

## 2.4.2 AP 3.2: Implementierung der Algorithmen zur Kompensation der Sichteinschränkungen (ITA)

### Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen des AP 3.2 wurde zunächst ein Prüfstand aufgebaut, da das Demonstratorfahrzeug erst ab der KW22/2020 zur Verfügung stand. Dieser Versuchsaufbau soll das Sichteinschränkungsproblem an FFZ abstrahiert darstellen, um neue Algorithmen zu entwickeln und testen zu können.

### Erzielte Ergebnisse

Der implementierte Algorithmus verwendet für die Erkennung der Sichteinschränkungen 2D-Bilddaten. Durch einen Abgleich von Farbinformationen aus einem zuvor ermittelten korrespondierenden Bereich der rekonstruierten Szene und des Bedienersichtfelds werden die sichteinschränkenden Komponenten erkannt. Für die eigentliche Sichteinschränkungskompensation findet im nächsten Schritt eine maskenbasierte Überlagerung mit Informationen aus der einer rekonstruierten Szene statt. Der Programmablaufplan des zur Erkennung der Sichteinschränkungen ist in Abbildung 2-11 dargestellt.

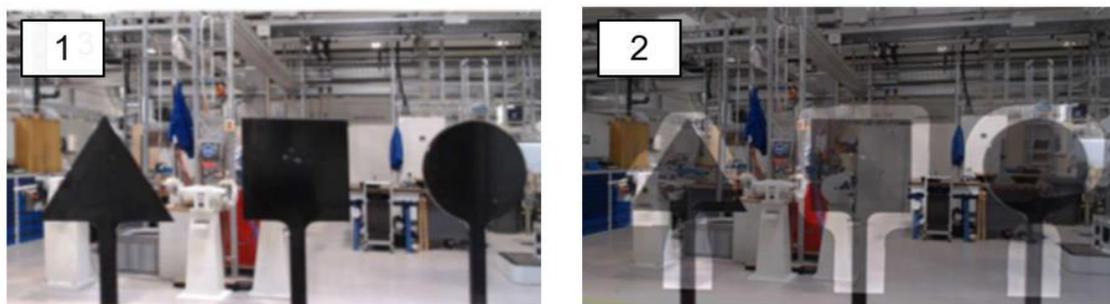


Abbildung 2-10: Sichteinschränkungen im Sichtfeld (1), Überlagerung der Sichteinschränkungen (2)

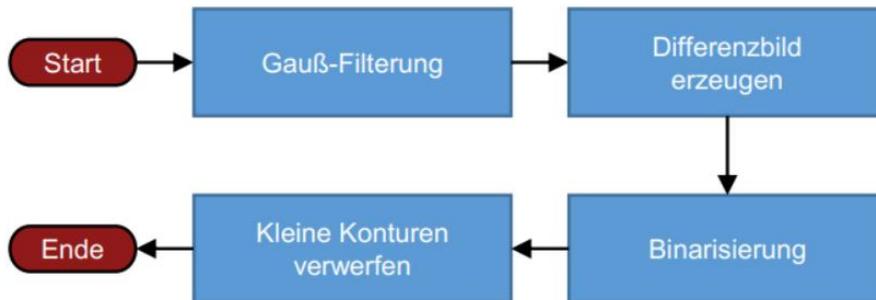


Abbildung 2-11: Programmablaufplan zum Erkennen der Sichteinschränkungen

Da Differenzen in den Intensitäten der Farbwerte beider Bilder ein starker Indikator für eine Sichteinschränkung sind, wird ein betragliches Differenzbild aus den beiden Bildern erzeugt. Dafür werden die Differenzen der Intensitäten der entsprechenden Farbkanäle errechnet. Wandelt man dieses in ein Grauwertbild um, liegt für sich ähnelnde Bereiche eine sehr geringe Abweichung vor, weshalb diese dunkel erscheinen. An Stellen von Sichteinschränkungen gibt es eine Abweichung der entsprechenden Pixelwerte und im Grauwertbild schlagen sich diese hohen Abweichungen als helle Flecken nieder.

Dieses Vorgehen bedarf allerdings einiger Adaption. Voraussetzung für die einwandfreie Funktionalität ist die korrekte Zuordnung aller Bildpixel untereinander. Durch Einflüsse, wie vor allem Abweichungen bei der Bestimmung der Homographie zwischen Panorama und Sichtfeld, haben korrespondierende Pixel nicht zwingend dieselben Koordinaten in beiden Bildern. Es kann zu starken Abweichungen kommen an Stellen, wo zueinander gehörige Pixel nicht exakt deckungsgleich sind. Dadurch hängt die Güte des Ergebnisses von Größen ab, die nur bedingt beeinflusst werden können, was eine quantitative Auswertung des Ergebnisses verhindert. Auch wenn korrespondierende Pixel nicht zwingend an selber Stelle liegen, impliziert das Verfahren, dass sie nur eine geringe Distanz zueinander haben. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um mittels Modifikation trotzdem zu den gewünschten Ergebnissen zu gelangen.

Beide Bilder sollen zunächst mit demselben Gauß-Filter geglättet werden. Die Idee hierbei ist, dass die Differenz zweier sich ähnelnder Bilder unter Verwendung eines größer werdenden Gauß-Filterkerns gegen null konvergiert. Da allerdings Sichteinschränkungen auch in kleiner Größe und Ausprägung erkennbar bleiben sollen, gilt es die optimale Größe des Filterkerns zu finden. Zu diesem Zweck wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Das erzeugte Differenzbild der mittels Gauß-Filter veränderten Bilder, zeigen wenige Abweichungen in Bereichen ohne Sichteinschränkung, wodurch die an den Gauß-Filter gestellten Erwartungen bestätigt werden können. Der nächste Schritt ist die Umwandlung des farbigen Differenzbildes in ein Grauwertbild und weiterführend das anschließende binarisieren mittels eines globalen Schwellwertverfahrens. Der Schwellwert ist Teil der zuvor erwähnten Parameterstudie. Der

Schwellwert legt die Ausprägung der Abweichung fest, die als eine Sichteinschränkung erkannt werden soll.

Als letzte Instanz zur Verhinderung von fälschlicherweise erkannten Sichteinschränkungen dient eine Betrachtung der Mindestgröße von identifizierten Flächen, wodurch weiße Bereiche aus dem Binärbild entfernt werden, die einen Mindestflächeninhalt unterschreiten und somit nicht relevant für die weitere Betrachtung sind. Durch die Mittelwertbildung mittels großer Gauß-Filterkernen ist die Differenz an den Randstellen der Sichteinschränkungen im Sichtfeld nicht mehr von der Differenz sich ähnelnder Bildbereiche zu unterscheiden. Durch Dilation der Maske kann dieses Problem behoben werden. Die Dilation reduziert zudem Bildbereiche, in denen eine Sichteinschränkung vorliegt, die aber nicht als solche erkannt wurden.

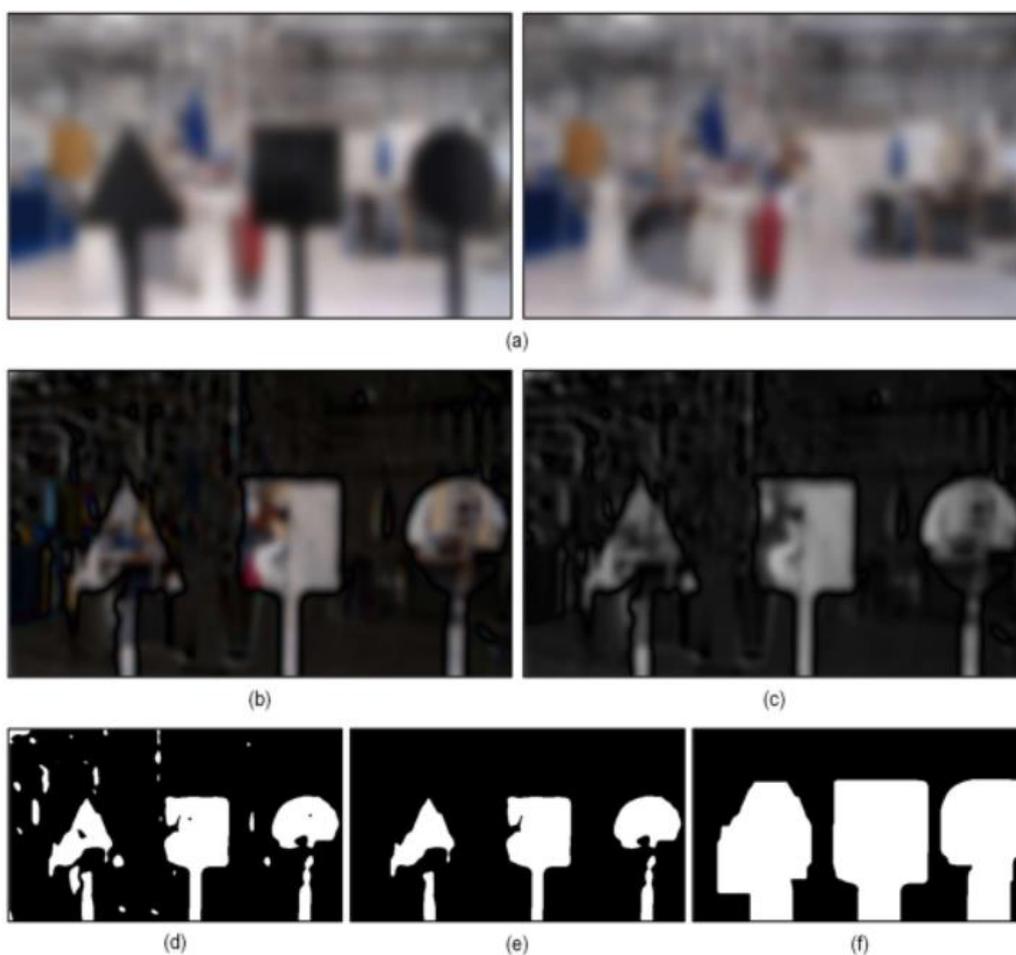


Abbildung 2-12: Schrittweise Erstellung der Ist-Maske: (a) Gauß-Filterung beider Bilder, (b) Differenzbild im Farbraum, (c) Grauwertbild des Differenzbildes, (d) Binarisiertes Differenzbild, (e) Entfernung kleiner Konturen, (f) Dilation der Maske

In einem weiteren Schritt wurde eine markerbasierte Sichteinschränkungsdetektion implementiert. Die Detektion der Sichteinschränkungen erfolgt hierbei über mehrere im Bedienerblickfeld angebrachten QR-Codes im Inneren des Flurförderzeugs. Anhand dieser Codes findet die

Ausrichtung eine Überlagerung mit einem 3D-Modell des Staplers statt, indem die sichteinschränkende Komponenten definiert wurden. Die Detektion der sichteinschränkende Komponenten mithilfe der AR-Brille ist in Abbildung 2-13 dargestellt.



Abbildung 2-13: Markerbasierte Sichteinschränkungsdetektion mit Einblendung auf der HoloLens 2

In der endgültigen Version erfolgte die Kompensation der Sichteinschränkungen auf Grundlage eines virtuellen Staplermodells in Unity. Hierfür wurden Positionsdaten von Stapler und HoloLens 2, die Daten einer initialen Kalibrierung sowie die Kameradaten in Unity zusammengeführt wie in Abbildung 2-14 dargestellt. Das Rendering der Szene läuft dementsprechend auf dem Stapler-PC. Die gerenderte Szene wird an die HoloLens 2 gesendet und dort visualisiert. Die gerenderte Szene wird an die HoloLens 2 gesendet und dort visualisiert.

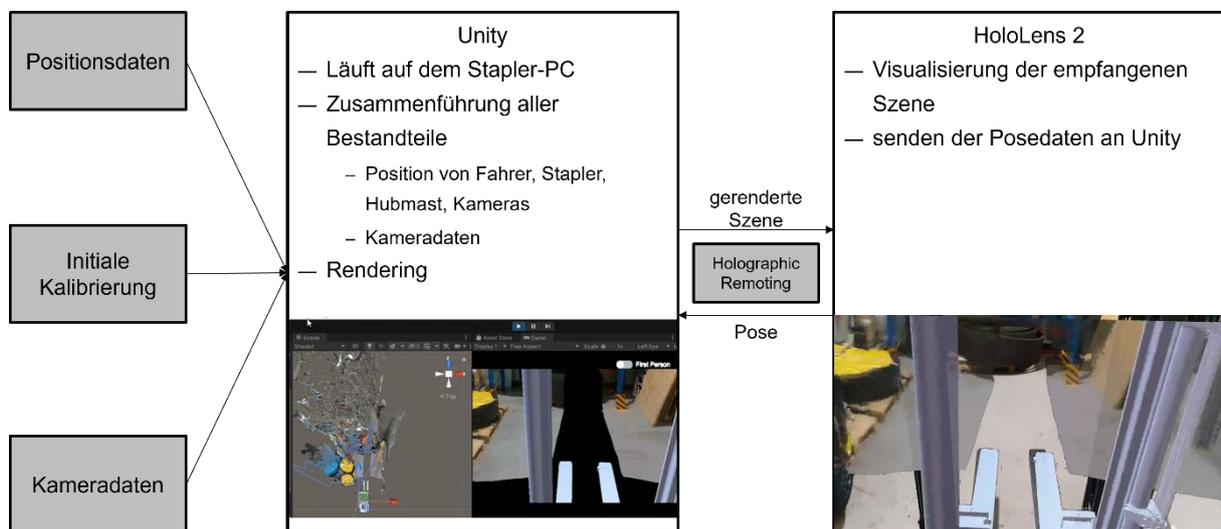


Abbildung 2-14: Ablauf der Visualisierung auf der HoloLens 2

Bei der Visualisierung kann dabei auf verschiedene Modi zurückgegriffen werden. Abbildung 2-15 (links) zeigt die Einblendung der Staplergeometrie auf der HoloLens 2. Abbildung 2-15 (rechts) zeigt die Einblendung der Staplergeometrie sowie der kompletten Punktwolken auf der HoloLens 2. Diese Modi dienen hauptsächlich der Validierung der Teilkomponenten bzw.

des Gesamtsystems. Anhand der Staplergeometrie kann bewertet werden, ob die Modellüberlagerung des realen Staplers mit dem virtuellen übereinstimmt. Dies kann zum einen im Stillstand aber vor allem für Bewegungen des Staplers, des Hubmastes und des Fahrers in dieser Visualisierungsform am besten beurteilt werden. Mit der Einblendung der kompletten Punktwolken kann die Ausrichtung der Kameras und somit der Punktwolken zum Staplermodell überprüft werden.



Abbildung 2-15: Einblendung der Staplergeometrie (links), Einblendung von Staplergeometrie und kompletten Punktwolken (rechts)

Abbildung 2-16 zeigt die Einblendung der Punktwolken ausschließlich auf den Sichteinschränkungen. Dieser Modus erfüllt das Hauptziel des Vorhabens, die Möglichkeit durch Sichteinschränkungen im Stapler hindurchzusehen, während Bereiche, in denen freie Sicht herrscht, weiterhin der Realität entsprechen.



Abbildung 2-16: Einblendung der Punktwolken ausschließlich auf den Sichteinschränkungen

### 2.4.3 AP 3.3: Implementierung der Blickrichtungserfassung (IPH)

#### Durchgeführte Arbeiten

Auf Basis des in AP 2.2 erarbeiteten Konzepts wurden ArUco-Marker im Demonstrationsstapler platziert. Die zur Erkennung notwendigen Algorithmen wurden in C++ umgesetzt. Zudem wurden diverse Versuche mit der AR-Brille durchgeführt, um deren Funktionen bestmöglich zu nutzen und die resultierenden Restriktionen einzuhalten.

#### Erzielte Ergebnisse

Im Demonstrationsstapler mussten über 3D-gedruckte Adapterplatten planare Oberflächen geschaffen werden, um eine sichere Detektion von Markern zu gewährleisten. Die Verwendung mehrerer kleinerer Marker auf einer Platte anstatt eines großen erwies sich als vorteilhaft für die Robustheit der Erkennung. Zudem müssen die Marker einen ausreichend großen Kontrast zum Hintergrund aufweisen. Aufgrund der wechselnden Umgebungsbeleuchtungen kann eine zusätzliche Beleuchtung in der Fahrerkabine des Staplers notwendig werden. Eine mögliche Anbringung von ArUco-Markern im Gabelstapler ist in Abbildung 2-17 (links) dargestellt. Es handelt sich um eine Weitwinkelaufnahme. Das Sichtfeld der Hauptkamera der Microsoft HoloLens 2 ist deutlich kleiner.



Abbildung 2-17: Anbringung ArUco-Marker im Gabelstapler (links), Detektion der Marker (rechts)

Abbildung 2-17 (rechts) zeigt die Detektion der ArUco-Marker im Gabelstapler. Es handelt sich um einen Ausschnitt aus einem mit der Microsoft HoloLens 2 aufgenommenem Video. Während die Detektion der Marker stabil läuft, werden die Achsen teilweise fehlerhaft platziert, wodurch auch die berechnete Pose nicht korrekt ist. Um die fehlerhaft orientierten Achsen auszusortieren, wurden zulässige Bereiche für die Translation in Richtung der einzelnen Achsen im Staplerkoordinatensystem sowie für die Rotation um diese Achsen gemäß der Bewegungsfreiheit des Fahrers festgelegt.

Die Verwendung der HoloLens 2 erlaubt eine sehr flüssige Darstellung von Hologrammen auch bei schnellen Kopfbewegungen. Diese Fähigkeit kann nur dann optimal genutzt werden, wenn die HoloLens 2 auch dafür verwendet wird, die Kopfbewegungen zu tracken. Damit die rechenintensive Zusammenführung aller Teilmodule auf einem leistungsstarken PC und nicht auf der HoloLens abläuft, wird statt einer autarken App auf der HoloLens der Holographic Re-

remoting Player in Unity verwendet. Dieser erlaubt die Verwendung der HoloLens 2 als Anzeigemedium und zur Bestimmung der Kopfposition. Während der Holographic Remoting Player läuft, kann von diesem jedoch nicht auf die interne Kamera der HoloLens 2 zugegriffen werden. Zudem wird die Positionsbestimmung der HoloLens 2 dann zwingend verwendet, um die Position des Fahrers zu bestimmen. Subjektiv betrachtet ist diese Positionsbestimmung sehr genau, wenn ein Mensch die HoloLens 2 auf dem Kopf trägt und entweder nur den Kopf bewegt oder sich aus eigener Kraft fortbewegt. Für den vorliegenden Anwendungsfall kann die Positionsbestimmung weniger gut erfolgen, da die HoloLens 2 sich in einem beweglichen Objekt befindet und sich relativ zu einem großen Teil ihrer Umgebung (dem Stapler) nur wenig bewegt. Diese Relativbewegung ist aber genau die Bewegung, die für die Kompensation der Sichteinschränkungen benötigt wird.

Die Positionsbestimmung der HoloLens kann in verschiedenen Modi erfolgen. Im Modus „Orientation only“ wird nur die Kopffrotation aufgenommen. Im Modus „world“ werden sämtliche Freiheitsgrade betrachtet. Gesucht wird für die Bereitstellung der Einblendung die Relativbewegung zwischen den Sichteinschränkungen und dem Kopf des Fahrers. Im Modus „Orientation only“ wäre dementsprechend keine Kenntnis über die Bewegung des Staplers notwendig, solange dieser gerade fährt oder stillsteht. Ohnehin können aber Translationen des Kopfes, wie sie während der Fahrt ständig vorkommen, nicht abgebildet werden. Folglich kommt die Verwendung dieses Modus nicht in Frage. Stattdessen muss die Relativbewegung ermittelt werden, indem die Bewegung des Staplers mit der des Kopfes, im Modus „World“ abgeglichen wird. Dementsprechend besteht die Blickrichtungserfassung aus drei Teilmodulen „Kopftracking“, „Tracking Bewegung Stapler“ und „Tracking Bewegung Hubmast“.

### **Teilmodul: Tracking Bewegung Stapler**

Der Ablauf des Trackings der Staplerbewegung wird in Abbildung 2-18 dargestellt. Die Staplerbewegung wird über Drehgeber, die an den Vorderreifen des Staplers montiert werden, bestimmt. Die Drehgeber werden über eine HBM Quantum X Box per Ethernet mit dem PC verbunden. Die softwareseitige Anbindung an Unity erfolgt über einen Socket (C++ zu Unity). Die Drehgeber übergeben die Drehzahl der Reifen an Unity. Über das Zwei-Rad-Modell nach DUDEK UND JENKIN [5] wird dann die resultierende Bewegung des Staplers berechnet und auf das digitale Staplermodell in Unity angewendet.

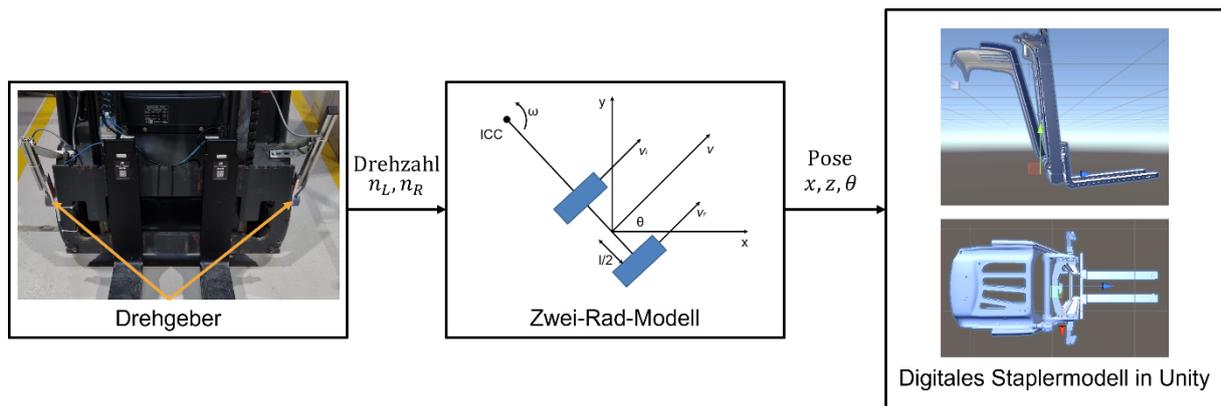


Abbildung 2-18: Ablauf des Trackings der Staplerbewegung

### Teilmodul: Tracking Bewegung Hubmast

Neben der Bewegung des Staplers (Kabine inkl. Hubmast) muss die Bewegung die Relativbewegung die unabhängige Bewegung des Hubmastes bestimmt werden. Diese gliedert sich in die Neigung des Hubmastes und die Hubhöhe.

Die Ermittlung der Hubmastneigung erfolgt über eine Intel T265 Trackingkamera. Diese kann über den Realsense Wrapper direkt in Unity integriert werden und liefert Absolutwerte für die Rotation um drei Raumrichtungen. Die Anbringung der Kamera erfolgt seitlich am Gabelträger, wie in Abbildung 2-19 (links) dargestellt.

Die Hubhöhe wird über einen Seilzugsensor bestimmt. Dieser wird hardwareseitig über einen Arduino mit dem PC verbunden. Die softwareseitige Integration in Unity erfolgt über Ardity. Der Sensor arbeitet mit einer Ausgangsspannung von 0 – 5 V, was 0 – 3 m entspricht. Die Anbringung des Seilzugsensors am Hubmast ist in Abbildung 2-19 (rechts) dargestellt.

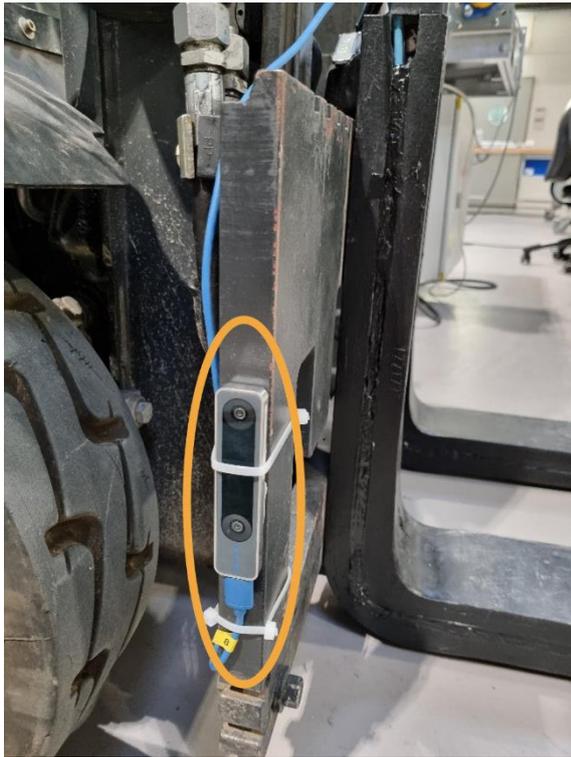


Abbildung 2-19: Anbringung der Trackingkamera am Gabelträger (links), Anbringung des Seilzugsensors am Hubmast (rechts)

### Teilmodul: Kopftracking

Das wesentliche Kopftracking erfolgt durch die HoloLens 2. Die Positionsdaten werden direkt über die USB-Verbindung an den PC gesendet und werden in Unity direkt verwendet, um den Fahrer zu positionieren. Schon bei ersten Testfahrten wurde deutlich, dass eine Abweichung zwischen den durch das Teilmodul „Tracking Bewegung Stapler“ ermittelten Werten und den HoloLens 2 Positionsdaten besteht.

Die Abweichungen zwischen den Werten der Positionsdaten des Drehgeber-Skripts und der HoloLens 2 führen dazu, dass der Fahrer durch die Einblendung hindurchfährt, wenn der Stapler sich nach vorne bewegt. Grund dafür ist, dass die Position der HoloLens 2 stärker ansteigt als die durch den Drehgeber bestimmte. Die HoloLens 2 ermöglicht jedoch eine sehr flüssige Einblendung, auch bei schnelleren Kopfbewegungen. Dementsprechend wurde eine Plausibilitätsprüfung integriert, wie in Abbildung 2-20 dargestellt. Auf der HoloLens 2 wurde ein ArUco Marker angebracht. Vor bzw. über dem Fahrer wurde eine zusätzliche Webcam angebracht. Über eine ArUco Marker Erkennung in OpenCV (C++ Skript) wird die Position des Markers, und damit der HoloLens 2, zur Webcam bestimmt. Eine Koordinatentransformation ermöglicht dann die Verschiebung des Staplers relativ zu HoloLens 2 in Unity. Das OpenCV-Skript wird über eine Dynamic Link Library (.dll) in Unity eingebunden. Das Skript wird nur in einem einstellbaren Intervall (bspw. jede Sekunde) ausgeführt. Die ermittelten Werte werden nur bei

einer einstellbaren Mindestabweichung zur aktuellen Position in Unity verwendet. So soll sichergestellt werden, dass weiterhin primär die HoloLens 2 für das Kopftracking verwendet wird, um eine möglichst flüssige Bewegung, ohne ständige Eingriffe durch das Skript, zu realisieren. Zudem wird das Toleranzfenster für die Relativposition zwischen Marker und Kamera eng gesetzt, sodass die Anpassungen nur vorgenommen werden, wenn der Fahrer gerade aus dem Fahrzeug schaut.



Abbildung 2-20: Plausibilitätsprüfung Kopftracking

#### 2.4.4 AP 3.4: Implementierung der Algorithmen zur Kalibrierung (ITA)

##### Durchgeführte Arbeiten

Für die Kalibrierung des Multi-Kamera-Systems wurde eine intrinsische Kalibrierung der einzelnen Kameras und eine extrinsische Kalibrierung des Gesamtsystems durchgeführt. Darauf folgend wurden drei Methoden implementiert, die eine initiale Kalibrierung der Kamerasysteme zu einer Basiskamera ermöglichen. Vorversuche zur visuellen Odometrie zeigten, dass die Genauigkeit der dynamischen Positions- und Orientierungsbestimmung (Pose) durch ein bildgebendes Verfahren unzureichend ist. Aus diesem Grund wurde die dynamische Poseerfas-

sung mit der im vorherigen Abschnitt beschriebene Sensorik (Seilzugsensor und Trackingkamera) und einem kinetischen Modell des Duplexmastes umgesetzt. Der implementierte Ablauf zur Kamerakalibrierung ist nachfolgend dargestellt.

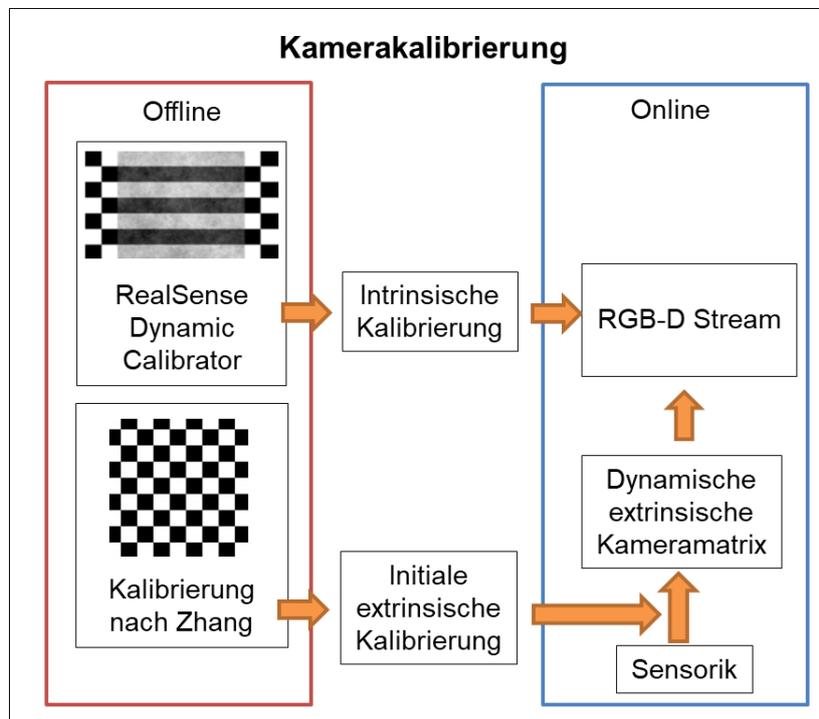


Abbildung 2-21: Ablauf der Kamerakalibrierung

### Erzielte Ergebnisse

Mithilfe des RealSense Dynamic Calibrators wurden die Kameras einzeln kalibriert. Diese intrinsische Kalibrierung wird direkt auf dem Chip der Stereokamera gespeichert. Nachfolgend findet die extrinsische Kalibrierung Für die initiale Kalibrierung drei verschiedene Verfahren untersucht: OpenCV Multi-Camera Calibration, Kalibr und Zhang [6]. Die untersuchten Kalibriermuster sind in Abbildung 2-22 dargestellt.

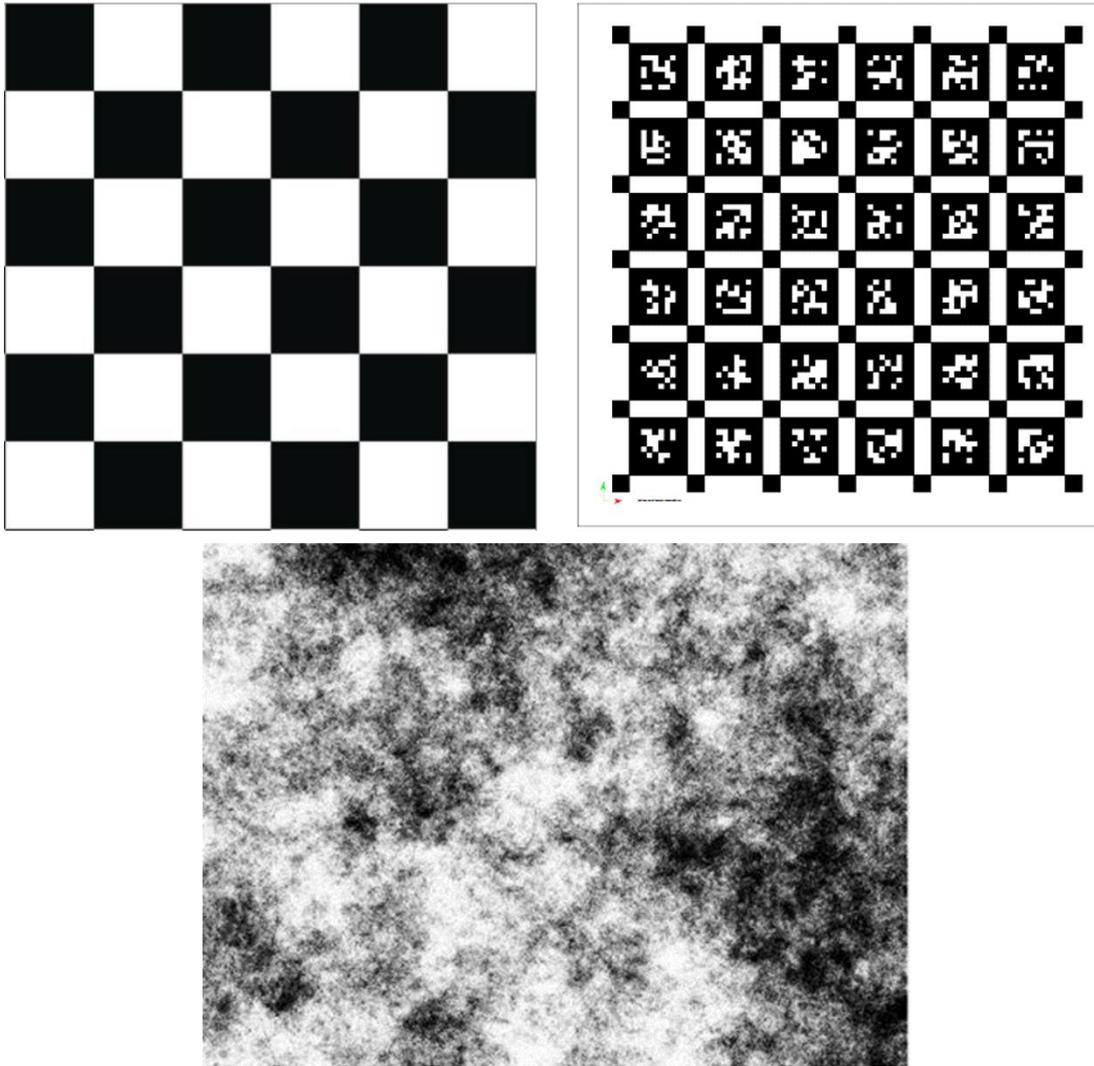


Abbildung 2-22: Random Pattern (links) und April-Tag (rechts), Schachbrettmuster (unten)

Die *OpenCV Multi-Camera Calibration* [7] und *Kalibr* [8, 9, 10, 11, 12] zeigten sich zunächst vorteilhaft, da das Kalibrierungsmuster nicht vollständig von den einzelnen Kameras erfasst werden muss. Jedoch führt die verwendete Kamerakonfiguration zu Problemen, da durch Abstände von bis zu 2.000 mm (zwischen Hubmast- und Gabelzinkenkamera) ein gleichzeitiges Erfassen einer ausreichenden Anzahl an Merkmalen im Kalibrierungsmuster nicht möglich war und somit die Qualität der Kalibrierung unzureichend war. Deshalb wurde eine paarweise Kalibrierung von benachbarten Kameras durchgeführt, wodurch jede Kamera im definierten Weltkoordinatensystem beschrieben werden kann. Der Ablauf ist in Abbildung 2-23 dargestellt. Im ersten Schritt findet eine Kalibrierung zwischen der linken Hubmastkamera und der mittleren Hubmastkamera statt. Im Anschluss wird ebenfalls die rechte Hubmastkamera zur mittleren Kalibrierung. Diese Kalibrierungsgruppe wird im dritten Schritt zur Basis kalibriert. Im vierten Schritt findet eine paarweise Kalibrierung zwischen linker und rechter Gabelzinkenkamera statt, welche im letzten Schritt wieder zur Basiskamera kalibriert werden.

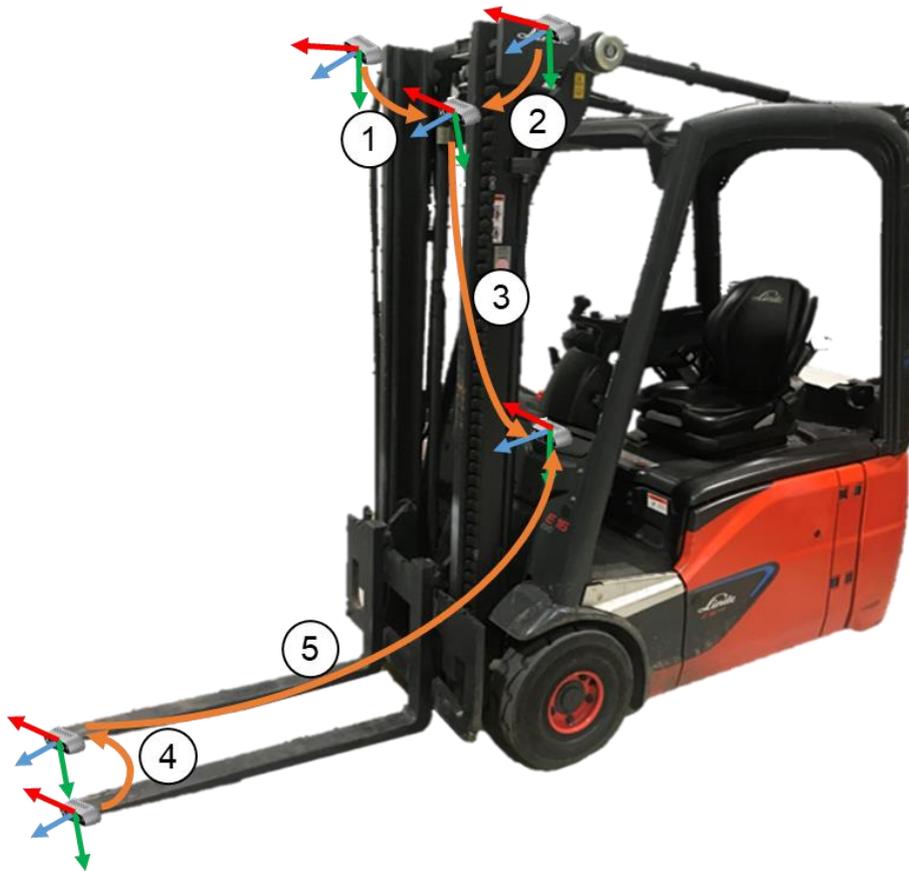


Abbildung 2-23: Ablauf der Kamerakalibrierung

Die eigentliche Kalibrierung erfolgte durch mehrere Aufnahmen des Kalibrieremuster, das in unterschiedlichen Posen vor dem zu kalibrierenden Kamerapaar präsentiert wurden. Hierbei musste das jeweilige Muster immer vollständig von beiden Kameras der Paarung erfasst werden. Die *Matlab Calibration Toolbox* [13] ermöglicht die Posebestimmung zwischen den Kameras. Die Ergebnisse der Kalibrierung des Multikamerasystems sind in Abbildung 2-24 dargestellt.

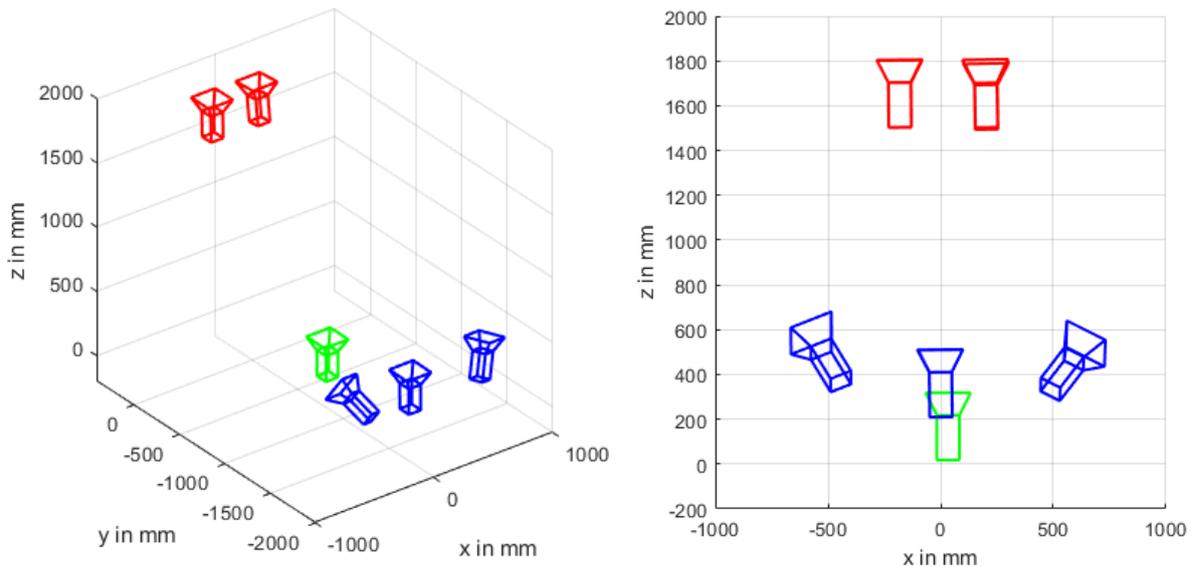


Abbildung 2-24: Ergebnisse der Kalibrierung

## 2.4.5 AP 3.5: Zusammenführung der Teilergebnisse (IPH)

### Durchgeführte Arbeiten

Auf Basis der in AP 3.1 bis AP 3.4 implementierten Teilergebnisse erfolgte in diesem AP die Zusammenführung der Teilergebnisse. Die Hardware wurde am Demonstrationsstapler installiert. Die einzelnen Komponenten wurden softwareseitig in Unity integriert und optimiert.

### Erzielte Ergebnisse

Als Ergebnis dieses AP lag ein Demonstrator zur virtuellen Sichtverbesserung von FFZ vor. Zusätzlich zu der Integration der zuvor beschriebenen Komponenten wurden bspw. Anpassungen vorgenommen, um die Parameter der Komponenten in der Unity Umgebung anpassen zu können. Zudem wurde die Möglichkeit integriert, ein virtuelles Objekt auf den Gabelzinken zu platzieren, sodass auch Ladung auf den Zinken ausgeblendet werden kann.

Die Interaktion kann entweder über die Bedienung in Unity oder über Handgesten auf der HoloLens 2 erfolgen. So können bspw. Buttons eingeblendet werden, mit denen kleinere Korrekturen an der Modellausrichtung vorgenommen werden können.

## 2.5 Validierung

### 2.5.1 AP 4.1: Validierung der Blickrichtungserfassung (IPH)

#### Durchgeführte Arbeiten

Die Blickrichtungserfassung wurde validiert, indem die Positionsdaten aus den Teilmodulen miteinander verglichen wurden. Hierfür wurden Testfahrten im ITA durchgeführt und ausgewertet.

#### Erzielte Ergebnisse

Die Notwendigkeit dieser Messungen besteht, da eine Abweichung im Tracking des Staplers und der HoloLens 2 dazu führt, dass der Fahrer durch die Einblendung hindurchfährt. Der Messaufbau ist in Abbildung 2-25 dargestellt. Die Messstrecke (links) wurde mit dem Stapler abgefahren und punktuell die Messwerte eines Laserdistanzsensors (rechts), die Positionsdaten der HoloLens 2 und die Ergebnisse des Drehgeber-Skripts aufgenommen.



Abbildung 2-25: Messaufbau zur Bestimmung der Abweichung zwischen Realität, Tracking der HoloLens 2 und Drehgeber-Skript

Abbildung 2-26 zeigt die normierte Abweichung der Positionsdaten der HoloLens 2 bzw. des Drehgeber-Skripts von den gemessenen Werten Laserdistanzsensors. Die Abweichung des Drehgeberskripts ist insgesamt deutlich kleiner und unterliegt geringeren Streuungen.

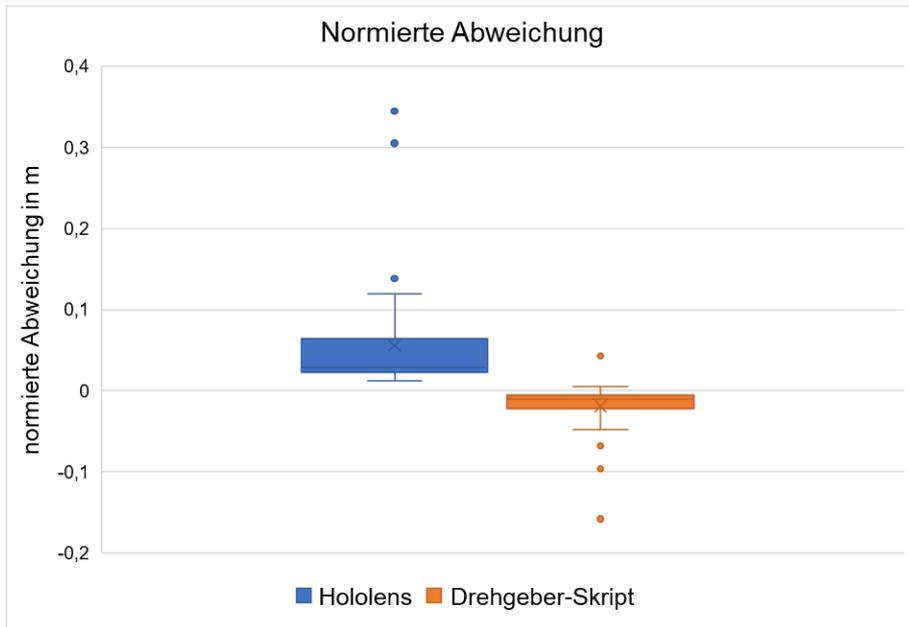


Abbildung 2-26: Normierte Abweichung der Positionsdaten der HoloLens 2 bzw. des Drehgeber-Skripts von den gemessenen Werten Laserdistanzsensors

Abbildung 2-27 zeigt die Abweichung der Positionsdaten der HoloLens 2 und des Drehgeber-Skripts von den gemessenen Werten des Laserdistanzsensors abhängig von der Distanz (gemessene Werte des Laserdistanzsensors). Auch hier lässt sich erkennen, dass die Positionsdaten des Drehgeber Skripts deutlich näher an den gemessenen Werten liegen als die Positionsdaten der HoloLens 2.

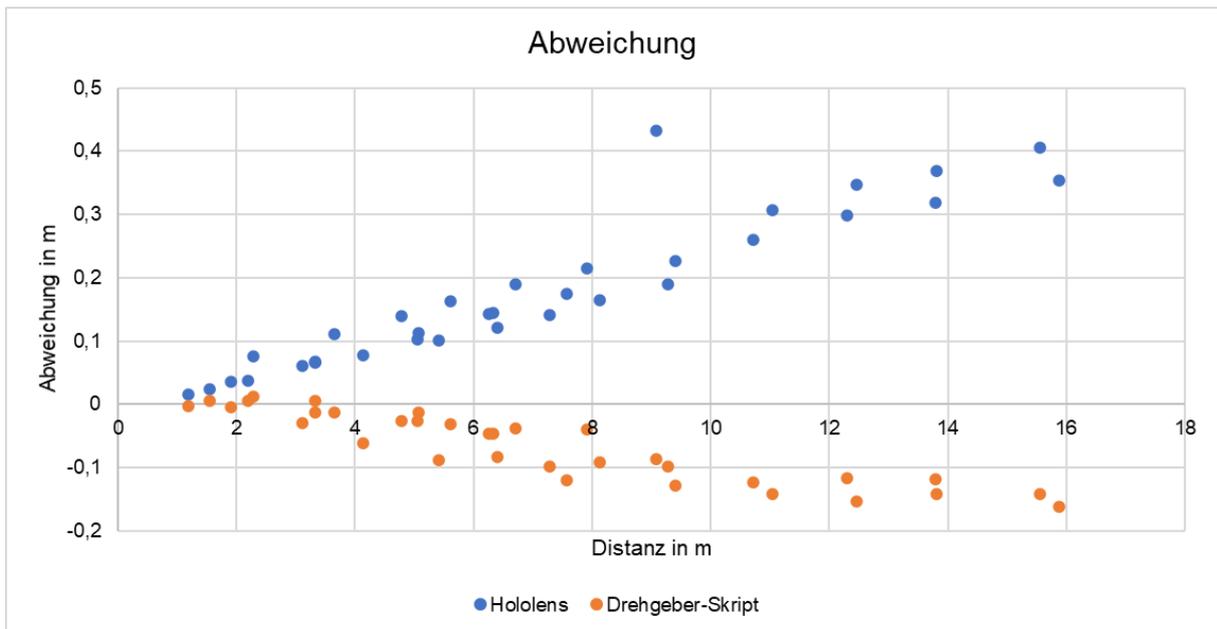


Abbildung 2-27: Abweichung der Positionsdaten der HoloLens 2 und des Drehgeber-Skripts von den gemessenen Werten des Laserdistanzsensors abhängig von der Distanz

Da auf das Tracking der HoloLens 2 nicht verzichtet werden kann und sollte, wird die in Kapitel 2.4.3 Plausibilitätsprüfung zur Anpassung der Position des Staplers eingesetzt.

## 2.5.2 AP 4.2: Validierung der Umgebungsaufnahme und Sichteinschränkungs-kompensation (ITA)

### Durchgeführte Arbeiten

In diesem AP wird die Validierung der Sichteinschränkungskompensation durchgeführt. Zu diesem Zweck wird die Einblendungsgenauigkeit und der Deckungsgrad der Einblendung auf der HoloLens 2 untersucht. Die Validierung erfolgt mithilfe eines ChArUco Musters (vgl. Abbildung 2-28) mit den Abmaßen 3.060 x 2.330 mm.

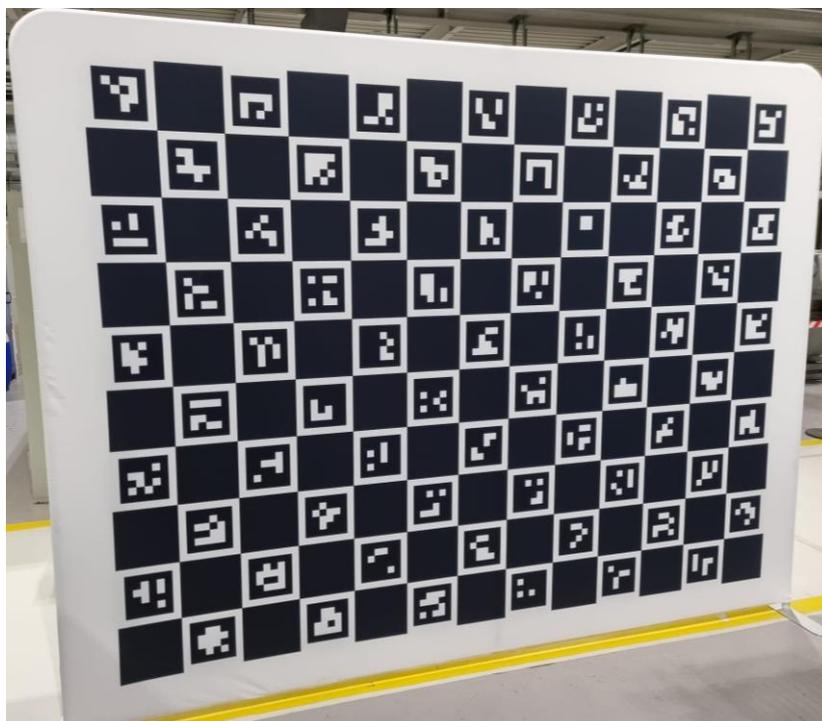


Abbildung 2-28: ChArUco Board mit 65 ArUco Markern

Bei dem verwendeten Muster handelt es sich um ein Schachbrettmuster (Kantenlänge 220 mm), in dessen weißen Feldern 65 ArUco Marker platziert sind. Jeder Marker weist eine bestimmte ID (0-64) auf, die mithilfe des *ArUco 4x4 Dictionaries* entschlüsselt werden kann. Durch die Verwendung von kodierten Markern ist jederzeit eine eindeutige Zuordnung zwischen der realen Welt und der Einblendung im Bedienerblickfeld sichergestellt. Das ChArUco Muster wird in verschiedenen Entfernungen vor dem Demonstratorfahrzeug positioniert und im Anschluss die Einblendungsgenauigkeit untersucht. Der Versuchsaufbau ist in folgender Abbildung 2-29 dargestellt.

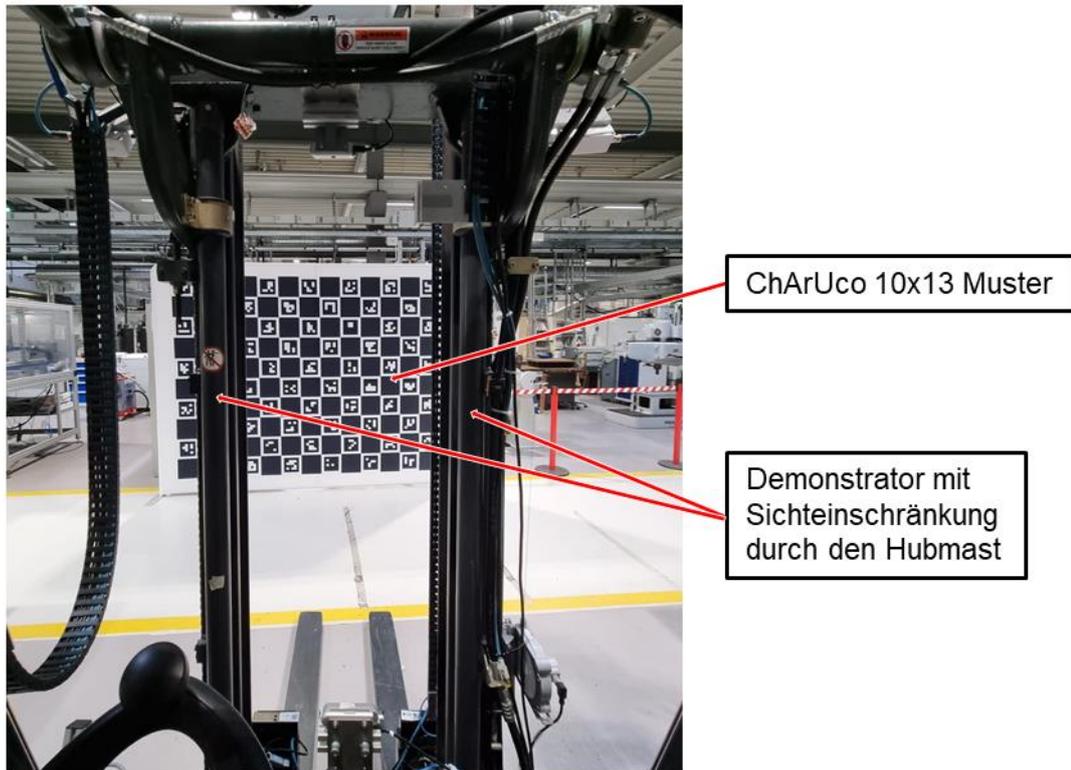


Abbildung 2-29: Versuchsaufbau für die Untersuchung der Einblendungsgenauigkeit

### Erzielte Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die positionsgenaue Einblendung im Bedienerblickfeld eine große Herausforderung darstellt und ausschlaggebend für eine immersives Nutzererlebnis ist. Abbildung 2-30 zeigt beispielhaft die Überblendung der Sichteinschränkung mit der rekonstruierten Szene für einen Blick hindurch zwischen der A-Säule und dem rechten Teil des Hubgerüsts. Die Kontur der Sichteinschränkung ist farbig hervorgehoben (orange).

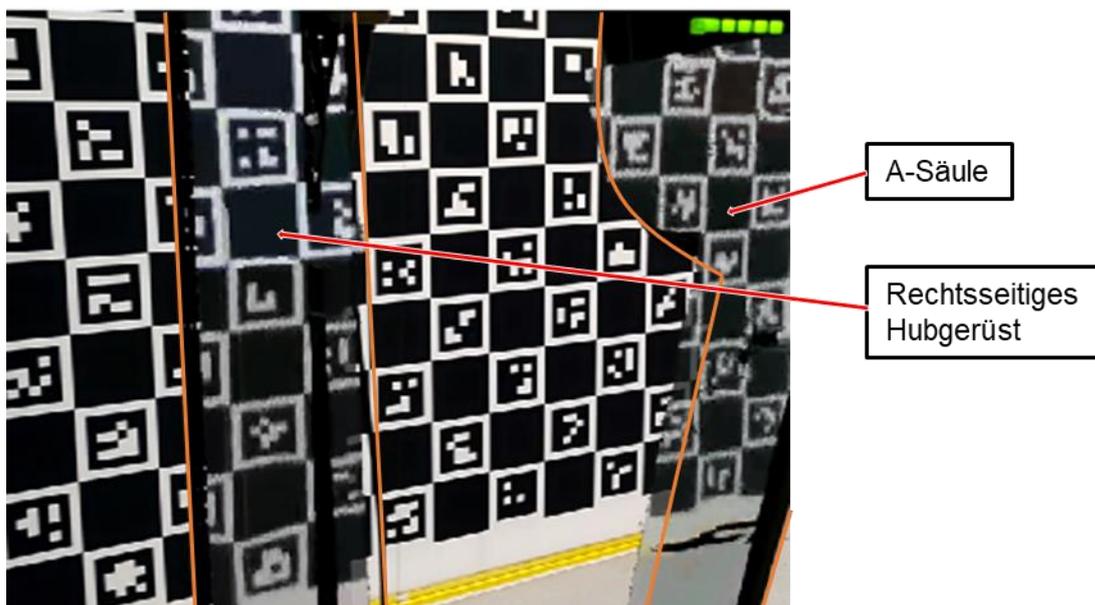


Abbildung 2-30: Sichteinschränkungskompensation für Blick zwischen Hubgerüst und A-Säule

Es zeigt sich, dass zwischen zwei Genauigkeiten differenziert werden muss, zum einen die Genauigkeit der Shaderausrichtung und zum anderen die Ausrichtung zwischen rekonstruierter Szene und Realität. Durch eine fehlerhafte Modellausrichtung ist jedoch nicht zugleich eine fehlerhafte Überblendung der Sichteinschränkungen festzustellen. Die Ermittlung der Positionsgenauigkeit erfolgt durch den Abgleich der Rückprojektion des Musters in das Bedienerblickfeld und dem zeitgleich im Sichtfeld befindlichen Mustern. Die durch die Sichteinschränkung verdeckten Marker der realen Szene werden durch eine lineare Interpolation ermittelt und somit der Verlauf der horizontalen und vertikalen Begrenzung berechnet. Beispielhaft ist dieser Vorgang in Abbildung 2-31 visualisiert.

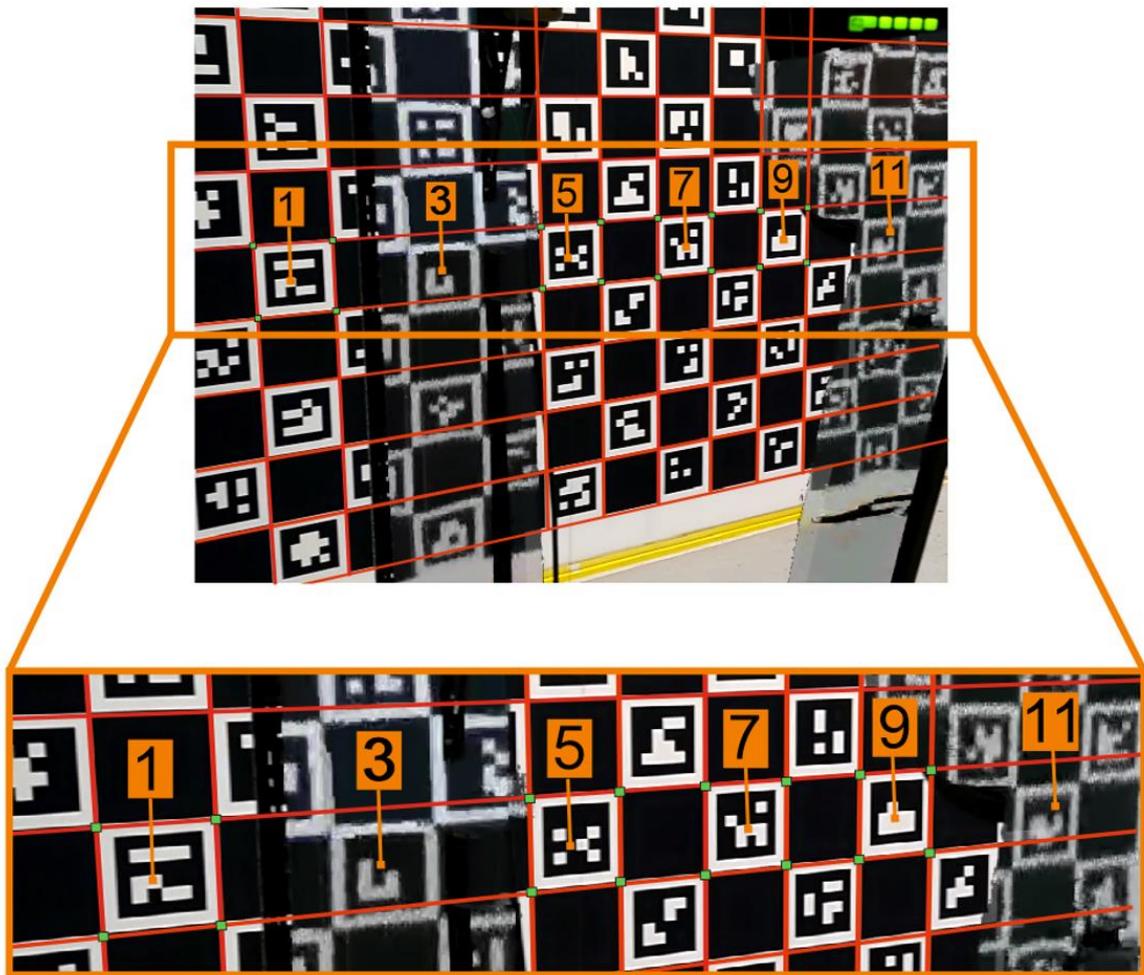


Abbildung 2-31: ChArUco Board mit unvollständig rekonstruierten Kanten: Sichteinschränkungen verdecken teilweise die vertikalen Begrenzungen der einzelne Felder

Der ArUco-Marker 3 wird durch die mittlere Hubmastkamera erfasst und Marker 11 durch die rechte Hubmastkamera. Die Interpolation der verdeckten Eckpunkte ist in Abbildung 2-32 visualisiert

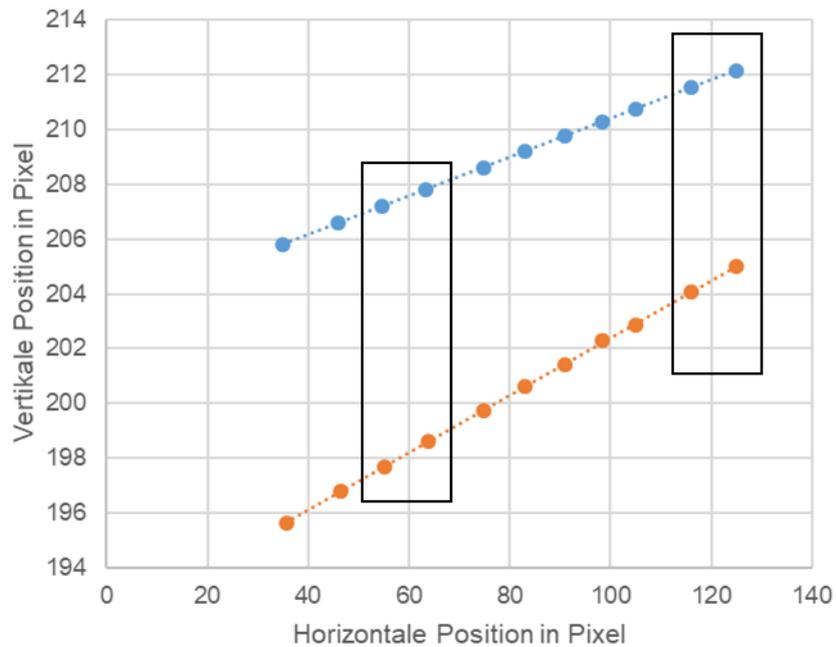


Abbildung 2-32: Interpolation der durch die Sichteinschränkung verdeckten Markereckpunkte: obere Eckpunkte des Markers (blau) und untere Eckpunkte des Markers (orange). Die Interpolierten Punkte sind hervorgehoben.

Mithilfe der interpolierten Markereckpunkte können anschließend die verdeckten Kanten berechnet werden. Das vollständige detektierte Muster ist nachfolgend dargestellt (vgl. Abbildung 2-33).



Abbildung 2-33: Interpolierte Kanten des Schachbretts (gelb)

Abbildung 2-34 zeigt eine Detailaufnahme für die Abweichung der Einblendungsgenauigkeit. Es ist qualitativ erkennbar, dass die Abweichung für Marker 3 geringer ist als für Marker 11, was auf Ungenauigkeit in der Kalibrierung zwischen der Hubmastkamera Mitte und links hinweist.

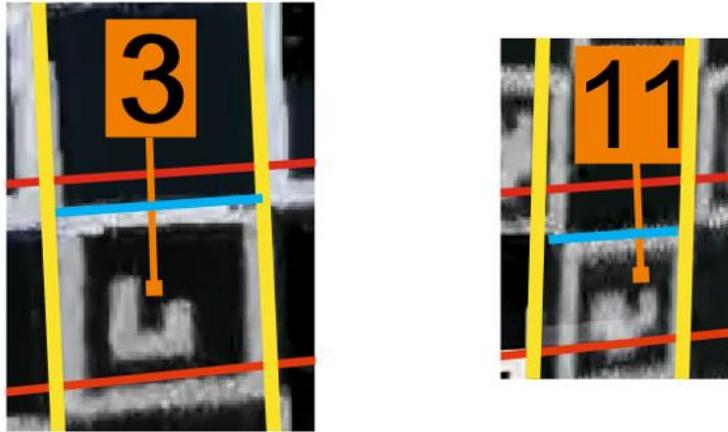


Abbildung 2-34: Detailaufnahme der Einblendungsungenauigkeit: Interpolierte Schachbrettkanten (gelb und rot) und detektierte obere Kante der Einblendung (blau)

### 2.5.3 AP 4.3: Validierung des Gesamtsystems (ITA)

#### Durchgeführte Arbeiten

In diesem AP war ursprünglich vorgesehen die Validierung in einem abgesperrten Bereich eines Logistikzentrums mit den dort beschäftigten Staplerfahrern durchzuführen. Neben Schwächen des Systems, die eine eigenständige Nutzung durch Staplerfahrer verhindert, ließen die anhaltenden Beschränkungen durch die Pandemie eine Vorbereitung und Durchführung der Validierung im Logistikzentrum nicht zu. Deshalb erfolgte die Validierung mit ausgewählten Personen in der Halle des ITA.

#### Erzielte Ergebnisse

Die Validierung wurde nach Funktionen unterteilt. Für die Validierung dieser Teilfunktionen wurden die verschiedenen Visualisierungsoptionen verwendet, um mögliche Fehlerursachen identifizieren zu können. Zunächst wurde die Modellüberlagerung im Stillstand betrachtet, welche in Abbildung 2-35 zu sehen ist. Das Staplermodell wird deckungsgleich auf dem realen Stapler dargestellt. Somit kann diese Teilfunktion als validiert betrachtet werden.



Abbildung 2-35: Videoausschnitte der Modellüberlagerung im Stillstand

Im nächsten Schritt wird das Anheben des Hubmastes im Stillstand betrachtet. (vgl. Abbildung 2-36). Das System zeigt hierbei keine Auffälligkeiten bei der Ausrichtung des Modells mit dem Stapler.

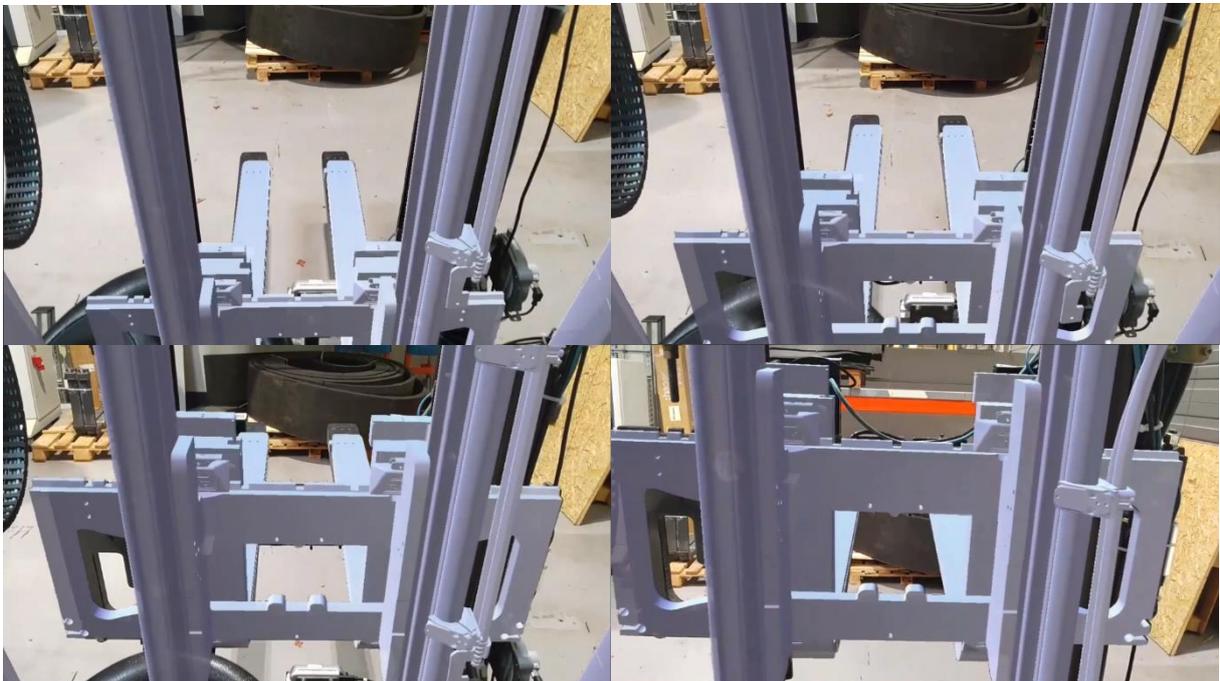


Abbildung 2-36: Videoausschnitte der Modellüberlagerung beim Heben des Hubmastes im Stillstand

Abbildung 2-37 zeigt Videoausschnitte für das Neigen des Hubmastes im Stillstand. Hervorzuheben ist hierbei, dass durch den Aufbau des Staplers, beim Neigen eine Verkippung der

Kabine stattfindet und sich das Flurförderzeug nach vorne bewegt. Die implementierten Algorithmen können diese Einflüsse kompensieren und verschieben das Modell entgegen der auftretenden Verschiebungen, wodurch eine Deckungsgleichheit des Modells garantiert wird. Abbildung 2-38 visualisiert das Ergebnis eines gleichzeitigen Neigens und Senkens des Mastes. Auch hier überlagert das virtuelle Staplermodell den realen Stapler genau.



Abbildung 2-37: Videoausschnitte beim Neigen des Hubmastes im Stillstand

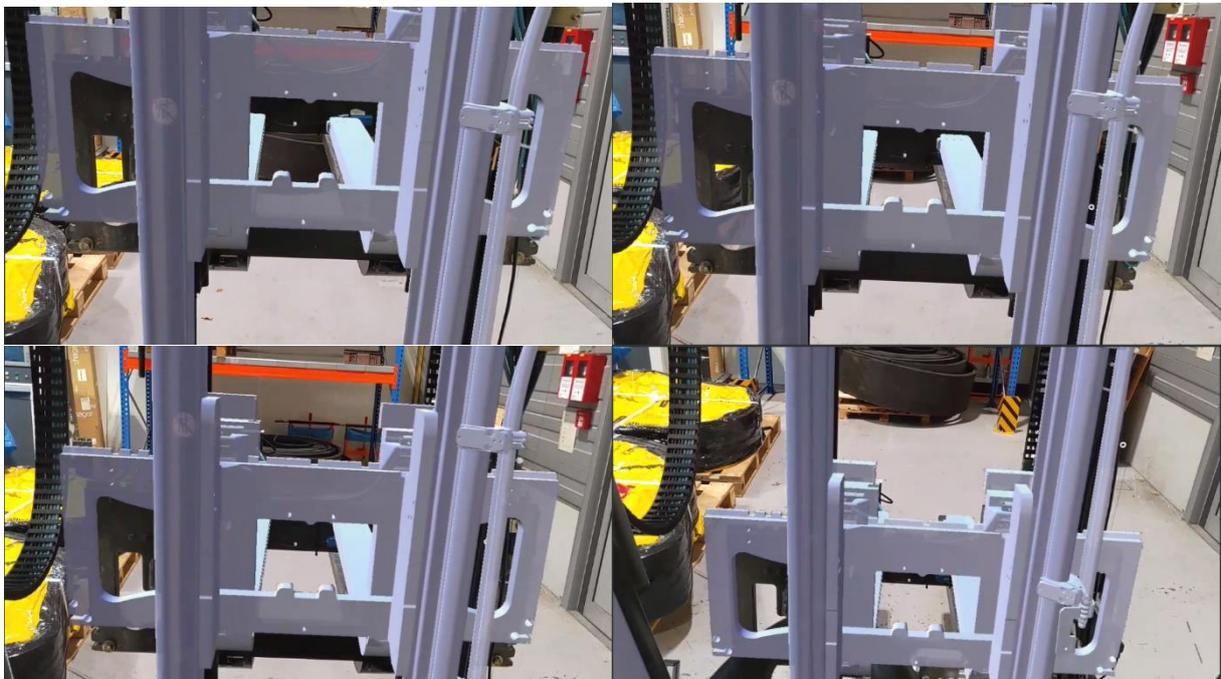


Abbildung 2-38: Videoausschnitte beim gleichzeitigen Neigen und Senken des Hubmastes im Stillstand

Das eingesetzte Bewegungsmodell in Kombination mit den Drehgebern an den Vorderrädern zeigt eine zufriedenstellende Genauigkeit für eine Geradeausfahrt. Während der gesamten Validierungsfahrt konnte eine Überlagerung mit einer gleichmäßigen Abweichung zwischen 3D-Modell und Stapler beobachtet werden (Abbildung 2-39). Die auftretende Abweichung entsteht hierbei in der Initialisierungsphase, wenn die AR-Brille aus der Halterung aufgenommen wird und der Bediener sich diese aufsetzt.



Abbildung 2-39: Videoausschnitte der Modellüberlagerung während einer geraden Fahrt

Ebenfalls konnte die Funktion des Neigens (Abbildung 2-40), des Senkens (Abbildung 2-41) und das gemeinsame Neigen und Senken des Mastes (Abbildung 2-42) in Kombination von einer Geradeausfahrt validiert werden. Während dieser Fahrscenarien bleibt die Modellausrichtung zum Stapler nahezu unverändert.



Abbildung 2-40: Videoausschnitte beim Neigen des Hubmastes während einer geraden Fahrt

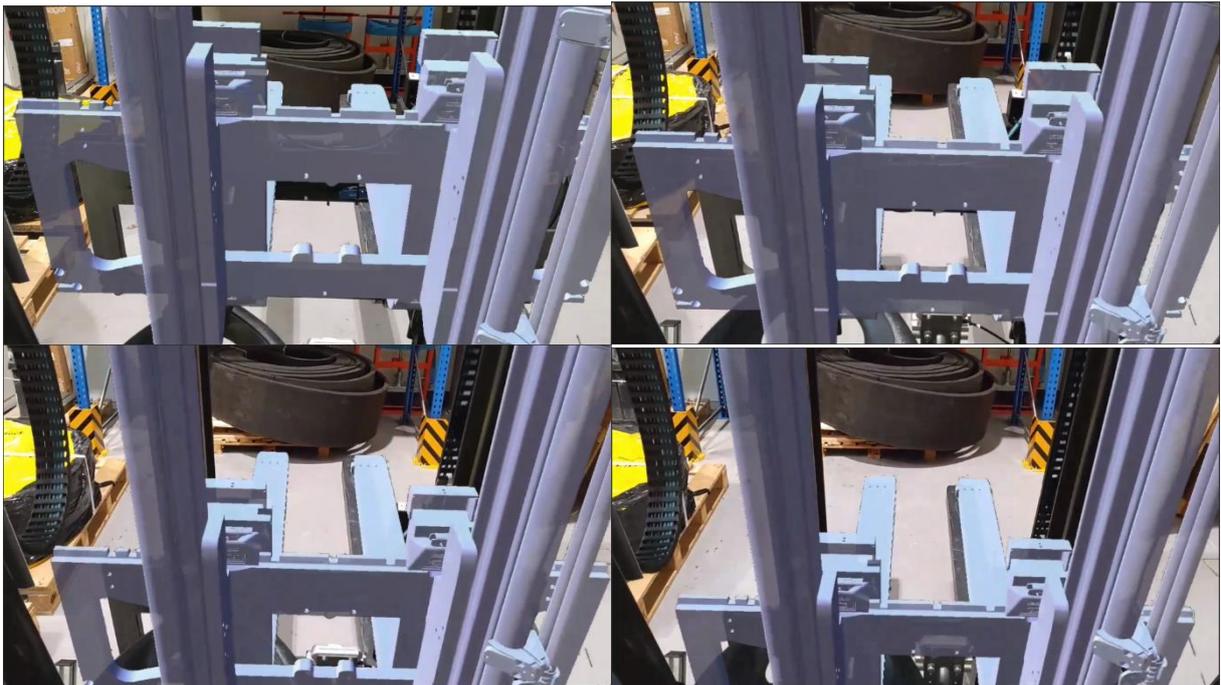


Abbildung 2-41: Videoausschnitte beim Senken des Hubmastes während einer geraden Fahrt

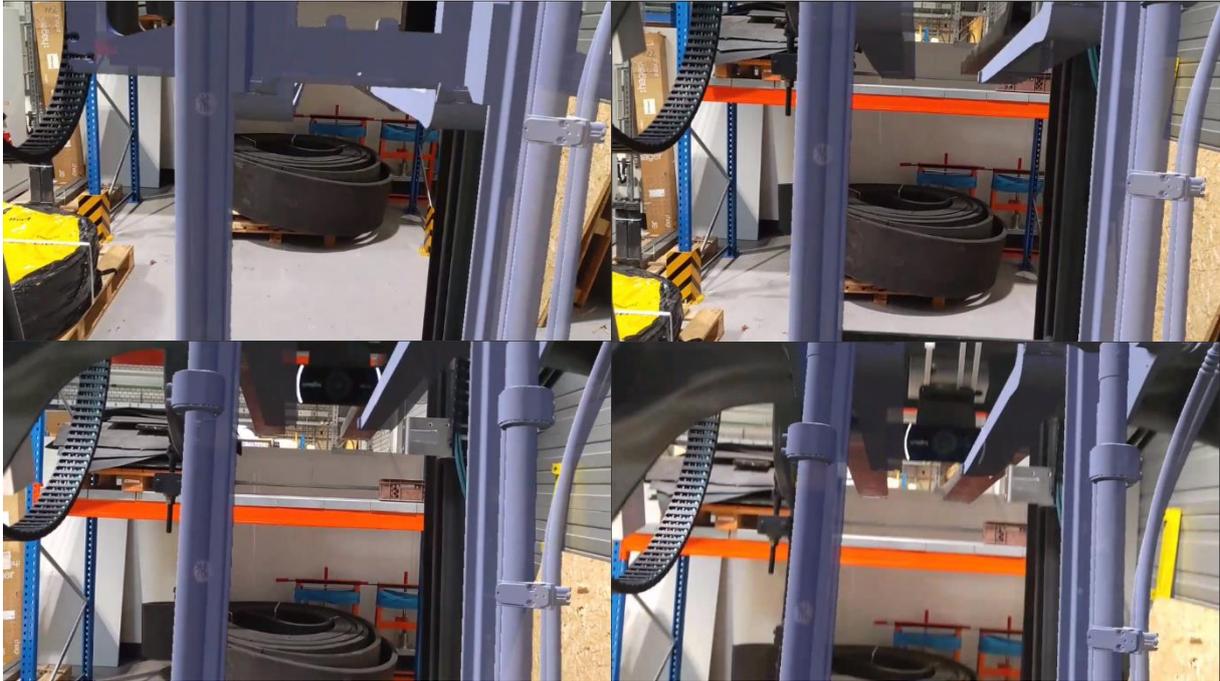


Abbildung 2-42: Videoausschnitte beim Neigen und Heben des Hubmastes während einer geraden Fahrt

Problematisch zeigt sich lediglich eine Kurvenfahrt. Wie in Abbildung 2-43 zu erkennen, führt das Modell eine zu große laterale Bewegung bei einer hier dargestellten Kurvenfahrt um 90° durch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die berechnete Bewegung des Staplers durch das Drehgeber-Skripts und das Tracking der HoloLens 2 nicht übereinstimmen.



Abbildung 2-43: Videoausschnitte bei der Kurvenfahrt

In Abbildung 2-44 bis Abbildung 2-46 wird eine Einblendung der gesamten rekonstruierten Szene für verschiedene Fahrmodi dargestellt. Mithilfe dieser Aufnahmen kann die Einblendungsgenauigkeit der rekonstruierten Szene mit der Realität attestiert werden.



Abbildung 2-44: Videoausschnitte der kompletten Einblendung im Stillstand

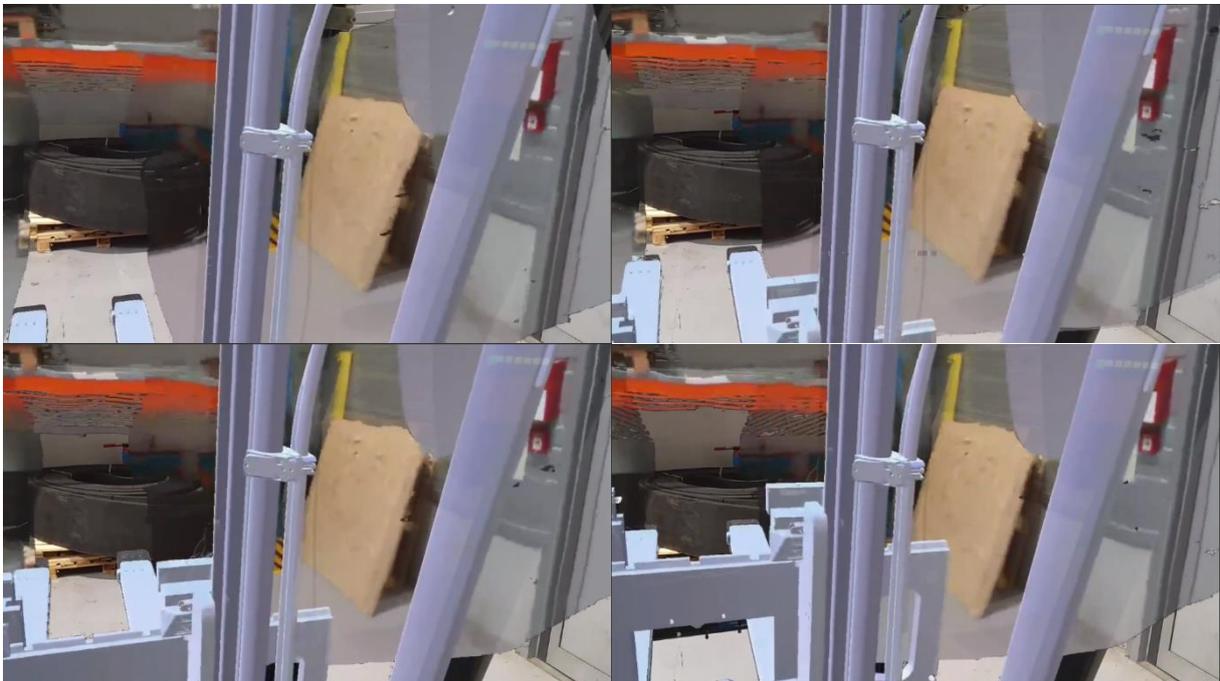


Abbildung 2-45: Videoausschnitte der kompletten Einblendung beim Heben des Hubmastes im Stillstand

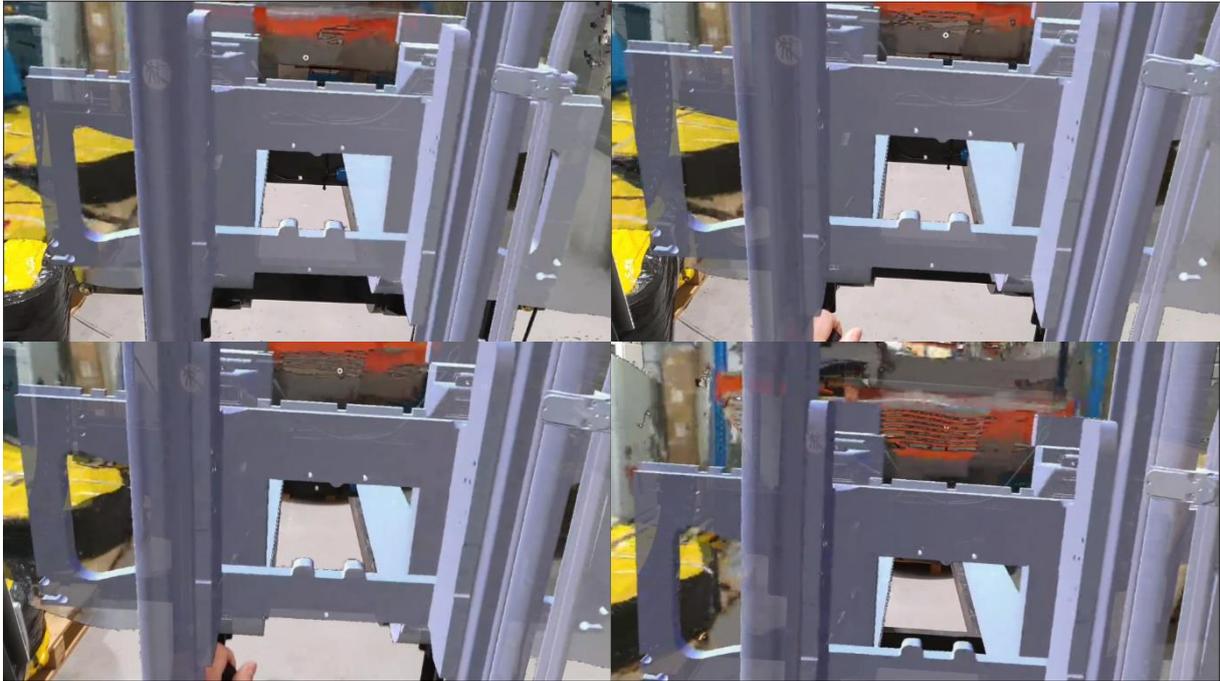


Abbildung 2-46: Videoausschnitte der kompletten Einblendung bei der geraden Fahrt

Abbildung 2-47 zeigt die partielle Einblendung mithilfe des entwickelten Shaders auf den Sichteinschränkungen des FFZ. In Abbildung 2-48 ist diese Visualisierungsmethode für eine Geradeausfahrt dargestellt.

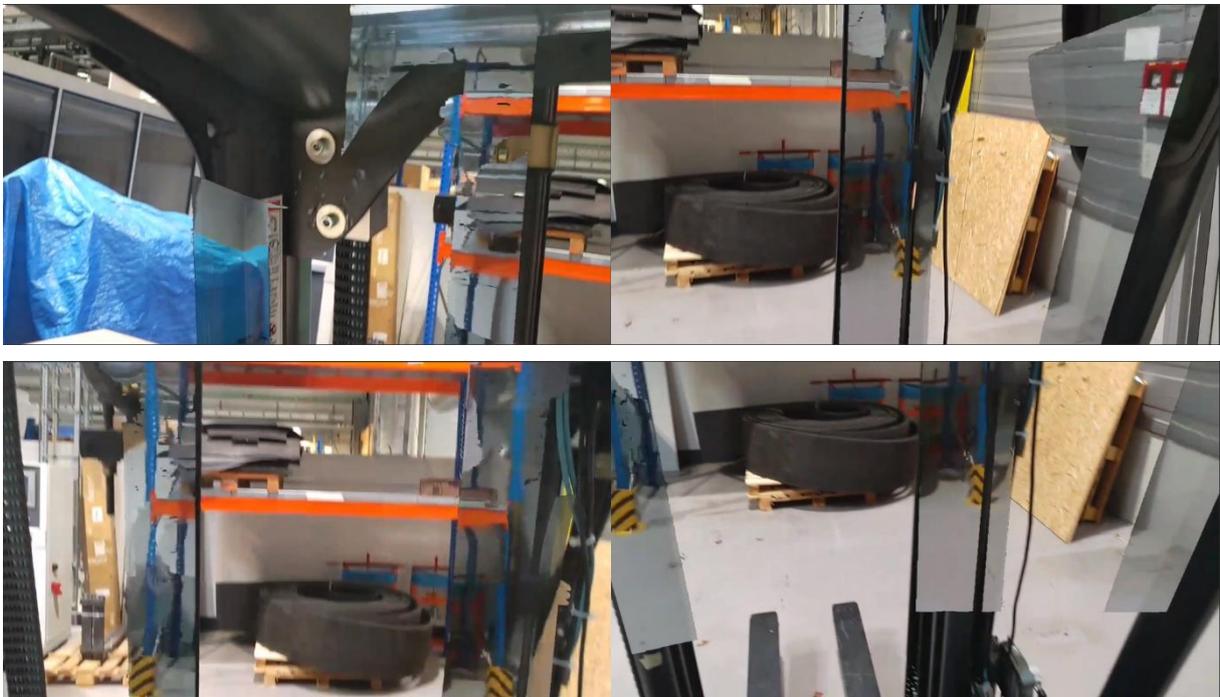


Abbildung 2-47: Videoausschnitte der Einblendung nur auf den Sichteinschränkungen im Stillstand



Abbildung 2-48: Videoausschnitte der Einblendung nur auf den Sichteinschränkungen bei der geraden Fahrt

Anhand dieser Ergebnisse kann die grundsätzliche Eignung eines AR-Systems für die Sichteinschränkungskompensation an Flurförderzeugen bestätigt werden. Für den Fahrer entsteht der Eindruck eines transparenten Hubmastes bzw. einer transparenten A-Säule. Gleichzeitig ist bei freier Sicht weiterhin die reale Umgebung zu sehen.

Im aktuellen Stand des Systems ist aber, u. a. hardwarebedingt kein industrieller Einsatz eines solchen Systems möglich. Neben einer mangelnden Robustheit des Aufbaus liegt die Genauigkeit insbesondere bei längeren und schnellen Bewegungen außerhalb eines akzeptablen Rahmens. Zudem sind die Latenzen für ein sicherheitskritisches Assistenzsystem deutlich zu hoch, wie in Abbildung 2-49 dargestellt. Die Messungen wurden durchgeführt, indem Videos mit variierender Anzahl zugeschalteter Kameras mit der internen Kamera der HoloLens 2 aufgenommen wurden. Mit den RGB-D-Kameras wurde ein Bildschirm mit einer Stoppuhr abgebildet, sodass im Video der HoloLens dieser Bildschirm sowie ein Hologramm mit dieser Stoppuhr zu sehen ist. Die Latenz wurde als Differenz der Stoppuhrwerte aufgenommen. Der Mittelwert der erreichten Latenz lag für eine Kamera bei ca. 310 ms, für zwei Kameras bei ca. 390 ms, für vier Kameras bei ca. 590 ms und für vier Kameras bei ca. 750 ms.

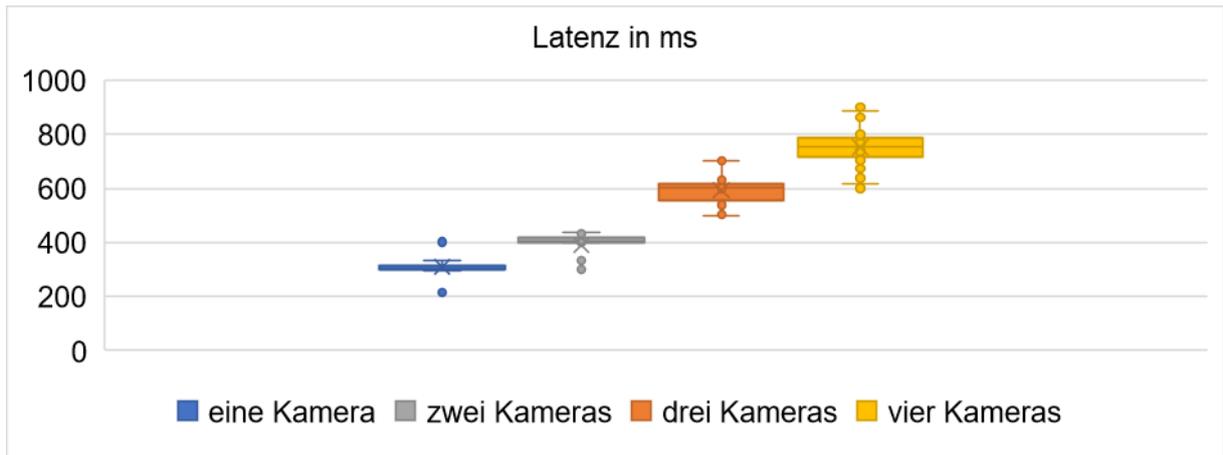


Abbildung 2-49: Latenz des Gesamtsystems in Abhängigkeit der aktiven Kameras

### 3 Verwendung der Zuwendung

#### 3.1 Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA)

Die Verwendung der Zuwendungen (Personenmonate) des ITA wird in Tabelle 2 dargestellt. Ein wissenschaftlicher Mitarbeiter des ITA war im Umfang von 24 Personenmonaten für die Projektbearbeitung verantwortlich. Im AP 3 wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter von einem technischen Mitarbeiter in einem Umfang von zwei Monaten bei den Arbeiten zur Realisierung der Kamerasysteme für die Umgebungsaufnahme unterstützt. Während der Projektlaufzeit wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter durch studentische Hilfskräfte unterstützt.

Im Projekt wurde vom ITA ein Kameraset für 3.745 € netto beschafft. Das Kameraset dient der Umgebungsaufnahme am Demonstrator.

Tabelle 2: Verwendung der Zuwendung (ITA)

Arbeitspaket	Mitarbeiter	Personal (Personenmonate)
1.1	Wiss. Mitarbeiter	0
	Technischer Mitarbeiter	0
1.2	Wiss. Mitarbeiter	1
	Technischer Mitarbeiter	0
1.3	Wiss. Mitarbeiter	0
	Technischer Mitarbeiter	0
2.1	Wiss. Mitarbeiter	4
	Technischer Mitarbeiter	0
2.2	Wiss. Mitarbeiter	0
	Technischer Mitarbeiter	0
2.3	Wiss. Mitarbeiter	3
	Technischer Mitarbeiter	0
3.1	Wiss. Mitarbeiter	2
	Technischer Mitarbeiter	0
3.2	Wiss. Mitarbeiter	3
	Technischer Mitarbeiter	0
3.3	Wiss. Mitarbeiter	0
	Technischer Mitarbeiter	0
3.4	Wiss. Mitarbeiter	2
	Technischer Mitarbeiter	0
3.5	Wiss. Mitarbeiter	3
	Technischer Mitarbeiter	2
4.1	Wiss. Mitarbeiter	0
	Technischer Mitarbeiter	0

4.2	Wiss. Mitarbeiter	2
	Technischer Mitarbeiter	0
4.3	Wiss. Mitarbeiter	3
	Technischer Mitarbeiter	0
5	Wiss. Mitarbeiter	1
	Technischer Mitarbeiter	0
Summe	Wiss. Mitarbeiter	24
	Technischer Mitarbeiter	2

### 3.2 Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH (IPH)

Die Verwendung der Zuwendungen (Personenmonate) des IPH wird in Tabelle 3 dargestellt. Ein wissenschaftlicher Mitarbeiter des IPH war im Umfang von 21 Personenmonaten für die Projektbearbeitung verantwortlich. Im AP 2.2 wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter von einem technischen Mitarbeiter in einem Umfang von drei Monaten bei den Arbeiten zur Konzeptionierung der Blickrichtungserfassung unterstützt. Im AP 3.3 wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter von einem technischen Mitarbeiter in einem Umfang von drei Monaten bei den Arbeiten zur Implementierung Blickrichtungserfassung unterstützt. Während der Projektlaufzeit wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter durch studentische Hilfskräfte unterstützt.

Im Projekt wurde ein Set Datenbrillen (im Einzelfinanzierungsplan als „Set Datenbrille“ bezeichnet) für 2.790,00 € netto sowie eine Microsoft HoloLens 2 (im Einzelfinanzierungsplan als „HoloLens Commercial Suite“ bezeichnet) für 3.350,00 € netto beschafft. Beide Beschaffungen dienen der Anzeige der Bilddaten für den Bediener.

Tabelle 3: Verwendung der Zuwendung (IPH)

Arbeitspaket	Mitarbeiter	Personal (Personenmonate)
1.1	Wiss. Mitarbeiter	1
	Technischer Mitarbeiter	0
1.2	Wiss. Mitarbeiter	1
	Technischer Mitarbeiter	0
1.3	Wiss. Mitarbeiter	1
	Technischer Mitarbeiter	0
2.1	Wiss. Mitarbeiter	1
	Technischer Mitarbeiter	0
2.2	Wiss. Mitarbeiter	4
	Technischer Mitarbeiter	3
2.3	Wiss. Mitarbeiter	0
	Technischer Mitarbeiter	0
3.1	Wiss. Mitarbeiter	0

	Technischer Mitarbeiter	0
3.2	Wiss. Mitarbeiter	0
	Technischer Mitarbeiter	0
3.3	Wiss. Mitarbeiter	3
	Technischer Mitarbeiter	3
3.4	Wiss. Mitarbeiter	0
	Technischer Mitarbeiter	0
3.5	Wiss. Mitarbeiter	3
	Technischer Mitarbeiter	0
4.1	Wiss. Mitarbeiter	2
	Technischer Mitarbeiter	0
4.2	Wiss. Mitarbeiter	1
	Technischer Mitarbeiter	0
4.3	Wiss. Mitarbeiter	2
	Technischer Mitarbeiter	0
5	Wiss. Mitarbeiter	2
	Technischer Mitarbeiter	0
Summe	Wiss. Mitarbeiter	21
	Technischer Mitarbeiter	6

#### **4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die in den Haushaltsjahren 2019, 2020 und 2021 durchgeführten Arbeiten entsprechen dem in Abstimmung mit dem PA angepassten Arbeitsplan und waren für die Erreichung der im Projekt angestrebten Ziele notwendig und angemessen.

Aufgrund erschwerter Personalakquise konnte das Projekt erst verspätet gestartet werden. Zudem kam es zu nicht eingeplanten Hürden bei der Hardwarebeschaffung und -bereitstellung, sodass das Projekt kostenneutral um 6 Monate verlängert wurde.

Das ITA nahm eine Aufstockung der PM in der Personalkategorie HPA-A von 21 auf 24 PM vor und das IPH eine Aufstockung der PM in der Personalkategorie HPA-A von 17 auf 21 PM. Die Aufstockungen gewährleisteten in der kostenneutralen Verlängerung die adäquate Abarbeitung der durch die Anpassungen des Arbeitsplans zusätzlich entstandenen Tätigkeiten. Eine Überschreitung des Projektbudgets entstand dadurch nicht.

## **5 Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen**

### **5.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse**

Die Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses waren bei der Entwicklung des Demonstrators eng eingebunden und konnten diesen zum Teil bereits testen. Die Demonstration für alle beteiligten Unternehmen musste aufgrund des digitalen Abschlusstreffens verschoben werden und findet erst nach Abschluss des Projekts statt. Der Demonstrator verdeutlicht einen möglichen Einsatz von AR in der Logistik und wurde von Staplerherstellern und Anbaugeräteherstellern als Showcase gesehen.

Die Ergebnisse des Projektes sind aufgrund der fehlenden Marktreife noch nicht für einen industriellen Einsatz geeignet. Die am Markt verfügbare Hardware (AR-Brille und RGB-D-Kameras) müsste nach Aussage der beteiligten Unternehmen noch eine gewaltige Entwicklung vornehmen, um für den Anwendungsfall industriell eingesetzt werden zu können. Ein beteiligtes Logistikunternehmen stellte aber klar, dass der Demonstrator die Eignung der Grundidee für Logistikunternehmen zeigt. Dem Geschäftsführer wäre ein solches System mehrere tausend Euro wert, da das Unfallrisiko und damit verbundene Kosten minimiert werden könnten.

Der Austausch mit Sensorherstellern zeigte, dass diese daran interessiert sind ihre Produkte in ein solches System zu integrieren. Hierfür ist im Hinblick auf die Kameratechnik insbesondere eine Erhöhung der Robustheit notwendig. Aber auch Sicherheitssensorik könnte zusätzlich zu der direkten Einblendung integriert werden, um Fahrer über das AR-Gerät vor Kollisionen zu warnen.

### **5.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit von KMU**

Auf Pressemitteilungen und Veröffentlichungen zum Projekt gab es eine Vielzahl von Anfragen aus verschiedenen Branchen. Den Großteil davon machten Logistikbetriebe bzw. Logistikabteilungen aus, die jedoch nur zu einem kleinen Teil auch im Projektbegleitenden Ausschuss mitwirkten. Hierfür war ausschlaggebend, dass diese in der Regel eine marktreife Lösung kaufen wollten. Diese Resonanz zeigt jedoch, dass für ein weiterentwickeltes System große Marktrelevanz bei Logistikunternehmen besteht. Im Falle der Marktreife erhalten Staplerfahrer ein intuitives System, mit denen sie in engen Bereichen und insbesondere bei der Ein- und Auslagerung sicher arbeiten können. So können Unfallschäden minimiert werden. Da vergleichbare Sichteinschränkungen auch in anderen Bereichen zu finden sind, lassen sich die Forschungsergebnisse beispielsweise auch auf Bagger, Krane, Schiffe, Flugzeuge und Straßenfahrzeuge übertragen.

Unter den deutschen Anbaugeräteherstellern herrscht großer Innovationsdruck. Im Rahmen des Projekts konnten verschiedene Hard- und Softwarekomponenten in der Anwendung am Stapler hinsichtlich ihrer Eignung untersucht werden. Die KMU welche im Projektbegleitenden Ausschuss mitwirkten konnten im direkten Austausch an den Auswahlprozessen mitwirken und haben so ihre Expertise bspw. in der Verwendung digitaler Kameratechnik erhöht. Sie können zudem besser einschätzen, welche Entwicklungen bei Hardwarekomponenten notwendig wären, um ein solches System umzusetzen. Durch die verbesserte Übersicht über die Fahrzeugumgebung würden zukünftig konstruktive Lösungen für Hubvorrichtungen und Ladehilfsmittel ermöglicht, die bislang aufgrund der zu stark eingeschränkten Sicht nicht einsetzbar waren.

Grundsätzlich konnte anhand des Forschungsprojekts gezeigt werden, dass Sichteinschränkungen im Flurförderzeug mit Hilfe einer AR-Brille kompensiert werden können. Dabei können sowohl feste Hindernisse als auch bewegliche Güter überlagert werden.

## 6 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Erste Schritte zum Ergebnistransfer sind während der Projektlaufzeit durchgeführt worden. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Über den Austausch zwischen den Forschungsstellen und den Unternehmen des PA sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein erster Wissenstransfer stattgefunden.

### 6.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen

In Tabelle 4 sind die durchgeführten Transfermaßnahmen in die Wirtschaft dargestellt.

Tabelle 4: Durchgeführte spezifische Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Durchgeführte spezifische Maßnahmen	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Informationen der am PA beteiligten Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Fortschrittsbericht, Diskussion, Festlegungen, Abstimmung, Erfahrungsaustausch im PA	1. PA-Treffen 2. PA-Treffen 3. PA-Treffen 4. PA-Treffen	27.08.2019 23.04.2020 11.11.2020 16.11.2021
Publikationen der Projektergebnisse im Internet	Informationstransfer und Austausch mit Interessenten aus Industrie und Wissenschaft	Projekthomepage ( <a href="http://www.visier.iph-hannover.de">www.visier.iph-hannover.de</a> & <a href="http://www.ita.uni-hannover.de/de/forschung/aktuelle-projekte/aktuelle-forschungsprojekte-de-tailansicht/projects/visier/">www.ita.uni-hannover.de/de/forschung/aktuelle-projekte/aktuelle-forschungsprojekte-de-tailansicht/projects/visier/</a> ) IPH-Pressemitteilung phi – Produktionstechnik Hannover informiert [14] Durch die IFL: ▪ <a href="http://www.ifl-forschung.de">www.ifl-forschung.de</a>	01.08.2019  16.08.2019 Juni 2021
Wissenschaftliche Publikationen / Dissertation, in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Nationaler Ergebnistransfer	Publikationen in: ▪ f+h Fördern und Heben [15] ▪ Logistics Journal [16] ▪ Logistics Journal [17]	Publikationen in: Juni 2020  Oktober 2020 Dezember 2021

Durchgeführte spezifische Maßnahmen	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Präsentationen und Ausstellung auf Konferenzen, Tagungen & Messen	Nationaler Ergebnistransfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ WGTI-Kolloquium</li> <li>▪ WGTI-Kolloquium</li> <li>▪ IFL-Sitzung</li> </ul>	01./02.10.2020 20./21.09.2021 03.02.2021
	Internationaler Ergebnistransfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Automated System and Technologies Symposium</li> <li>▪ GTC 2021</li> <li>▪ CPS&amp;C – Cyber Physical Systems and Control</li> </ul>	08.12.2020 12.-16.04.2021 29.06.- 02.07.2021

<p>Einbindung der Forschungsergebnisse in Ausbildung und Lehre</p>	<p>Ergebnistransfer während der studentischen Ausbildung</p>	<p>Studien- und Abschlussarbeiten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bachelorarbeit: <i>Systematische Analyse von Systemen für die kamerabasierte Szenenrekonstruktion im industriellen Umfeld</i> [18]</li> <li>• Bachelorarbeit: <i>Untersuchung der Nvidia Isaac Programmbibliothek für den Einsatz in einem kamerabasierten Assistenzsystem für Flurförderzeuge</i> [19]</li> <li>• Bachelorarbeit: <i>Auswahl und Charakterisierung einer RGB-D-Kamera für die Umgebungsaufnahme an Flurförderzeugen</i> [20]</li> <li>• Bachelorarbeit: <i>Design and Implementation of an Analysis Software for the Eye and Head Tracking of Forklift Truck Operators</i> [21]</li> <li>• Bachelorarbeit: <i>Kamera-basierte Positionsbestimmung mittels April Tags</i> [22]</li> <li>• Studienarbeit: <i>Entwicklung eines Bildverarbeitungsalgorithmus zur Kalibrierung eines Multi-Kamera-Systems für die 3D Umgebungsrekonstruktion an Flurförderzeugen</i> [23]</li> <li>• Studienarbeit: <i>Entwicklung eines Bildverarbeitungsalgorithmus zur Kompensation von Sichteinschränkungen auf Grundlage von Augmented Reality</i> [24]</li> <li>• Studienarbeit: <i>Positionsgenaue Visualisierung von Bilddaten auf einem Augmented Reality System</i> [25]</li> <li>• Masterarbeit: <i>Entwurf und softwareseitige Umsetzung einer Methodik zur Kompensation von Sichteinschränkungen</i></li> </ul>	<p>kontinuierlich</p>
--	--	---	-----------------------

Durchgeführte spezifische Maßnahmen	Ziel	Rahmen	Zeitraum
		<p>auf Grundlage von <i>Augmented Reality an Flurförderzeugen</i> [26]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Masterarbeit: <i>Einsatz von RGB-D Kameras für die dynamische 3D Umgebungsrekonstruktion und zur Sichteinschränkungskompensation an Flurförderzeugen</i> [27]</li> <li>• Masterarbeit: <i>Design and Software Implementation of a Methodology for the Localization of RGB-D Cameras on an Industrial Trucks</i> [28]</li> <li>• Masterarbeit: <i>3D Umgebungsrekonstruktion an Flurförderzeugen unter Verwendung von RGB-D Kameras und dezentralen Recheneinheiten</i> [29]</li> <li>• Masterarbeit: <i>Design and Implementation of a Methodoly for Real-time Rendering of Point Clouds</i> [30]</li> <li>• Masterarbeit: <i>Aufbau des Datenaustauschs mit einer Microsoft HoloLens 2</i> [31]</li> <li>• Masterarbeit: <i>Identifikation von Sichteinschränkungen auf Basis der Multi Class Segmentation</i> [32]</li> <li>• Masterarbeit: <i>Positionsbestimmung einer AR-Brille auf Basis von Kameradaten</i> [33]</li> </ul>	

## 6.2 Geplante Transfermaßnahmen

In Tabelle 5 sind die geplanten Transfermaßnahmen in die Wirtschaft dargestellt.

Tabelle 5: Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Informationen der am PA beteiligten Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft,	Vorstellung des Demonstrators im ITA	Q1/Q2 2022
Kontaktaufnahme zu potentiell interessierten Unternehmen	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Vorstellung der Projektergebnisse bei gemeinsamen Treffen mit interessierten Unternehmen	Kontinuierlich und auf Anfrage
Integration in die Schulungen des: Mittelstand Digital Zentrums	Wissenstransfer an KMU	Mittelstand-Digital Zentrum Hannover	10.02.2022 und fortlaufend
Wissenschaftliche Publikationen / Dissertation, in Fachzeitschriften oder sonstigen gedruckten Veröffentlichungen	Nationaler Ergebnistransfer	Publikationen in: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ti-Magazin</li> </ul>	Sommer 2022
	Internationaler Ergebnistransfer	Publikationen in: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cyber-Physical Systems and Control, Conference Proceedings</li> <li>▪ Virtual Reality</li> </ul>	Frühjahr 2022  Sommer 2022
	Verbreitung Projektergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Veröffentlichung des Schlussberichts auf Homepage der IFL</li> <li>▪ Veröffentlichung über den PZH-Verlag</li> </ul>	Frühjahr 2022
	Wissenschaftliche Qualifikation der Bearbeiter des Vorhabens	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zwei Dissertationen</li> </ul>	2023
Präsentationen und Ausstellung auf Konferenzen, Tagungen & Messen	Nationaler Ergebnistransfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ öffentliche Veranstaltungen der LUH (Nacht der Wissenschaft, Tag des Maschinenbaus)</li> <li>▪ IFL-Sitzungen</li> </ul>	Winter 2022  Nach Bedarf
	Internationaler Ergebnistransfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)</li> <li>▪ SPIE: Optics and Photonics</li> </ul>	Herbst 2022  Sommer 2022

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Einbindung der Forschungsergebnisse in Ausbildung und Lehre	Ergebnistransfer während der studentischen Ausbildung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ LUH-Vorlesungen (Transporttechnik, Intra-logistik, kognitive Logistik)</li> <li>▪ Seminare</li> </ul>	Kontinuierlich
Beratung	Nutzung der Ergebnisse für Transferprojekte	Beratungsangebote von IPH und ITA an interessierte KMU	Auf Anfrage

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] BGHM-Arbeitsschutzvideo: "Top-Sicht: Was der Staplerfahrer sieht". <http://www.bghm.de/arbeitsschuetzer/filme/unterweisung.html>, abgerufen am 10.01.2017
- [2] Vetter Industrie GmbH: SMARTFORK® – Die intelligente Sicherheitsgabel; Produktbroschüre. <http://www.gabelzinken.de/>; abgerufen am 10.01.2017
- [3] Stein, M. v.: Einsatz der Augmented-Reality-Technologie zur Unterstützung des Fahrers von Flurförderzeugen. Schlussbericht, Technische Universität München, Garching, 2015, IGF-Forschungsvorhaben 446 ZN/1
- [4] Kleinert, S.: Einsatz skalenübergreifender Time-of-Flight-Aufnahmen für Assistenzsysteme in Flurförderzeugen. TEWISS Verlag 2018, ISBN 978-3-95900-233-2
- [5] Dudek, G.; Jenkin, M.: Computational principles of mobile robotics. Cambridge university press, 2010.
- [6] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000, 22. Jg., Nr. 11, S. 1330-1333
- [7] Li, Bo, et al.: A multiple-camera system calibration toolbox using a feature descriptor-based calibration pattern. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013. S. 1301-1307
- [8] Rehder, J.; Nikolic, J.; Schneider, T.; Hinzmann, T.; Siegwart, R.: Extending kalibr: Calibrating the extrinsics of multiple IMUs and of individual axes. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020. S. 4304-4311, Stockholm, Sweden
- [9] Furgale, F.; Rehder, J.; Siegwart, R.: Unified Temporal and Spatial Calibration for Multi-Sensor Systems. In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013. Tokyo, Japan
- [10] Furgale, P.; Barfoot, T. D.; Sibley, G.: Continuous-Time Batch Estimation Using Temporal Basis Functions. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2012. S. 2088–2095, St. Paul, MN
- [11] Maye, J.; Furgale, P.; Siegwart, R.: Self-supervised Calibration for Robotic Systems, In Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IVS), 2013.
- [12] Oth, L.; Furgale, P.; Kneip, L.; Siegwart, R.: Rolling Shutter Camera Calibration, In Proc. of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013.

- [13] Bouget, J.-Y.: Camera calibration toolbox for matlab. [http://www.vision.caltech.edu/bougetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bougetj/calib_doc/index.html), 2004.
- [14] Jütte, L.; Poschke, A.: Einschränkungsfreie Sicht im Gabelstapler. In: phi – Produktionstechnik Hannover informiert, Newsletter Nr. 31 / Juni 2021, ISSN: 2198-1922.
- [15] Poschke, A.; Jütte, L.; Overmeyer, L.: Sichtverbesserung an Flurförderzeugen mithilfe Erweiterter Realität. In: f+h, Vereinigte Fachverlage GmbH, 70. Jg. (2020), H. 6., S. 22-23. ISSN: 0341-2636.
- [16] Jütte L., Poschke A., Overmeyer L.: Kompensation von Sichteinschränkungen an Flurförderzeugen. In: Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2020. ISSN: 2192-9084
- [17] Poschke, A.; Jütte, L.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Augmented Reality basierte Überlagerung von Sichteinschränkungen an Flurförderzeugen. Logistics Journal: Proceedings, Vol. 2021. (DOI: 10.2195/lj\_Proc\_poschke\_de\_202112\_01)
- [18] Kaouich, I.: Systematische Analyse von Systemen für die kamerabasierte Szenenrekonstruktion im industriellen Umfeld, Bachelorarbeit
- [19] Rudolph, B.: Untersuchung der Nvidia Isaac Programmbibliothek für den Einsatz in einem kamerabasierten Assistenzsystem für Flurförderzeuge, Bachelorarbeit
- [20] Meyer, L.: Auswahl und Charakterisierung einer RGB-D-Kamera für die Umgebungsaufnahme an Flurförderzeugen, Bachelorarbeit
- [21] Mansour, T.: Design and Implementation of an Analysis Software for the Eye and Head Tracking of Forklift Truck Operators, Bachelorarbeit
- [22] Özkan, H.: Kamerabasierte Positionsbestimmung mittels April Tags, Bachelorarbeit
- [23] Jablonski, F.: Entwicklung eines Bildverarbeitungsalgorithmus zur Kalibrierung eines Multi-Kamera-Systems für die 3D Umgebungsrekonstruktion an Flurförderzeugen, Studienarbeit
- [24] Fehsenfeld, J.: Entwicklung eines Bildverarbeitungsalgorithmus zur Kompensation von Sichteinschränkungen auf Grundlage von Augmented Reality, Studienarbeit
- [25] Kluge, N.: Positionsgenaue Visualisierung von Bilddaten auf einem Augmented Reality System, Studienarbeit
- [26] Moshref, F.: Entwurf und softwareseitige Umsetzung einer Methodik zur Kompensation von Sichteinschränkungen auf Grundlage von Augmented Reality an Flurförderzeugen, Masterarbeit

- [27] Fehsenfeld, J.: Einsatz von RGB-D Kameras für die dynamische 3D Umgebungsrekonstruktion und zur Sichteinschränkungskompensation an Flurförderzeugen, Masterarbeit
- [28] Li, K.: Design and Software Implementation of a Methodology for the Localization of RGB-D Cameras on an Industrial Truck, Masterarbeit
- [29] Liu, K.: 3D Umgebungsrekonstruktion an Flurförderzeugen unter Verwendung von RGB D Kameras und dezentralen Recheneinheiten, Masterarbeit
- [30] Yang, S.: Design and Implementation of a Methodoly for Real-time Rendering of Point Clouds, Masterarbeit
- [31] Yang, H.: Aufbau des Datenaustauschs mit einer Microsoft HoloLens 2, Masterarbeit
- [32] Eryurt, C.: Identifikation von Sichteinschränkungen auf Basis der Multi Class Segmentation, Masterarbeit
- [33] Putter, R.: Positionsbestimmung einer AR-Brille auf Basis von Kameradaten, Masterarbeit