

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18616 N

Thema

Tiefenbildgestützte Lokalisierung von fahrerlosen Transportsystemen und Kommunikation
basierte Identifizierung (Blackboard-Lokalisierung)

Berichtszeitraum

1.1.2017 bis 31.12.2018

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.


Forschungseinrichtung(en)

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie

[Karlsruhe, 03.05.2019]

Ort, Datum

Maximilian Hochstein



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

Gefördert durch:

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	3
2 Arbeitspaketübersicht und Zeitplan	5
3 Darstellung der erzielten Projektergebnisse	6
3.1. Arbeitspaket 1 – Erstellen eines Grobkonzeptes	6
3.2. Arbeitspaket 2 – Aufbau eines Testszenarios.....	8
3.3. Arbeitspaket 3 – Entwicklung der Fahrzeugerkennung	9
3.4. Arbeitspaket 4 – Entwicklung des Blackboards	12
3.5. Arbeitspaket 5 – Entwicklung der Navigationsalgorithmen	13
3.6. Arbeitspaket 6 – Test des Gesamtsystems.....	17
3.7. Arbeitspaket 7 – Veröffentlichung und Dokumentation	20
4 Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen	21
5 Verwendung der Zuwendung	23
6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	24
7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	25
8 Durchführende Forschungsstelle	28

1 Zusammenfassung

Im Bereich der Intralogistik werden seit Jahrzehnten Materialflusssysteme für den innerbetrieblichen Transport von Waren eingesetzt. Seit einiger Zeit zeichnet sich jedoch ein Wandel ab. Immer kürzer werdende Produktlebenszyklen, kürzere Wartezeiten und eine größer werdende Vielzahl an individualisierten Produkten stellen die Unternehmen vor neue Herausforderungen. Diesem Wandel müssen sich auch heutige Materialfluss- und Produktionssysteme anpassen. Wandlungsfähige Systeme, mit denen schnell auf sich ändernde Bedingungen reagiert werden kann, sind zum Teil schon auf dem Markt erhältlich. Trotzdem müssen diese noch deutlich flexibler werden, um auch mit zukünftigen Anforderungen Schritt halten zu können.



Abbildung 1: Gesamtsystem bestehend aus der externen Lokalisierungseinheit, einer optischen Spurführung und fahrerlosen Transportfahrzeugen.

Einen wichtigen Prozess im innerbetrieblichen Materialfluss stellt der Transport von Ladungsträgern dar. Um die Flexibilität zu erhöhen werden bereits seit einigen Jahren fahrerlose Transportsysteme (FTS) im Warentransport eingesetzt. Doch diese sind entweder preisgünstig und unflexibel oder aber hochflexibel und kostenintensiv. Auf

Grund der hohen Kosten für ein solches, wandlungsfähiges System, ist es gerade für kleine und mittelständische Unternehmen sehr schwierig mit dieser Entwicklung Schritt zu halten.

Im Laufe des Projektes konnte ein Lokalisierungssystem entwickelt, erforscht, implementiert und getestet werden, mit dessen Hilfe einfache spurgeführte fahrerlose Transportfahrzeuge lokal hochflexibel navigieren können. Dies erfolgt unter Verwendung eines externen, einfach zu installierenden Sensorsystems, ohne dass die Fahrzeuge mit einer zusätzlichen, kostspieligen Sensorik ausgestattet werden müssen. Des Weiteren können die Fahrzeuge auf Basis eines probabilistischen Ausschlussverfahrens identifiziert und analysiert werden. Unter Verwendung der Kommunikationsschnittstelle, Blackboard, verfügt das jeweilige Fahrzeug nicht nur über Informationen bzgl. seiner eigenen aktuellen Position, sondern auch über die Positionen, die Formen und die Bewegungsrichtungen der anderen Objekte im überwachten Bereich. Mit Hilfe dieser Informationen ist ein Fahrzeug in der Lage frei zu navigieren, ohne mit anderen Objekten zu kollidieren.

2 Arbeitspaketübersicht und Zeitplan

Zu Beginn eine Übersicht, über die beantragten Arbeitspakete und den dazugehörigen Arbeitsplan.

APs	Aufwand
AP 1: Erstellen eines Grobkonzeptes Kamera-, Schnittstellen-, Fahrzeugwahl	1 MM
AP 2: Aufbau eines Testszenarios Kreuzung mit Hindernissen	4,5 MM
AP 3: Entwicklung der Fahrzeugerkennung Entwicklung und Implementierung eigener Objekterkennungsalgorithmen	8 MM
AP 4: Entwicklung des Blackboards Implementierung einer Kommunikationsschnittstelle	4 MM
AP 5: Entwicklung der Navigationsalgorithmen Reaktive Wegfindung unter Berücksichtigung von Hindernissen und anderen Fahrzeugen	2,5 MM
AP 6: Test des Gesamtsystems	2,5 MM
AP 7: Veröffentlichung und Dokumentation	1,5 MM
Summe	24 MM

Die blau hinterlegten Felder stellen den abgeschlossenen Fortschritt in den einzelnen Arbeitspaketen dar.

Arbeitsplan

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
AP 1																									
AP 2																									
AP 3																									
AP 4																									
AP 5																									
AP 6																									
AP 7																									

3 Darstellung der erzielten Projektergebnisse

3.1.Arbeitspaket 1 – Erstellen eines Grobkonzeptes

Durchgeführte Arbeiten

Mit dem Ziel möglichst schnell einen Versuchsstand aufbauen zu können wurden mehrere Kamerasysteme miteinander verglichen und untersucht, um schnellst möglich Tiefeninformationen für die weitere Verarbeitung zu erhalten. Zu Beginn wurden Tiefenbildkameras mit Stereokameras verglichen. Anschließend wurden unterschiedliche Tiefenbildkameras recherchiert, analysiert und teilweise getestet. Mit Hilfe der erhaltenen Daten wie Auflösung, Reichweite und Sichtfeld der Kameras, konnte ein Gesamtkonzept erstellt werden. In diesem wurden die Deckenhöhe und die Größe des überwachten Bereiches, abhängig von der Kamerareichweite, festgelegt.

Darüber hinaus, konnten die gewünschten Fahrzeuggeschwindigkeiten, -größen und die Positioniergenauigkeit festgelegt werden.

Abschließend wurden unterschiedliche Kommunikationsschnittstellen und Kommunikationsprotokolle recherchiert und bewertet.

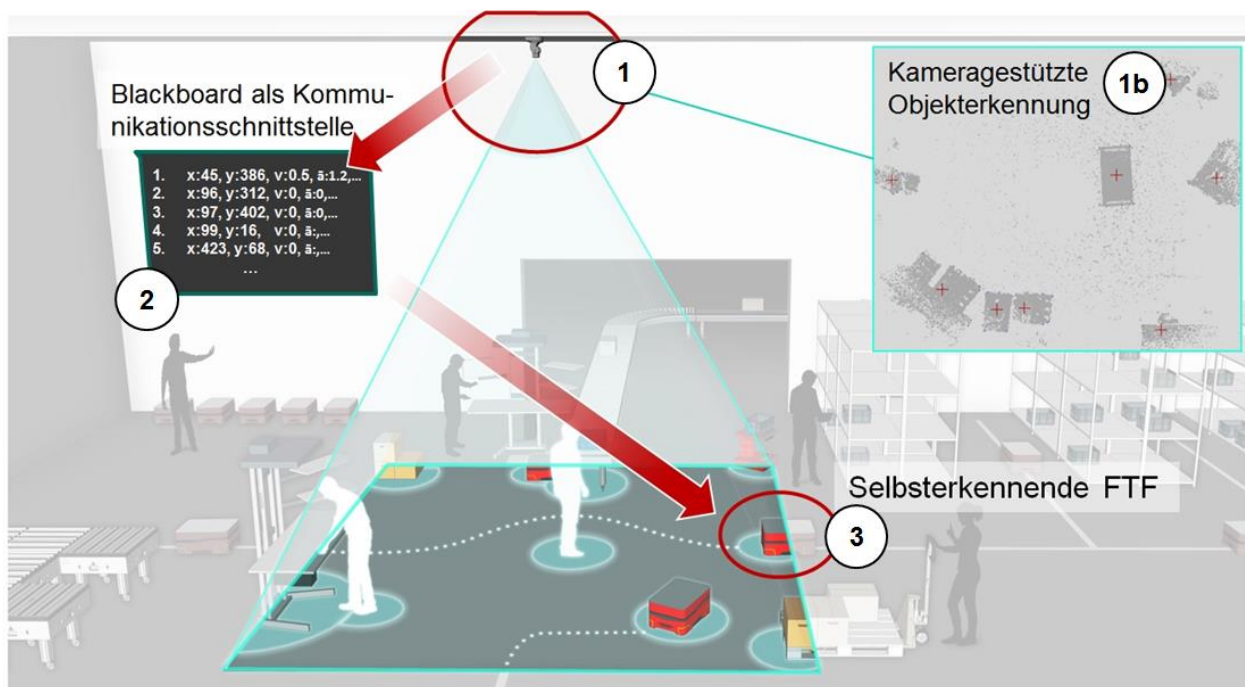


Abbildung 2: Skizzierte Darstellung des Grobkonzeptes. (1) Verwendung eines externen Sensorsystems, welches eine bestimmte Fläche einstrahlt und diese auf Basis eines Höhenprofils analysiert (1b). Veröffentlichung der Sensordaten über eine Kommunikationsschnittstelle „Blackboard“ (2). Fahrzeuge, die mit Hilfe der kommunizierten Sensordaten lokal frei navigieren können und nicht an eine Spur gebunden sind (3).

Erzielte Ergebnisse

Die durchgeführten Recherchen führten zu folgendem Gesamtkonzept, basierend auf drei Hauptkomponenten:

- Dem Kamerasystem mit integrierter Auswerteeinheit
- Der Kommunikationsschnittstelle (Blackboard)
- Dem Fahrzeug mit integrierter Lokalisierung und Navigation

Um die Kosten des Gesamtsystems möglichst gering zu halten wurde die Fahrzeuglokalisierung auf Basis eines externen Kamerasystems umgesetzt (siehe Abbildung 2 (1)). Als Kamerasystem wurde eine Tiefenbildkamera verwendet, welche an der Hallendecke mit dem Sichtfeld nach unten installiert wurde und mit der ein Höhenprofil der Umgebung aufgezeichnet werden kann (siehe Abbildung 2 (1b)). Zum Einsatz kam eine Kinect 2 mit einer Auflösung von 512 auf 424 Pixeln und einem Sichtfeld von ca. 70,6° auf 60°. Sie hat eine Reichweite von bis zu 8 Metern, was erlaubt, diese an den meisten Decken zu installieren und ein möglichst großes Sichtfeld ermöglicht.

Zu diesem Zweck wurden 29 Hallendecken unterschiedlichster Firmen und Bauarten auf Deckenhöhe, Abschattungen und Lichtverhältnisse hin untersucht und vermessen. 11 davon wurden vor Ort besichtigt und vermessen. Die Analyse hat ergeben, dass sich die meisten Dächer auf 4 Grundformen reduzieren lassen:

- Flachdach (44,8 % der untersuchten Dächer)
- Satteldach (44,8 % der untersuchten Dächer)
- Pultdach (6,9 % der untersuchten Dächer)
- Sheddach (3,4 % der untersuchten Dächer)

Alle Dächer weisen Bauelemente auf, die das Anbringen einer universellen Halterung erlauben. Außerdem wurden keine grundsätzlichen Eigenschaften, weder Baumaße noch Lichtverhältnisse, gefunden, die einem Einsatz des Kamerasystems widersprechen.

Die Datenübertragung der Sensordaten an unterschiedliche Module, wie beispielweise Fahrzeuge, erfolgte mit Hilfe des Kommunikationsprotokoll MQTT ((Message Queuing Telemetry Transport). Es ermöglicht eine einfache, schnelle und datenarme Übertragung und ist durch seinen publish und subscribe-Methodik gut für das Vorhaben geeignet. Die Kommunikationsschnittstelle kann wie ein „Schwarzes Bett“ (Blackboard) veranschaulicht werden, an dem in regelmäßigen Abständen Informationen über alle Objekte publiziert werden und auf das jedes Modul zugreifen kann, welches die Informationen zur Navigation oder zu Analysezwecken benötigt (siehe Abbildung 1 (2)).

Als Fahrzeuge wurden ältere Prototypen aus bereits abgeschlossenen Projekten verwendet [Quelle: Hochstein M, Dziedzitz J, Göbgen J, Furmans K (2016). Alternatives Linienführungssystem für autonome, fahrerlose Transportsysteme. Logistics Journal : Proceedings, Vol. 2016] (siehe Abbildung 2)



Abbildung 3: Abbildung des verwendeten Fahrzeuges aus dem ZIM-Projekt „Objektschutz“ des KIT und der Firma Imetron.

3.2.Arbeitspaket 2 – Aufbau eines Testszenarios

Durchgeführte Arbeiten

Zu Beginn wurde ein Sensorsystem an der Hallendecke installiert, eine Testumgebung aufgebaut und eine erste Kommunikationsschnittstelle implementiert. Das Sensorsystem besteht aus einer Tiefenbildkamera und einer Recheneinheit zur möglichst schnellen Auswertung, Reduktion und Kommunikation der Rohdaten (siehe Abbildung 3). Im Laufe der Projektlaufzeit wurde das Gesamtsystem im eine zusätzliche Sensoreinheit und einen zusätzlichen Testbereich erweitert. Darüber hinaus wurde ein bestehendes Fahrzeug (siehe Abbildung 2) Software- und Sensortechnisch an das Blackboardsystem angepasst.

Erzielte Ergebnisse

Ein erstes Testszenario bestehend aus Testbereich, Sensorsystem, Versuchsfahrzeug und Kommunikationsschnittstelle konnte implementiert und erste Daten generiert werden.

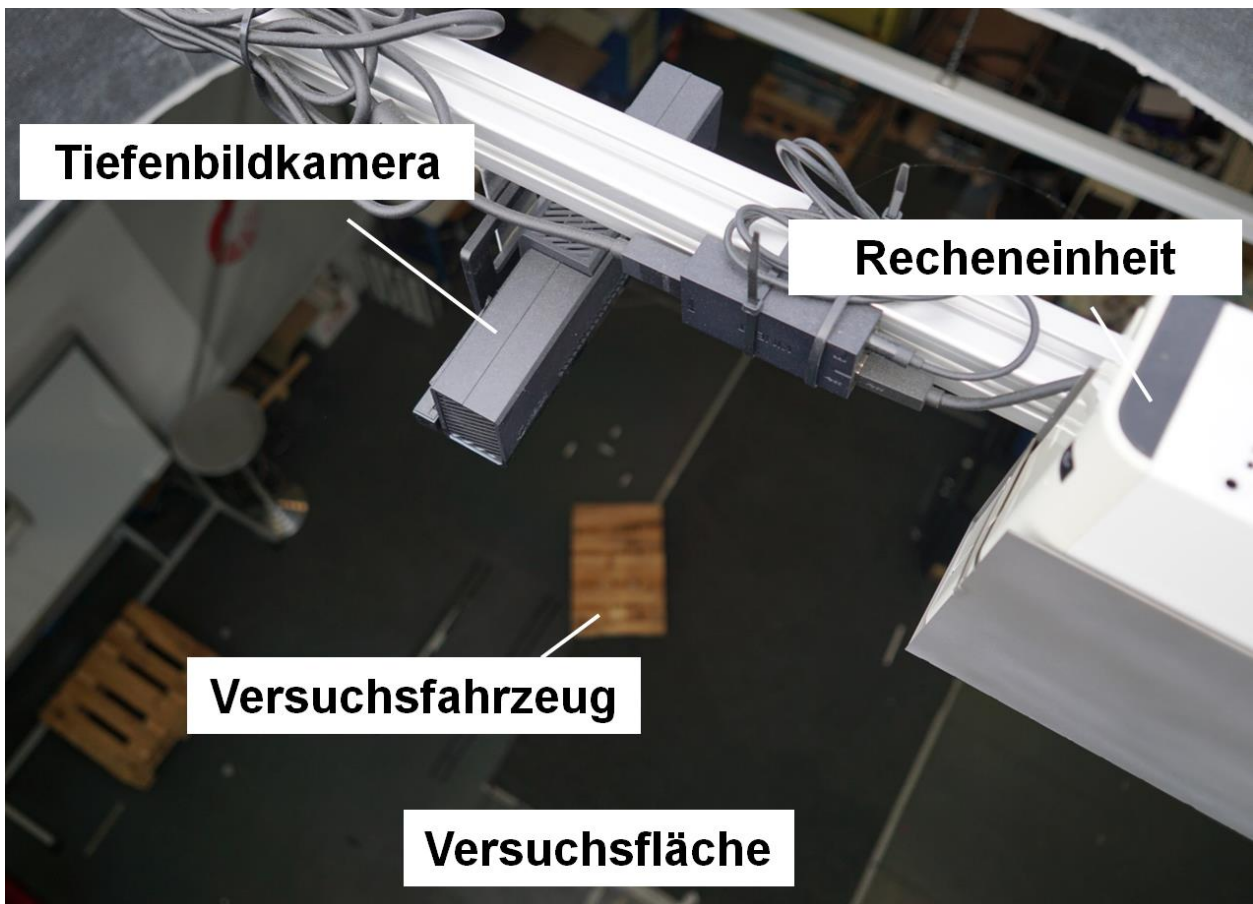


Abbildung 4: Fotografie des Sensorsystems inklusive Recheneinheit. Im Hintergrund ist die Versuchsfläche mit dem Versuchsfahrzeug zu erkennen.

3.3.Arbeitspaket 3 – Entwicklung der Fahrzeugerkennung

Durchgeführte Arbeiten

Zu Beginn der Rohdatenverarbeitung wurden die Messwerte untersucht um herauszufinden, an welchen Stellen und unter welchen Umständen diese mehr oder weniger rauschen, oder gar keine Daten liefern. Anschließend wurden Methoden implementiert, um die Messwerte zu filtern und die Darstellung zu verbessern. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Unterscheidung zwischen relevanten Daten (tatsächliche Objekte) und Rauschen. Für die Segmentierung der Objekte wurde ein eigener Segmentierungsalgorithmus implementiert, da alle recherchierten Algorithmen

nicht den Anforderungen bzgl. Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit entsprachen. Nachdem die Objekte erkannt und Segmentiert wurden, wurden sie trajektorisch als auch geometrisch untersucht.

Erzielte Ergebnisse

In Abbildung 5 werden die unveränderten Rohdaten der Tiefenbildkamera visuell dargestellt. Durch die unterschiedlichen Grauwerte werden unterschiedliche Höhen erkennbar gemacht.

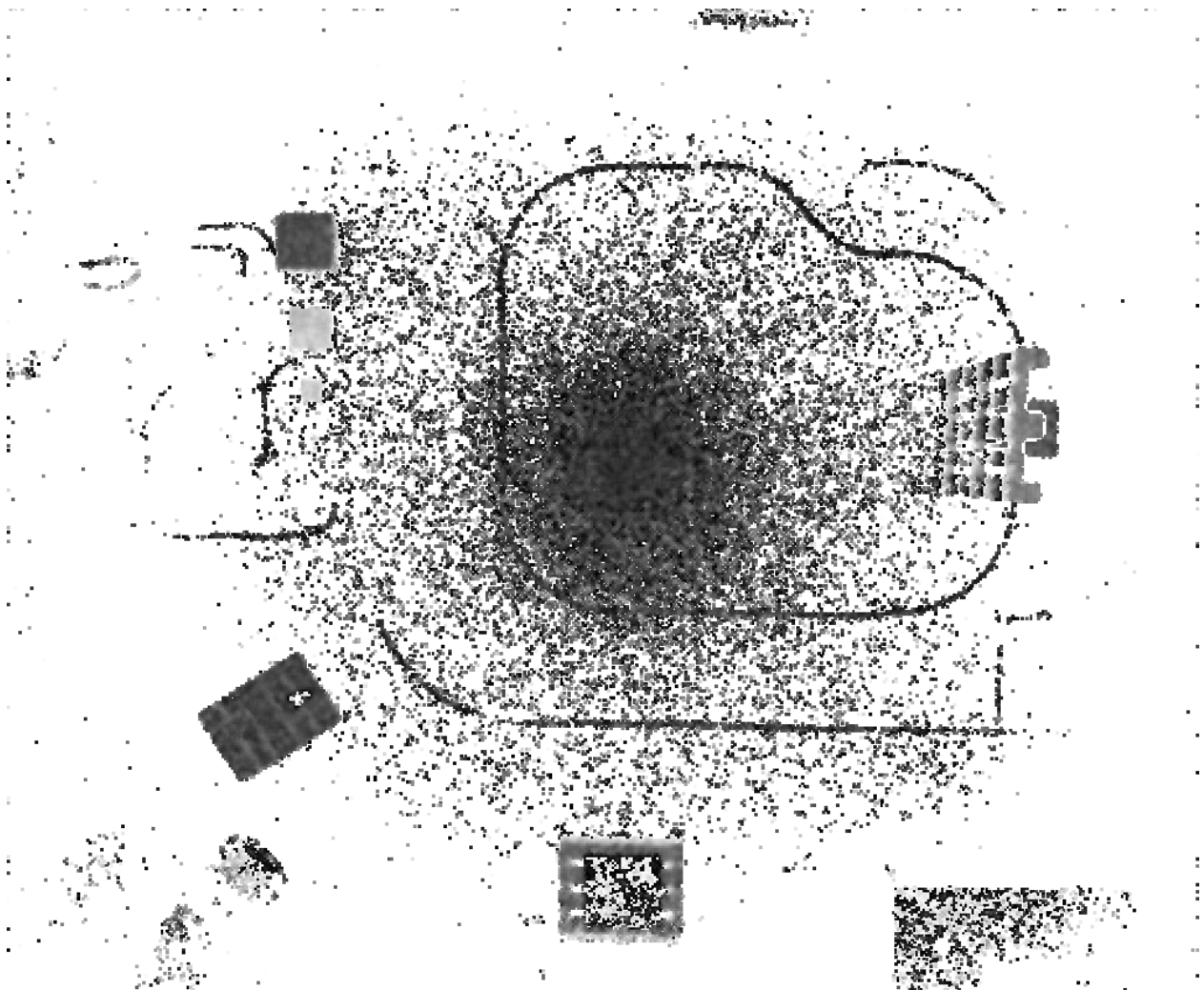


Abbildung 5: Visuelle Darstellung der Messwerte der Tiefenbildkamera. Zu erkennen sind unter anderem das Fahrzeug (unten links), eine aufrecht stehende Europalette (Mitte rechts), als auch drei Kisten unterschiedlicher Größe und Höhe (oben links).

Zu erkennen ist, dass die Kamera im Lot deutlich mehr Messwerte liefert, als am Rand, was auf die spiegelnde Oberfläche des Hallenbodens zurückgeführt werden kann. Objekte hingegen, können auch in den äußeren Bereichen des Sichtfeldes gut erkannt werden.

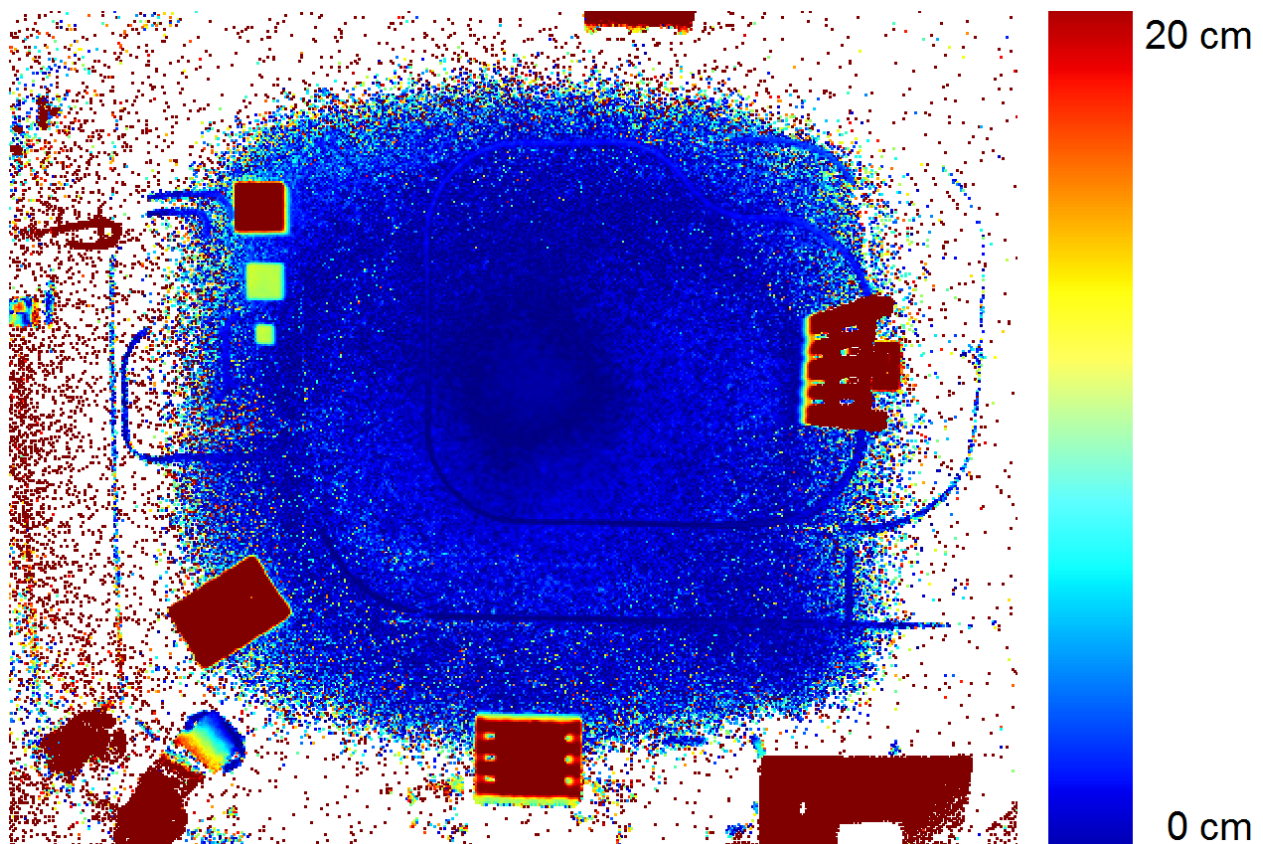


Abbildung 6: Visuelle Darstellung des Messfehlers in vertikaler Richtung (Rauschen)

Nach der Implementierung eines Neigungsausgleichs, hat eine Analyse der Fehler, Abbildung 6, ergeben, dass dieser, nach einem Neigungsausgleich, tolerierbar ist und eine sicherheitstechnisch vorgegebene Sichthöhe von 20cm mit 7,5cm deutlich unterschreitet.

Nach der Entfernung des Hallenbodens, der Implementierung weiterer Rauschunterdrückender Maßnahmen und eines eigenen Segmentierungsalgorithmus, wurde eine Charakterisierung der Objekte umgesetzt. In Abbildung 6 ist das Resultat der Filter und Segmentierungsalgorithmen zu sehen, indem der Hallenboden herausgerechnet wurde und einzelne Objekte zu erkennen sind. Die die Verwendung unterschiedlicher, selbstentwickelter Filter, konnte das Rauschen auf Grund fehlerbehafteter Messwerte vollständig herausgefiltert werden. Darüber hinaus werden Objekte, welche auf Grund fehlender Messwerte unvollständig sind, mit Hilfe einer eigens entwickelten Methode stabilisiert und sind deutlicher zu erkennen.

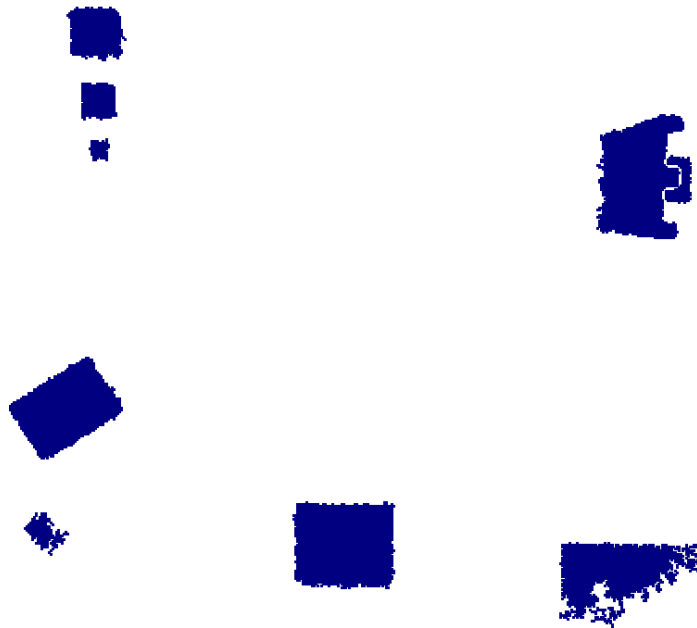


Abbildung 7: Visuelle Darstellung der gefundenen Objekte, nach erfolgreicher Segmentierung und Rauschanalyse.

Im Anschluss werden die einzelnen Objekte auf deren Eigenschaften hin analysiert. Ermittelt werden können:

- Die Position jedes Objektes
- Die Geschwindigkeit
- Die Bewegungsrichtung
- Die maximale Höhe
- Die minimale Höhe
- Die Form
- Die Fläche

Neben den obengenannten Charakteristika wurde auch eine Feinpositionierung, basierend auf einem Formvergleich, implementiert. Mit Hilfe dieser eigens entwickelten Methode ist eine Positionierung, trotz stark verrauschter Messwerte, von unter 5 cm möglich.

3.4.Arbeitspaket 4 – Entwicklung des Blackboards

Durchgeführte Arbeiten

Es wurde eine Kommunikationsschnittstelle, basierend auf dem MQTT-Protokoll implementiert und umgesetzt. Eigenschaften, die der Identifikation der Fahrzeuge

dienen, wurden definiert, herausgearbeitet und für eine schnelle Datenübertragung komprimiert.

Erzielte Ergebnisse

Die schon in Kapitel 1.3 beschriebenen Charakteristika wurden erfolgreich ermittelt und aufgearbeitet. Damit die Datenübertragungsrates und die Netzauslastung möglichst gering sind, wurden, vor allem die Informationen bzgl. der Form, stark reduziert. Damit dies möglich war, musste ein Abstraktionsverfahren implementiert werden, welches die Form eines Objektes stabil erkennt und auf wenige Randpunkte reduziert.

Die reduzierten Informationen werden anschließend über das installierte Kommunikationsnetzwerk verschickt und können von Fahrzeugen und Erweiterungsmodulen empfangen werden.

Mit dem Wissen, um ihre eigenen Charakteristika, sind die Fahrzeuge in der Lage, sich selbst zu erkennen und ihre Position zu korrigieren. Darüber hinaus erhalten sie auch die Informationen über alle anderen Objekte, die sich im Sichtfeld der Tiefenbildkamera befinden. Mit Hilfe beider Informationen können die Fahrzeuge frei durch den Raum navigieren, ohne mit anderen Objekten zu kollidieren. Eine Berechnung der Latenz, basierend auf der Verarbeitungszeit, der Bildrate und der Übertragungsdauer hat ergeben, dass bei einem Fahrzeug, welches sich mit 1 m/s bewegt, der Positionierfehler bei ca. 15 cm liegt. Die Feinpositionierung ist davon ausgeschlossen, da ein Fahrzeug zum feinpositionieren kurz stehen bleiben muss.

3.5.Arbeitspaket 5 – Entwicklung der Navigationsalgorithmen

Durchgeführte Arbeiten

In diesem Arbeitspaket wurde ein Navigationsalgorithmus entwickelt, welcher einem Fahrzeug nicht nur ermöglicht die kürzeste Distanz zur Zielposition zu ermitteln, sondern darüber hinaus die Vorteile der kameragestützten Lokalisierung nutzt, um die Wegplanung weiter zu verbessern. Die einzelnen Eigenschaften sind folgend dargestellt:

- Ermittlung kürzester Wege
- Vermeidung von Kollisionen mit statischen Objekten
- Vermeidung von Kollisionen mit dynamischen Objekten durch voraus-schauende Positionsabschätzung der anderen Verkehrsteilnehmer
- Berücksichtigung regelmäßig auftretender Objekte und generische Entstehung von fixen Routenführungen

Grundsätzlich wurde ein modularer Ansatz gewählt, bei dessen Anwendung, die Umgebungsinformationen erst vollständig in verschiedenen Schichten ausgewertet

werden um abschließend mittels eines einfachen Wegplanungsalgorithmus die kürzeste Route zu finden.

In den ersten beiden Schichten wird die Ist-Situation der Umgebung berücksichtigt, indem Gegenstände und Menschen als statische Hindernisse berücksichtigt werden, um die das Fahrzeug herum navigieren muss. In der dritten Schicht werden zur Identifikation hochfrequentierter Bereiche vergangene Umgebungsdaten mit einem Clustering-Verfahren analysiert. Diese Bereiche dienen der Erkennung von Fahrzeugstraßen, in die sich das FTF einreihen soll, sowie der Erkennung zu meidender Bereiche, die zum Beispiel häufig durch Menschen aufgesucht werden.

Zur Bestimmung der optimalen Route über alle Schichten hinweg kommt ein modifizierter A*-Wegfindungsalgorithmus zum Einsatz. Danach wird die Bewegung anderer Fahrzeuge linear approximiert und das eigene Fahrverhalten anhand möglicher Kollisionen nochmals angepasst. Dies geschieht primär durch die Anpassung der Fahrgeschwindigkeit und nur im Notfall durch Anpassung der Route.

Vermeidung von Kollisionen mit statischen Hindernissen

Die Kollisionsvermeidung erfolgt auf Basis reduzierter Informationen der Form der einzelnen Objekte. Mit dem Ziel die vom Kamerasystem übertragene Datenmenge möglichst gering zu halten, wurden die einzelnen Objektformen in einem ersten Schritt auf wenige Punkte reduziert. Durch die Reduktion konnten die zu übertragende Datenmenge um ein Vielfaches reduziert werden.

Zur Vermeidung einer Kollision ist die Form eines Objektes und dessen Position jedoch nicht ausreichend. Darüber hinaus wird auch die Breite und das Fahrverhalten des navigierenden Fahrzeuges mit berücksichtigt und Routen geplant, die einen bestimmten Mindestabstand zu den anderen Objekten einhalten.

Vermeidung von Kollisionen mit dynamischen Objekten

Zur Kollisionsvermeidung mit dynamischen Objekten werden deren Bewegungsrichtungen und Geschwindigkeiten analysiert. Aus den gewonnenen Informationen und unter Berücksichtigung der eigenen Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit kann anschließend eine mögliche Route des Objektes ermittelt und eine Kollision vorhergesagt werden. Diese wird vermieden indem in einem ersten Schritte die Geschwindigkeit reduziert wird, ohne eine neue Route zu planen. Erst im Falle einer unausweichlichen Kollision, zum Beispiel durch den vollständigen Halt des anderen Objektes, wird in einem zweiten, rechenaufwendigeren Schritt, eine neue Route um das Hindernis herum berechnet.

Berücksichtigung regelmäßig auftretender Objekte und generische Entstehung von fixen Routenführungen

Ein Vorteil der externen Sensorik ist, dass nicht nur Objekte im direkten Sichtfeld eines einzelnen Fahrzeuges zur Wegplanung genutzt werden können, sondern dieses auf die Informationen aller anderen Objekte zugreifen kann. So wurde im Rahmen des Projektes neben dem Sensorsystem und dem Fahrzeug ein weiteres Modul entwickelt, welches unabhängig vom Fahrzeug auf die kommunizierten Daten zugreift, diese genauer analysiert und historische Informationen über das Bewegungsverhalten bestimmter Objekte zur Verfügung stellt. Dem Fahrzeug können somit Informationen über bestimmte Bereiche zur Verfügung gestellt werden, die besser gemieden oder befahren werden sollten. In Abbildung xy sind einmal die historischen Positionsdaten eines Fahrzeuges (grün) als auch die Positionsdaten eines Menschen (rot) dargestellt.

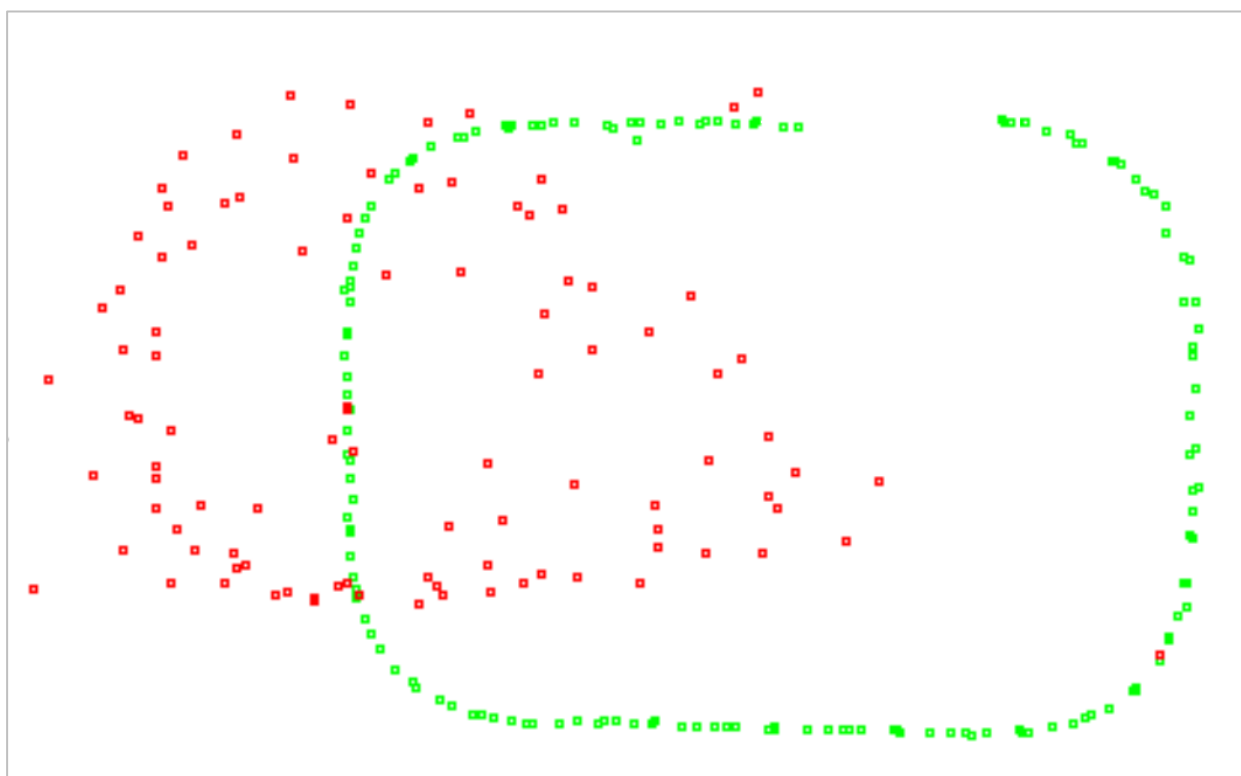


Abbildung 8: Visuelle Darstellung der über eine bestimmte Zeit ermittelten Fahrzeugpositionen in grün und Aufenthaltsorte eines Menschen in rot.

Bereiche, in denen viele Menschen unterwegs sind können somit gemieden werden, während Bereiche, in denen Fahrzeuge unterwegs sind bevorzugt befahren werden. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass Menschen es bevorzugen, wenn Fahrzeuge vorhersehbare Routen benutzen. Aus diesem Grund werden die historischen Daten auch für eine Streckenfixierung genutzt. Das Konzept für eine solche Fixierung wurde von den Ameisen übernommen. Diese hinterlassen auf ihrem Weg eine Duftnote, welche andere Ameisen dazu animiert dieselbe Route zu wählen. Im hier vorgestellten Projekt wurde es auf eine ähnliche Weise umgesetzt. Über die Zeit hinweg wurden die Positionen von Fahrzeugen aufgezeichnet und zusammengefasst. Die

zusammengefassten Streckenabschnitte wiederum bekommen bei der Kostenermittlung zur berechnet der kürzesten Strecke einen Bonus, wodurch sie für die Streckenplanung attraktiver wurden. Dieser Bonus erhöhte sich durch jedes Fahrzeug weiter, bis ein Maximum erreicht wird. Damit die Streckenführung dennoch flexibel ausgebildet werden kann, reduziert sich der Bonus über die Zeit hinweg wieder. Sollte ein Streckenabschnitt blockiert sein, kann somit gewährleistet werden, dass sich die alte Streckenführung auflöst und eine neue gebildet wird.

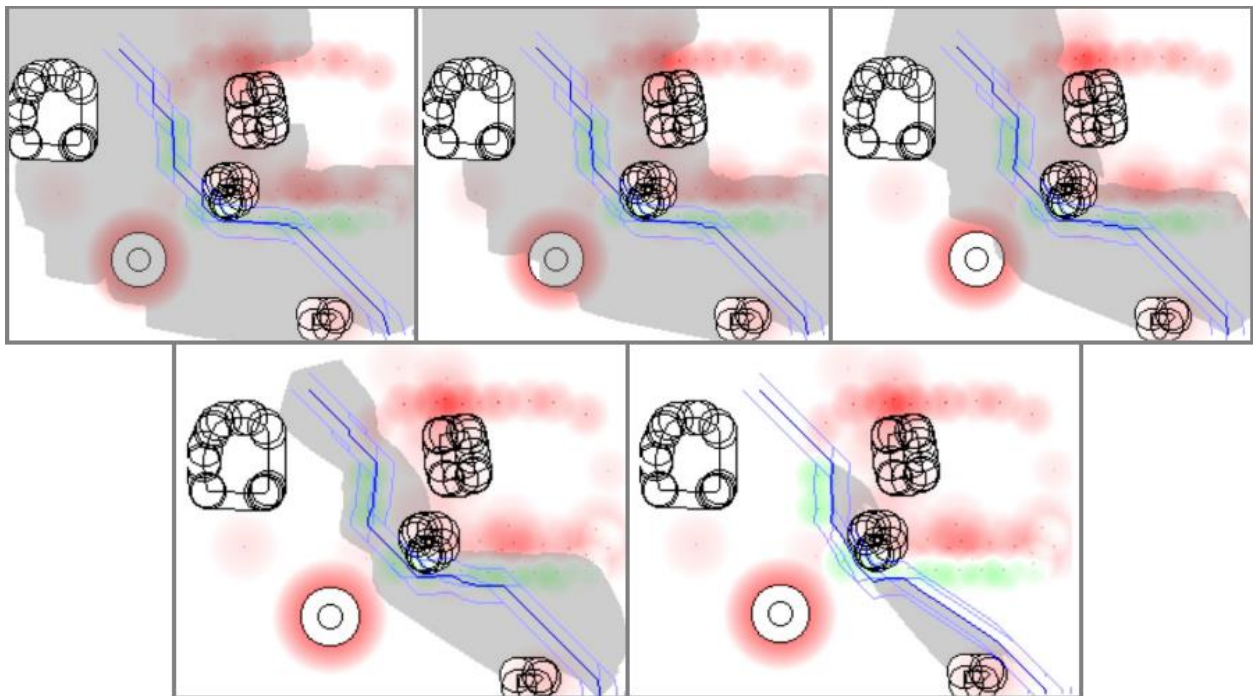


Abbildung 8: Visuelle Darstellung der Routenplanung unter Berücksichtigung von Hindernissen (schwarz), bevorzugten Strecken in Fahrtrichtung des Fahrzeuges (grün) entgegen der Fahrtrichtung des Fahrzeuges (rot, klein) und eines Menschen (zwei ineinander liegende schwarze Kreise mit roter Umrandung) für unterschiedlich ausgeprägte Kosten-, bzw. Bonusbewertungen.

Erzielte Ergebnisse

In diesem Arbeitspaket wurde neben dem Navigationsalgorithmus für Fahrzeuge, auch ein weiteres Modul entwickelt, welches über die Zeit hinweg Bewegungen von Fahrzeugen und Menschen aufzeichnet, analysiert und generisch Strecken ausbauen lässt. Der Navigationsalgorithmus bestand aus einem angepassten A*-Algorithmus um die kürzeste Entfernung zum Ziel zu ermitteln, einer Fahrzeug abhängigen Kollisionsvermeidung und einer vorausschauenden Kollisionsvermeidung. Darüber hinaus wurde ein zusätzliches Modul entwickelt, welches den Fahrzeugen nützliche Informationen zur Verfügung stellt, damit diese automatisch, geordnet einer Strecke folgen.

3.6.Arbeitspaket 6 – Test des Gesamtsystems

Durchgeführte Arbeiten

Der Test des Gesamtsystems besteht aus unterschiedlichen kleinen Tests, welche folgend aufgelistet sind:

- Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten im realen Umfeld
- Test der Fahrzeugnavigation inklusive Kollisionsvermeidung
- Test der Fahrzeugidentifikation
- Test der Netzwerkinfrastruktur in Bezug auf Echtzeitfähigkeit
- Test der Positioniergenauigkeit eines Fahrzeuges

Anwendungsmöglichkeiten in realem Umfeld

Vorbereitend zu den Versuchen, mit dem Ziel ein realitätsnahes Testszenario implementieren zu können, wurden einerseits anwendungsbezogene Recherchen zu Fahrerlosen Transportfahrzeugen und deren Einsatz, als auch betriebsnahe Untersuchungen durchgeführt. Vor Ort untersucht wurden die Transportprozesse, die Routenführung und die Randbedingungen im Produktionswerk der Robert Bosch GmbH in Bühl, als auch das Produktionswerk der SEW Eurodrive in Graben. Darüber hinaus konnte auf den Erfahrungsschatz der Firma Imetron als Fahrzeughersteller und Lieferant zurückgegriffen werden.

Als Ergebnis der Untersuchungen konnten einige Randbedingungen und Einflussfaktoren ermittelt und priorisiert werden, die im realen Umfeld eine wichtige Rolle für den Betrieb von fahrerlosen Transportfahrzeugen spielen.

Im Folgenden werden die Untersuchungsschwerpunkte nach deren Wichtigkeit für die Aufnahmen in das Testszenario aufgelistet:

- Positionsgenauigkeit
- Fahrigenauigkeit: Enge Passage
- Fahrverhalten in Personenbeinhaltender Umgebung
- Verhalten bei Bodenschmutz
- Hinderniserkennung
- Erkennung von Streckenblockaden

Basierend auf den vorausgegangenen Recherchen wurde das folgende Testszenario (siehe Abbildung 9) aufgebaut und Tests durchgeführt.

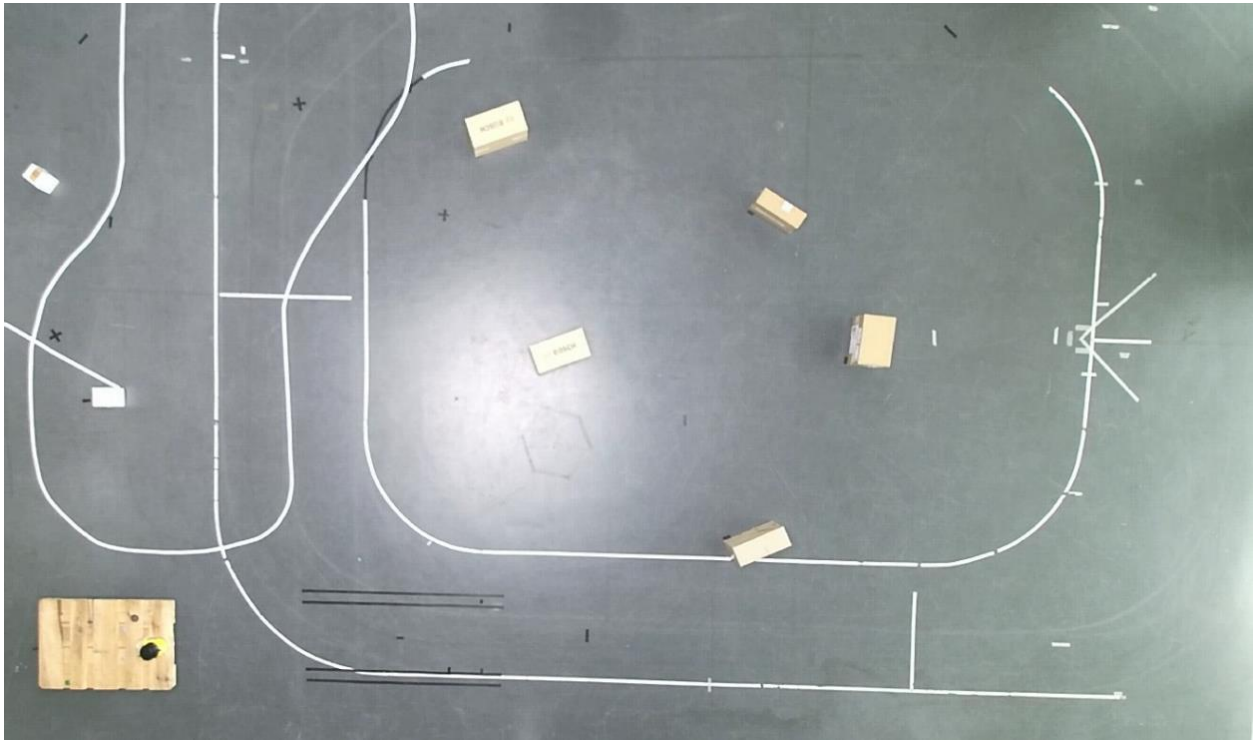


Abbildung 9: Fotografie des ersten Testszenarios auf der Sicht des Kamerasystems. Zu erkennen sind mehrere Hindernisse in Form von Kartons und das Versuchsfahrzeug in der unteren linken Ecke.

Erzielte Ergebnisse

Fahrzeugnavigation inklusive Kollisionsvermeidung

Insgesamt wurden 30 Versuche durchgeführt in denen die Abweichungen von einer vorgegeben Route bestimmt und die Positioniergenauigkeit an einer definierten Position ermittelt werden, nachdem das Fahrzeug selbständig eine Route durch ein Hindernisfeld finden und hindurch navigieren musste. Dabei wurde stets das Hindernisfeld passiert, ohne mit statischen, als auch zu bewegendes Hindernissen zu kollidieren. Der Abstand der Hindernisse zueinander entsprach der doppelten Fahrzeugbreite.

Fahrzeugidentifikation

Damit mehrere Fahrzeuge erkannt und navigieren können ist eine Zuordnung der Sensordaten zu dem jeweiligen Fahrzeug und somit eine Fahrzeugidentifikation notwendig. Diese beruht auf einem probabilistischen Ausschlussverfahren indem die ermittelten Objekteigenschaften mit denen der Fahrzeuge verglichen werden. Im Verlauf des Projektes konnte die Methode zunehmend verbessert werden, wodurch eine Identifikation des jeweiligen Fahrzeuges innerhalb von unter einer Minute möglich war.

Netzwerkinfrastruktur in Bezug auf Echtzeitfähigkeit

Ein bestimmender Faktor des gesamten Systems ist die Latenz der Datenauswertung, der Datenübertragung, und der Verarbeitung auf dem Versuchsfahrzeug. Sie hat dabei sowohl Auswirkungen auf die maximal fahrbare Geschwindigkeit, als auch auf die Positioniergenauigkeit. Ziel war es die einzelnen Latenzen möglichst gering und die Auswertesoftware möglichst schlank und wenig rechenintensiv zu implementieren. Die Einzelnen Latenzen wurden im Laufe des Projektes in regelmäßigen Abständen ermittelt, indem Laufzeitversuche bei der Datenübertragung, oder die Berechnungszeiten der einzelnen Softwareteile ermittelt wurden.

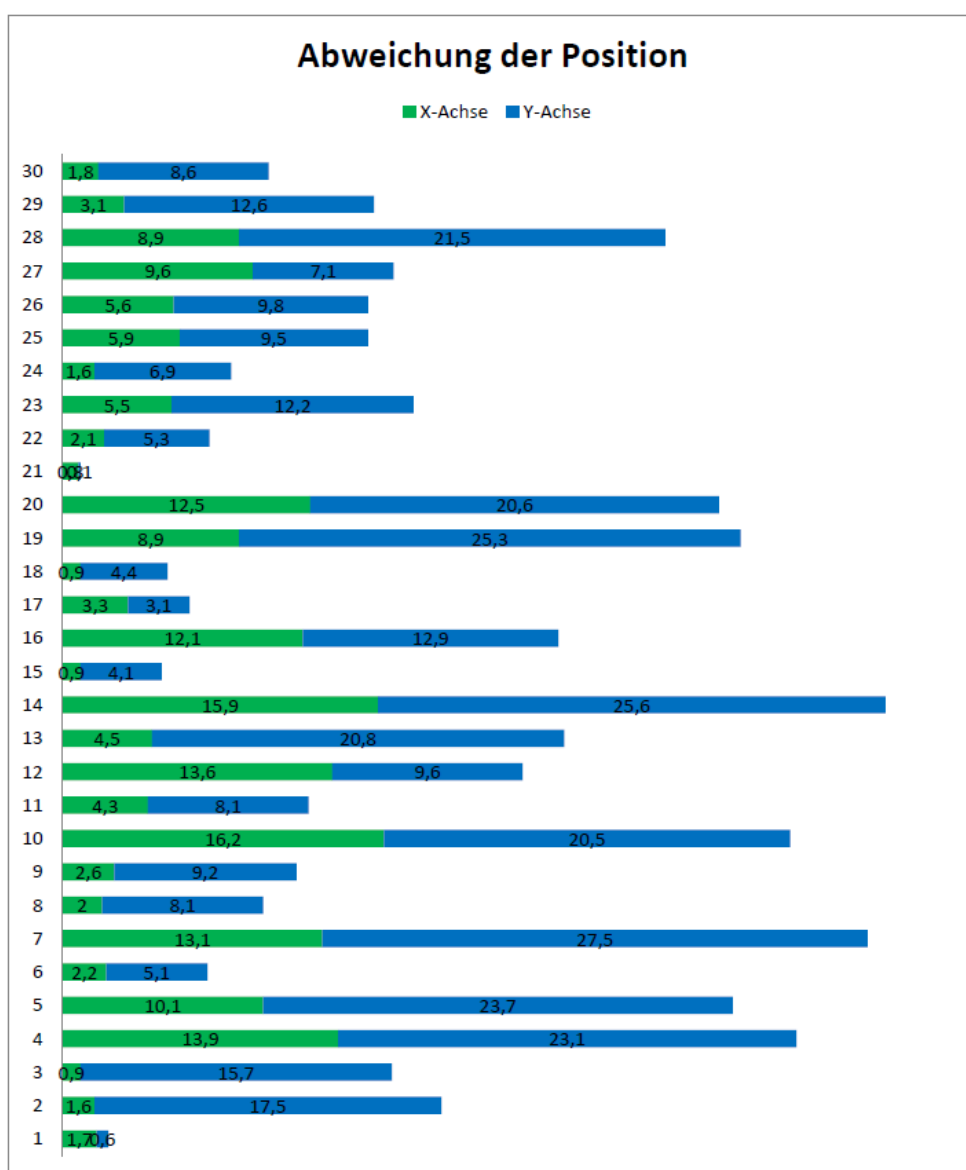


Abbildung 10: Ergebnisse der Positioniersuche nach voran gegangener Hindernisumfahrung in Zentimeter.

Positioniergenauigkeit eines Fahrzeuges

Die in Abbildung 10 dargestellten Ergebnisse beschreiben die Abweichungen des Fahrzeuges zur gewünschten Zielposition für alle 30 Versuche sowohl in x- als auch in y-Richtung in Zentimeter dar. Dabei ist zu erkennen, dass der Positionierfehler starken Schwankungen unterliegt. Dennoch kann in x-Richtung mit einem durchschnittlichen Positionierfehler von 6,2cm und in y-Richtung mit 12,6cm gerechnet werden.

3.7.Arbeitspaket 7 – Veröffentlichung und Dokumentation

Durchgeführte Arbeiten

Im Laufe des Projektes wurden insgesamt 13 studentische Arbeiten betreut.

Eine detaillierte Darstellung der entwickelten Methoden, weiterer Versuchsergebnisse und des Identifikationsprozesses erfolgt bis zum 30.9.2019 im Rahmen einer Dissertationsveröffentlichung.

Darüber hinaus sind für das Jahr 2019 min. drei weitere Veröffentlichungen geplant, die sowohl auf dem Projekt, aus auch auf der angekündigten Dissertation geruhen.

4 Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen

Ein zunehmendes Individualisierungsmaß der Produkte stellt Hersteller vor die Herausforderung von der Massenproduktion identischer Waren abzurücken und ihre Produkte zunehmend zu individualisieren. Kürzer werdende Lebenszykluszeiten begünstigen die Herausforderungen, da Produktionslinien häufiger angepasst werden müssen, um neue Produkte schneller fertigen zu können. Darüber hinaus ist in einem Hochlohnstandort wie Deutschland ein hoher Automatisierungsgrad notwendig, um auch in Zukunft auf dem Markt konkurrenzfähig zu bleiben.

Damit diese Herausforderungen auch in Zukunft bewältigt werden können, ist ein hohes Maß an Flexibilität notwendig. Dieses Maß gilt dabei nicht nur für die Produktion, sondern auch für den automatisierten Materialfluss. In vielen Unternehmen werden für den Warentransport fahrerlose Transportsysteme (FTS) eingesetzt. Diese übernehmen zum Beispiel den Transport einzelner Bauteile aus dem Lager zum jeweiligen Arbeitsplatz oder Produktionslinie. Die Flexibilität spielt dabei in zweierlei Hinsicht eine wichtige Rolle. Auf der einen Seite geht es um die Infrastrukturelle Flexibilität. Diese umfasst die Fähigkeit, die Routen der fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF) schnell anpassen zu können, zum Beispiel hervorgerufen durch regelmäßigen Umbau einer Produktionslinie. Abhängig vom verwendeten System ist dies oftmals nur mit großem Aufwand möglich. Auf der anderen Seite spielt auf die Flexibilität während dem Laufenden Transportbetrieb eine wichtige Rolle. Durch ein hohes Verkehrsaufkommen oder durch kurzfristig gepufferte Waren können Transportwege blockiert sein. Flexible Systeme sind in der Lage eine solche Situation zu erkennen und darauf zu reagieren, indem neue Routen berechnet und genutzt werden. Beim Vergleich unterschiedlicher Systeme hat sich herausgestellt, dass einfache und kostengünstige spurgeführte Systeme eher unflexibel sind, während flexible Systeme, welche auf dem SLAM-Algorithmus basieren, in der Anschaffung sehr teuer sind.

Diese Tatsache stellt gerade kleine und mittelständige Unternehmen (KMU) vor große Herausforderungen, da die Anschaffungskosten für solche hochflexiblen Materialflusssysteme oftmals deren Budget überschreitet.

Die in dem Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse unterstützen insbesondere KMU bei der Bewältigung dieser Herausforderung. Es wurde ein System entwickelt, welches es ermöglicht einfache, spurgeführte Systeme lokal hochflexibel agieren zu lassen, ohne dass zusätzliche Sensorik in den jeweiligen Fahrzeugen verbaut werden muss. Durch das entwickelte System können bereits

installierte spurgeführte FTS weiterverwendet werden und gleichzeitig lokal hohen Flexibilitätsansprüchen genügen. Durch den geringen Installationsaufwand und die geringen Kosten ist das System gerade für kleine und mittelständige Unternehmen geeignet. Neben der Entwicklung der externen Sensoreinheit sind darüber hinaus mehrere Firmen auf deren Kompatibilität untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass eine einfache Installation des Systems in beinahe jeder Halle möglich ist.

Durch die Verwendung einer Tiefenbildkamera als Sensor und die Entwicklung einfacher und robuster Algorithmen für die Objekterkennung und Objektidentifikation können die Herstellkosten für das System sehr niedrig gehalten werden. Ein weiterer Vorteil der durch die Verwendung einer Tiefenbildkamera und damit durch die Verwendung von Entfernungswerten entsteht ist, dass Personen nicht eindeutig identifiziert werden können, wodurch der Schutz der Privatsphäre gewährleistet werden kann. Die einfach zugängliche Schnittstelle des Systems ermöglicht den Einsatz zusätzlicher Module. So kann das System um weitere Funktionen, welche von externen Recheneinheiten durchgeführt werden, erweitert werden.

Die Möglichkeit kostengünstige fahrerlose Transportfahrzeuge lokal hochflexibel agieren zu lassen leisten einen zentralen Beitrag für eine effektive Umsetzung eines automatisierten Materialflusses in kleinen und mittelständigen Unternehmen und damit zu deren Wettbewerbsfähigkeit.

5 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - In der Projektlaufzeit von Anfang 2017 bis Ende 2019 wurden 24 PM eines wissenschaftlichen Mitarbeiters eingesetzt
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
 - Es wurden keine Geräte gekauft
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
 - Leistungen dritter wurden nicht in Anspruch genommen

Die Zuwendungen wurden wie geplant eingesetzt. Bisher wurden noch keine Gelder für Sachmittel ausgegeben, da die Thematik bis jetzt sehr softwarelastig war und für die erste Umsetzung auf bestehende Geräte zurückgegriffen werden konnte. In der zweiten Hälfte des Projektes wurden ausgiebige Tests und Installationen umgesetzt, für die neue Geräte angeschafft werden mussten. Leistungen Dritter wurden nicht in Anspruch genommen.

Nähere Details sind in den beigefügten Unterlagen zu finden.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Analyse und Aufarbeitung der Rohdaten hat ein wenig mehr Zeit in Anspruch genommen als ursprünglich angenommen. Nichts desto trotz konnte der Zeitplan erfolgreich gehalten werden.

7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Erste Schritte zum Ergebnistransfer sind bereits während der Projektlaufzeit entsprechend der geplanten Maßnahmen durchgeführt worden. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse befinden sich aktuell in der Umsetzung und sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Die im Jahr 2018 geplanten Veröffentlichungen wurden auf das Jahr 2019 verschoben. Grund dafür ist die Verwendung großer Teile der Ergebnisse und die Methodenentwicklung in einer Dissertation. Diese wird voraussichtlich im 3. Quartal 2019 veröffentlicht und detaillierte Einblicke in das Projekt und die erzielten Ergebnisse liefern. Alle noch ausstehenden Maßnahmen sind bereits angestoßen worden. Eine Umsetzung im geplanten Zeitraum wird daher als realistisch eingeschätzt. Der gesamte Plan zum Ergebnistransfer ist den folgenden Tabellen zu entnehmen.

Während der Projektdurchführung wurden die (Zwischen-)Ergebnisse laufend in den Projektausschusstreffen sowie gegenüber weiteren interessierten Unternehmen bekannt gemacht. Dadurch konnte zum einen ein erster Wissenstransfer in die Wirtschaft angestoßen und zum anderen wichtiger Input für die mechanische und informationstechnische Umsetzung gewonnen werden. Die Umsetzbarkeit der Ergebnisse ist damit zu jeder Zeit gewährleistet gewesen. Da neben KMU auch drei größere Unternehmen zum projektbegleitenden Ausschuss zählten, konnten ebenfalls bereits Multiplikatoren mit großer Reichweite gewonnen werden.

Die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses sind nachstehend aufgeführt:

Projektbegleitender Ausschuss:

Unternehmen	KMU	Ansprechpartner
Fa. Imetron Gesellschaft für industrielle Mechatronik mbH	X	Dr. Dieter Kolberg
flexlog GmbH	X	Dr. Thomas Stoll
BÄR Automation GmbH	X	Ralf Bär
OPTIMUM GmbH	X	Andreas Felber
SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG		Dr. Frank Schönung

Mack Rides GmbH & Co KG		Christian Fahrländer
Sick AG		Markus Mayr

Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
KIT-Homepage	Zeitnahe Information des Interessentenkreises über Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Publikation des aktuellen Standes auf der Homepage des KIT 	Seit 1.1.2017
Präsentation in Lehrveranstaltungen	Vermittlung aktueller Forschungserkenntnisse an Studierende	<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung von Ortungsmöglichkeiten in der Lehrveranstaltung „dezentral gesteuerte Intralogistiksysteme“ 	Seit 1.8.2017
Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse mit dem projektbegleitenden Ausschuss	Einholen von Feedback und Hinweisen zum bisherigen und aktuellen Vorgehen von Vertretern aus der Praxis	<ul style="list-style-type: none"> • Vorstellung der Ergebnisse aus den jeweiligen Arbeitspaketen und Diskussion des geplanten Vorgehens • Abschlusspräsentation und Diskussion der Ergebnisse 	10.05.2017 18.05.2017 16.10.2017 12.04.2018 16.10.2018
Zwischenbericht	Bereitstellung des Zwischenberichts für die Öffentlichkeit	Durch die BVL www.bvl.de	20.12.2017

Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Verbreitung der Ergebnisse durch eine Dissertation	Publik machen des Vorgehens und der Ergebnisse für ein breites Fachpublikum	<ul style="list-style-type: none"> • Dissertation 	3. Quartal 2019
Verbreitung der Ergebnisse durch Veröffentlichungen und Fachveranstaltungen	Publik machen des Vorgehens und der Ergebnisse für ein breites Fachpublikum Bereits eingereichte	<ul style="list-style-type: none"> • Veröffentlichung in der Zeitschrift „Fördern und Heben“ 	3. Quartal 2019

	<p>Abstracts für „Logistics Journal“ mit den Themen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Methoden zur Selbstidentifikation von FTF auf Basis der kommunikationsgestützten Lokalisierung • Methode zur Feinpositionierung auf Basis der kommunikationsgestützten Lokalisierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Veröffentlichung auf der Webseiten des Instituts • WGTL Kolloquium 	<p>Voraussichtlich 09.2019</p> <p>Voraussichtlich 09.2019</p>
Newsletter	Schnelle Verbreitung über elektronische Newsletter	<ul style="list-style-type: none"> • Eine Zusammenfassung zur Darstellung in Newslettern wurde an die BVL weitergegeben 	Mitte 2019
Verwendung der aktuellen Ergebnisse aus der Forschung	Transfer der Ergebnisse in die Praxis durch Nutzung, zur Weitergabe der Ergebnisse bei Unternehmensberatungen	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung im Rahmen der Beratung von Unternehmen 	kontinuierlich
Verbreitung neuer Erkenntnisse durch eine internationale Veröffentlichung	Publik der Ergebnisse eines Erweiterungsmoduls für ein breites Fachpublikum mit dem Thema „Prozesserkennung auf Basis der kommunikationsgestützten Lokalisierung“	<ul style="list-style-type: none"> • IMHRC 	Anfang 2020

8 Durchführende Forschungsstelle

Das Forschungsprojekt „Tiefenbildgestützte Lokalisierung von fahrerlosen Transportsystemen und Kommunikation basierte Identifizierung (Blackboard-Lokalisierung)“ wurde über die gesamte Laufzeit von der Forschungsinstitution IFL - Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme bearbeitet. Verantwortlich für die Projektleitung bei der Forschungsstelle war die Fachgruppe „Robotik und Interaktive Systeme“. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass jahrelange Erfahrungen in den Bereichen fahrerlose Transportsysteme, Lokalisierung und Bildverarbeitung in die Projektergebnisse einfließen.

Forschungsstelle:

ILF – Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme
Gotthard-Franz-Straße 8
76131 Karlsruhe

Leiter der Forschungsstelle

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans
Institutsleitung
Gotthard-Franz-Straße 8, 76131 Karlsruhe

Projektbearbeiter

Maximilian Hochstein, Dipl.-Ing.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Abteilungsleiter
der Fachgruppe Fördertechnik des IFL
Gotthard-Franz-Straße 8, 76131 Karlsruhe
Tel: 0721 608 48665
Email: maximilian.hochstein@kit.edu