

# Abschlussbericht

|   |  |
|---|--|
| Zuwendungsempfänger:<br><b>Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.</b><br><b>Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Kompetenzfeld Materialflusstechnik und -systeme</b><br><b>Sandtorstr. 22, 39106 Magdeburg</b> | Förderkennzeichen:<br><b>03VNE2063D</b>  |
| Vorhabenbezeichnung:<br><b>RavE-Bike - <u>R</u>uf- und <u>L</u>eitsystems für <u>a</u>utonomie <u>v</u>ernetzte <u>E</u>-<u>B</u>ikes</b>   | Teilvorhabenbezeichnung:<br><b>RavE-Bike-Sense - Bildbasierte Umgebungswahrnehmung</b>                       |
| Laufzeit des Vorhabens:<br><b>von: 16.04.2018 bis: 15.06.2021</b>   |  |
| Berichtszeitraum:<br><b>von: 16.04.2018 bis: 15.06.2021</b>   |  |
| Erstellt am:<br>13.12.2021  | <b>Klaus Richter</b><br>Digital unterschrieben<br>von Klaus Richter<br>Datum: 2021.12.13<br>12:15:16 +01'00' |

## Inhalt

|         |   |    |
|---------|---|----|
| I.      | Kurzdarstellung .....   | 5  |
| I.1     | Aufgabenstellung .....  | 5  |
| I.1.1   | Ziel des Gesamtvorhabens .....  | 5  |
| I.1.2   | Wissenschaftliche und/ oder technische Arbeitsziele .....   | 6  |
| I.2     | Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....  | 7  |
| I.2.1   | Konsortialstruktur .....  | 7  |
| I.2.2   | Vorarbeiten und Expertise, die in das Vorhaben eingebracht wurden .....   | 7  |
| I.3     | Planung und Ablauf des Vorhabens .....  | 9  |
| I.4     | Wissenschaftlicher/technischen Stand, an den angeknüpft wurde .....   | 10 |
| I.4.1   | Stand der Wissenschaft und Technik .....  | 10 |
| I.4.1.1 | Bildverarbeitung und Bildanalyse .....  | 10 |
| I.4.1.2 | Logistik und Materialflusstechnik .....   | 11 |
| I.4.1.3 | Kooperative Systeme .....   | 12 |
| I.4.1.4 | Übersicht zur aktuellen Patentsituation .....   | 12 |
| I.5     | Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....  | 13 |
| II.     | Eingehende Darstellung .....  | 14 |
| II.1    | Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen .....   | 14 |
| II.1.1  | Arbeitspaket 1: Spezifikation der Anwendungsszenarien .....   | 14 |
| II.1.2  | Arbeitspaket 4: Verarbeitungsplattform für Echtzeit-Bildanalyse.....  | 16 |
| II.1.3  | Arbeitspakete 7, 9 und 10: Sensordatenallokation und Lokalisation;<br>Systemintegration und Tests; Probetrieb, Evaluation und Optimierung ..... | 19 |
| II.2    | Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....  | 43 |
| II.3    | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....   | 43 |
| II.4    | Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im<br>Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....              | 44 |
| II.4.1  | Geplante Ergebnisverwertung .....   | 44 |
| II.4.2  | Wirtschaftliche Erfolgsaussichten mit Zeithorizont.....   | 44 |
| II.4.3  | Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten mit Zeithorizont.....   | 45 |
| II.4.4  | Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....   | 46 |
| II.5    | Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....   | 46 |
| II.6    | Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen .....   | 47 |
| III.    | Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht, der nicht veröffentlicht wird .....   | 47 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Verzahnung der Arbeitspakete des Projekts „RavE-Bike“ .....   | 9  |
| Abbildung 2: Entwicklungen des globalen 3D-Kameramarkts .....  | 11 |
| Abbildung 3: Vergleich der neuen technologischen Ansätze mit der Lasertechnologie .....  | 11 |
| Abbildung 4: Kameraeinsatz in der Intralogistik. Kameras werden über Kommissionierungsarbeitsplätzen installiert und so Bearbeitungsschritte dokumentiert. Nachträglich kann in den Datensätzen recherchiert werden. ....  | 11 |
| Abbildung 5: Wetterverhältnis – mittlere Temperatur.....   | 15 |
| Abbildung 6: Wetterverhältnis – mittlere Tagessumme an Sonnenstunden. ....   | 15 |
| Abbildung 7: Softwareentwurf der bildbasierten Umgebungserfassung.....   | 18 |
| Abbildung 8: Erkennung von bewegten Objekten in Kamerabild. Parkende Fahrzeuge, welche nicht in Bewegung sind, werden von der bewegungserkennenden Bildanalysefunktion nicht erfasst (unten Mitte), diese werden auf Grund ihrer vorherigen Bewegung im Objekttracking behandelt ..... | 20 |
| Abbildung 9: Verortung von Objekten im Raum.....   | 20 |
| Abbildung 10: Koordinatensysteme im Hafengebiete .....   | 21 |
| Abbildung 11: Beispielhafte Virtuelle Draufsicht des Testgeländes auf Basis kalibrierter Kameradaten.....  | 21 |
| Abbildung 12: 3D-Modell des Testgeländes .....   | 21 |
| Abbildung 13: Übersicht relevanter Koordinatensysteme .....  | 22 |
| Abbildung 14: Ausschnitt aus Livox Mid 40 Abtastmuster .....   | 24 |
| Abbildung 15: Bewegungsschatten (rot) einer bewegten Person im Vergleich unterschiedlicher Integrationszeiträume.....  | 24 |
| Abbildung 16 Umwelterfassung mit Lidar Mid40 im Hafengebiete (links Farbbild zur Veranschaulichung der Situation, rechts: Punktdaten farblich kodiert nach Höhe über Grundebene) .....   | 24 |
| Abbildung 17: Durch Erschütterung ist die Orientierung der Punktwolke beeinträchtigt. Effekt des Virtual Gimbals (oben mit, unten ohne) beim Überqueren eines Bordsteins.....  | 26 |
| Abbildung 18: Testaufbau für intrinsische Kamerakalibrierung der Stereo-Kameras.....   | 26 |
| Abbildung 19: Testaufbau für extrinsische Kalibrierung des LiDARs und der Stereo-Kameras .....   | 27 |
| Abbildung 20: MIDI Mixer zum effizienten manuellen Einstellen von Parametern .....   | 28 |
| Abbildung 21: Effekt von verschmutzten Kameras (links verschmutzt, rechts gereinigt) .....   | 28 |
| Abbildung 22: Installierte Sensorik am RavE-Bike Prototypen, Zwischenstand im Projektverlauf.....  | 30 |
| Abbildung 23: Performancegewinn bei der iterativen Entwicklungen.....  | 31 |
| Abbildung 24: Best Paper Award Certificate für veröffentlichtes Paper .....  | 31 |
| Abbildung 25: Sensorfusion und Objektsegmentierung.....  | 32 |
| Abbildung 26: „Flying Point“ Filter.....   | 33 |
| Abbildung 27: CCA Objektsegmentierung.....   | 34 |
| Abbildung 28: Sichtbereich Livox Horizon, Quelle <a href="https://www.livoxtech.com/de/horizon">https://www.livoxtech.com/de/horizon</a> ..  | 36 |
| Abbildung 29: Sichtbereich Livox Horizon verglichen mit Aufnahmen des Livox Mid40 .....  | 37 |
| Abbildung 30: Entworfenen Sensorhalterung für den erweiterten Sichtbereich.....  | 38 |
| Abbildung 31: Fertiggestellte Sensorhalterung für den erweiterten Sichtbereich.....  | 39 |

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Teilprojekt von IFF im Verbundprojektes „RavE-Bike“ .....                               | 6  |
| Tabelle 2: Ziele des TP 4 im Verbundvorhabens „RavE-Bike“ .....                                    | 6  |
| Tabelle 3: Projektpartner des Verbundprojektes „RavE-Bike“ .....                                   | 7  |
| Tabelle 4: Teilprojekte des Verbundprojektes „RavE-Bike“ .....                                     | 7  |
| Tabelle 5: Rolle des Projektpartners im Verbundprojekt .....                                       | 10 |
| Tabelle 6: Übersicht der Erprobungspartner .....   | 13 |
| Tabelle 7: Vergleich von RavE-Bike mit ähnlich gelagerten Szenarien .....                          | 16 |
| Tabelle 8: Beobachtete Sensorfehler im mobilen Betrieb .....                                       | 36 |
| Tabelle 9: Für Kollisionsvermeidung relevante Multi-Objekt-Tracking Metriken .....                 | 41 |
| Tabelle 10: Benchmark Ergebnisse des Multi-Objekt-Tracking Verfahrens für Rave-Bike RaveRRect..... | 42 |
| Tabelle 11: Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....                           | 43 |
| Tabelle 12: Verwertungskonzept des Antragstellers .....  | 44 |

# I. Kurzdarstellung

## I.1 Aufgabenstellung

### I.1.1 Ziel des Gesamtvorhabens

Systeme autonomer, vernetzter Beförderungskapazitäten mit Verkehrsmitteln eröffnen die Möglichkeit, eine **Beförderung von A nach B als Mobilitätsdienst** bereitzustellen. Man bestellt ein verfügbares Verkehrsmittel zu einem bestimmten Zeitpunkt an den Ausgangspunkt der Fahrt, nimmt die Beförderungsleistung in Anspruch und gibt es am Zielpunkt wieder frei. Die Vorteile liegen neben der kostengünstigen und effizienten Auslastung von gemeinsam genutzten Fahrzeugflotten in der permanenten Verfügbarkeit und dem reduzierten Parkplatzbedarf im urbanen Verkehrsraum<sup>1</sup>. Grundlagen für diese Vision sind die **Automatisierung des gesamten Fahrprozesses** und eine **effiziente Koordination der vernetzten Entitäten**. Ausgehend von der Komplexität der dabei wirkenden ingenieurwissenschaftlichen Herausforderung erfolgte die Umsetzung dieser Rufservicekonzepte für automotive Szenarien bislang nur in Projektstudien mit einzelnen Fahrzeugen<sup>2</sup>.

Mit der Übertragung dieser Konzepte auf autonom agierende Fahrräder kann diese Form der Mobilitätsorganisation erstmals vollständig umgesetzt und in allen Aspekten – Sicherheit, Effizienz, Nutzerakzeptanz – in einem **interdisziplinären Reallabor** greifbar gemacht werden. Analog zum Kfz-Szenario bewegt sich ein mit einem Elektromotor betriebenes, **autonomes Fahrrad** auf Anforderung selbstständig zum Nutzer, wird dann vom Fahrer mit Antriebsunterstützung zu einem gewünschten Fahrziel bewegt, um danach freigegeben zu werden und die nächste Anforderung zu bedienen. Es ist geplant, dass eine erste Realisierung des Konzepts anhand eines **Anwendungsszenarios** auf einem **Industriegelände** (Magdeburger Hanse-Hafen) vorgenommen wird, anhand dessen die wissenschaftlich technischen wie auch gesellschaftlichen Kernfragen eines Rufsystems untersucht werden können. Im Rahmen des Szenarios wird das Rufkonzept auf einen industriellen Rahmen übertragen. Der Magdeburger Hanse-Hafen hat eine Ausdehnung von ca. 625 ha, auf der Stück- und Schüttgüter umgesetzt werden. Teile der internen Mitarbeitermobilität werden über Kraftfahrzeuge und Fahrräder umgesetzt. Das Szenario zeichnet sich durch die Vielzahl logistischer Transport-, Umschlag- und Lagerungsoperationen auf einer heterogenen Flächennutzung (große Freiflächen, Containerlager, Schüttgutbereich) mit veränderlichen Nutzungsgeometrien aus. Eine wichtige Anwendung stellt der innerbetriebliche Warenverkehr für Instandhaltungs- und Wartungsprozesse durch die Einbindung der Fahrräder in die Werkslogistik dar. Im Rahmen des Projektes soll ein Probetrieb mit 3 bis 5 automatisierten, auf die industrielle Anwendung zugeschnittenen, Fahrradsystemen umgesetzt werden.

Die zwei zentralen technologischen Herausforderungen bestehen darin, **das vernetzte Szenario effizient und handhabbar umzusetzen** und dabei die **funktionale Sicherheit des autonomen Verhaltens** in einer komplexen und sich ggf. rasch verändernden Umgebung abzusichern. Dazu sind Lösungen für Fragestellungen (verteilte Umgebungserfassung, sicherheitsorientierte Architekturkonzepte, etc.) zu entwickeln, die auch im Kontext autonomer Kraftfahrzeuge oder im Bereich der Outdoorrobotik **Gegenstand aktueller Forschung** sind.

Allerdings lassen sich die Lösungsansätze aus den benachbarten Domänen wegen der unterschiedlichen Randbedingungen (Flexibilität des Einsatzraumes, Performance reingebetteter Systeme) nur teilweise anwenden. Entsprechend ist eine Forschungsleistung auf Komponenten-, Integrations- und Anwendungsebene notwendig, um alle Facetten im Kontext des Sze-

narios abdecken zu können. Um die Komplexität der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems trotzdem handhabbar zu gestalten, wird die Komplexität der Anwendung entsprechend beschränkt (z. B. bekannte Eigenschaften der Wege, weitgehend abgeschlossene Areale, kein Betrieb bei Dunkelheit, Umsetzung als Dreirad).

Die Realisierung der gesteckten Ziele erfolgt im Rahmen eines Verbundprojekts mit vier Teilprojekten (TPs). Das Fraunhofer IFF bearbeitet das TP 4 (siehe hierzu Tabelle 1).

Tabelle 1: Teilprojekt von IFF im Verbundprojektes „RavE-Bike“

| Partner | TP-Nr. | Bezeichnung des Teilprojekts      | Akronym         |
|---------|--------|-----------------------------------|-----------------|
| IFF     | TP 4   | Bildbasierte Umgebungswahrnehmung | RavE-Bike-Sense |

Um die gesteckten Ziele zu erreichen, muss das FuE-Vorhaben den Stand der Technik erweitern und setzt dabei insbesondere auf ein **vernetztes System** von E-Bikes, internen als auch externen Sensoren sowie den Mensch-Maschine-Schnittstellen, in dem die E-Bikes in Abhängigkeit von der Qualität der Konnektivität (Netzabdeckung, Bandbreite und Jitter) adaptiv entweder allein, als Cluster oder als Gesamtsystem wirken. Die Aspekte der **Koordination und Vernetzung** bilden die Grundlage für den effizienten Betrieb des Systems in Abhängigkeit von den Randbedingungen (veränderte Streckenführungen, variierende Nachfragen, interner Systemzustand) und der Sicherheit der Applikation, wenn beispielsweise zusätzlich zur internen Sensorik infrastrukturelle Kameras genutzt werden, um im Zusammenwirken mit unnetzten Personen und Fahrzeugen sicher autonom navigieren zu können.

Auf der Ebene der **Mensch-Maschine-Interaktion** wird die Wahrnehmung der autonomen Elemente und des Rufsystems insgesamt erforscht. Dabei gilt es die Erwartungshaltung der am innerbetrieblichen Verkehrsgeschehen beteiligten Mitarbeiter (d.h. sowohl Fußgänger, Radfahrer und Nutzer von herkömmlichen Verkehrsmitteln als auch Nutzer des RavE-Bike-Systems) zu berücksichtigen und eine hohe **Akzeptanz des Systems** sicherzustellen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung fließen in die Entwicklung der Hard- und Software des Projektes ein. Das Projekt „RavE-Bike“ leistet damit Pionierarbeit im Bereich des vernetzten autonomen Fahrens, weil erstmalig ein Rufsystem auf der Basis autonomer Entitäten als Ganzes etabliert und evaluiert wird. Die gesammelten Erkenntnisse bezüglich der Umsetzung und des Betriebes liefern einen wichtigen Beitrag zur **Weiterentwicklung urbaner Mobilität**, die für die Umsetzung anderer Rufsysteme herangezogen werden können.

### I.1.2 Wissenschaftliche und/ oder technische Arbeitsziele

Tabelle 2 gibt einen Überblick zu den wissenschaftlichen/technischen Arbeitszielen des TP4.

Tabelle 2: Ziele des TP 4 im Verbundvorhabens „RavE-Bike“

| Partner | Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele  |
|---------|---|
| IFF     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwurf und Implementierung eines variablen Kamerakonzepts für die infrastrukturelle und mobile Outdoor-Umgebungsanalyse</li> <li>• Logistische Planung und Evaluation des Rufsystems</li> <li>• Methoden und Technologien zur Mensch-Maschine-Interaktion für das einzelne Fahrradsystem und die Gesamtapplikation</li> </ul> |

## I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

### I.2.1 Konsortialstruktur

Die Realisierung der gesteckten Ziele erfolgte im Rahmen des Verbundprojekts „RavE-Bike“ mit vier Teilprojekten. Die beteiligten Projektpartner sind in Tabelle 3, die Teilprojekte in Tabelle 4 aufgeführt.

**Tabelle 3: Projektpartner des Verbundprojektes „RavE-Bike“**

| Name der Einrichtung   | Kürzel | Standort  |
|--|--------|-----------|
| Pedalpower GmbH  | PP     | Berlin    |
| Thorsis Technologies GmbH  | TT     | Magdeburg |
| Otto-von-Guericke-Universität,<br>- Fakultät für Maschinenbau, Institute für Mobile Systeme                          | OVGU   | Magdeburg |
| Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF,<br>- Kompetenzfeld Materialflusstechnik und -systeme | IFF    | Magdeburg |

**Tabelle 4: Teilprojekte des Verbundprojektes „RavE-Bike“**

| Partner | TP-Nr. | Bezeichnung des Teilprojekts                  | Akronym         |
|---------|--------|---|-----------------|
| PP      | TP 1   | Mechanisches Baukastensystem                  | RavE-Bike-Mech  |
| TT      | TP 2   | Sensorik und Kommunikation                    | RavE-Bike-Comm  |
| OVGU    | TP 3   | Pfadplanung und kontextsensitive Koordination | RavE-Bike-Plan  |
| IFF     | TP 4   | Bildbasierte Umgebungswahrnehmung             | RavE-Bike-Sense |

### I.2.2 Vorarbeiten und Expertise, die in das Vorhaben eingebracht wurden

Das 1992 in Magdeburg gegründet Fraunhofer IFF, **Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung** ist ein eigenständiges Institut im Netzwerk der Fraunhofer-Gesellschaft. Die Abteilung Materialflusstechnik des IFF entwickelt und implementiert funk- und bildbasierte Sensor-Lösungen und Produkte für die Identifikation, Lokalisierung und Zustandserfassung beliebiger Objekte, für Produktion/Materialflusstechnik, Transport und Frachtverkehre/Logistik. Durch die Verbindung von Indoor-Ortungstechnologien mit Outdoor-GNSS-Lösungen wird neues Optimierungspotential für die Gestaltung von Material- und Personenströmen auch im Produktionsumfeld erschlossen.<sup>3</sup>

Technische Lösungen für die funk- und videobasierte Identifikation, Lokalisierung und Zustandserfassung von Waren, Betriebsmitteln und Personen in der Intra- und Transportlogistik sind ein Entwicklungsschwerpunkt auf dem Weg zur Digitalen Logistik.

Das Fraunhofer IFF unterstützt Kunden in den verschiedenen Phasen der Analyse, Konzipierung, Entwicklung und Umsetzung von Projekten, diese funk- und bildbasierten Technologien anzupassen und in Infrastruktur oder Betriebsmittel zu integrieren. Dabei kann das Institut auf umfangreiche Projekterfahrungen aus öffentlichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten sowie Industrieprojekten vorweisen.



Entsprechende Vorarbeiten im Bereich der Nutzung der Tiefenbildsensorik wurden im Kompetenzfeld Materialflusstechnik und -systeme MFT insbesondere in den nachfolgend genannten Verbundprojekten entwickelt:

- BMBF - Forschung für die zivile Sicherheit – Bekanntmachung Sicherheitskritische Verkehrsinfrastrukturen: FLUSS – Flughafen-Sicherungs-System (Laufzeit 2008 - 2010), Teilthema: Erkennung von Nicht zuordenbaren Gepäckstücken NZG im Flughafenterminal mit Tiefenbildsensorik.
- BMBF - Forschung für die zivile Sicherheit – Bekanntmachung Sicherung von Warenketten: TRANS4GOODS Sicherheit im Güterlandtransport mittels sicherer Informationsmuster an der Fracht (Laufzeit 2010 - 2013). Definition eines Frachtfingerprints für Paletten unter Verwendung von Tiefenbildsensorik
- BMBF - Forschung für die zivile Sicherheit – Bekanntmachung Luftfahrtsicherheit: eSecLog - Erweiterte Sicherheit in der Luftfrachtkette (Laufzeit 2013 - 2016). Definition eines Frachtfingerprints für beliebige Luftfracht unter Verwendung von Tiefenbildsensorik.
- Das Forschungsprojekt ViERforES ist ein vom BMBF unterstütztes Vorhaben im Rahmen der Initiative »Spitzenforschung und Innovation aus den neuen Ländern« und es ist eingebunden in die Innovationsallianz Virtuelle Techniken des BMBF. Aus dem Forschungs- und Entwicklungsprojekt „ViERforES - Virtuelle und Erweiterte Realität für höchste Sicherheit und Zuverlässigkeit von Eingebetteten Systemen“ (<http://www.vierfores.de/> - Anwendungsschwerpunkt Materialflusstechnik) werden Erkenntnisse übernommen, die die Sicherheit von funk- und videobasierten Anwendungen unter den Bedingungen nichtkooperativer Messsituationen ansprechen. Wissenschaftler der Otto-von-Guericke-Universität arbeiten gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut IFF in Magdeburg und Kollegen aus Kaiserslautern an Konzepten, die Hersteller künftig bei der Optimierung ihrer Produkte durch virtuelle Realitäten unterstützen sollen. (Laufzeit 2009 - 2013)
- FuE-Projekt FahrAssist - Erweiterte Fahrassistenz für Transportwagen in der Intralogistik. Ziel des FuE-Projektes ist der Aufbau einer Forschungs- und Demonstrationsplattform für die Mensch-Technik-Interaktion am Beispiel von Transport- und Kommissionierwagen mit tätigkeitsübergreifender informationstechnisch-körperlicher Assistenz für Produktions- und Logistikaufgaben.

Zur Bearbeitung von Forschungsaufträgen stehen modernste Laborausstattungen und 5.000 m<sup>2</sup> Büro- und Laborfläche zur Verfügung. Auf einer Technikumsfläche von 1.300 m<sup>2</sup> steht eine anwendungsnahe Infrastruktur zum Test technischer Systeme zur Verfügung. Zudem wurde 2010 in Magdeburg mit dem Entwicklungslabor und der Logistikplattform die beiden zentralen Versuchsfelder des Galileo-Testfelds Sachsen-Anhalt eingeweiht. Im Galileo-Testfeld arbeiten die Forscher des Fraunhofer IFF zusammen mit anderen Forschern an der Entwicklung integrierter Anwendungen für die Verkehrs- und Logistikbranche, den öffentlichen Nahverkehr, die Telematik und die funkgestützte Kommunikation. Seit 2015 befindet sich im Galileo-Testfeld Sachsen-Anhalt zudem das Applikationszentrum für intelligente Logistikräume, in dem praxisnah Versuche durchgeführt und entwickelte Prototypen präsentiert werden.

Die Weiterentwicklung des Themenfelds in Richtung Produktentwicklung ist nur in Zusammenarbeit mit privatwirtschaftlichen Unternehmen möglich, um die gewonnenen Erkenntnisse entsprechend vermarkten zu können. Eine reine Auftragsforschung für die am Projekt beteiligten KMUs wäre durch diese aber nicht finanzierbar. Fraunhofer IFF hat durch die prototypische Entwicklung verschiedener Scanlösungen, die auf Tiefenbildsensoren basieren, bereits eine positive Haltung seitens der Instandhaltungs- und Logistikunternehmen für den



Einsatz dieser Technologie geschaffen. So wurde 2014 der Trendreport „LowCost Sensorik für die Logistik“<sup>4</sup> für die DHL entwickelt, das auch Aussagen zum Einsatz der Tiefenbildtechnologie enthalten wird. Hon.-Prof. Richter ist persönliches Mitglied der Fokusgruppe „Aufbruch in die Gigabitgesellschaft“ im Digitalgipfelprozess der Bundesregierung und hat aus der Fokusgruppe heraus das Initiativprojekt „Leuchtturmprojekt Logistik“ initiiert, das auf die Nutzung neuer 5G-Technologien in der Logistik fokussiert.<sup>5</sup>

Hon.-Prof. Richter ist Mitglied des Leitungsteams im Zwanzig20-Cluster „FAST“, einem Forschungscluster zur Entwicklung von Technologien und Anwendungen mit der neuartigen 5G-Konnektivität.

Weiterhin ist die Kooperation in dem Projekt notwendig, um anwendungsbereites Wissen in die Weiterentwicklung von Lehrveranstaltungen an der Universität Magdeburg zu integrieren, die durch Hon.-Prof. Richter in Personalunion konzipiert und durchgeführt werden.

### I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die FuE-Arbeit im Projekt „RavE-Bike“ gliedert sich in 10 Arbeitspakete (APs), wobei diese aufeinander aufbauen und sich ergänzen. Die Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Ablauf der Umsetzungskette mit den für das jeweilige Arbeitspaket verantwortlichen Partnern.

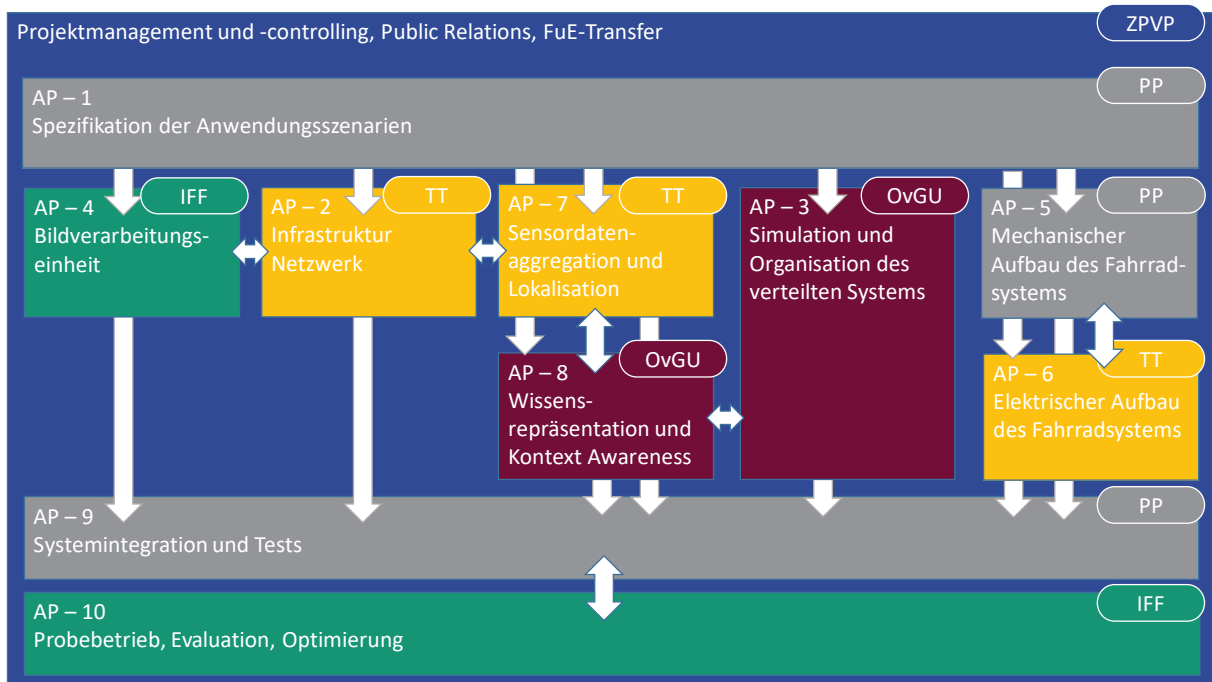


Abbildung 1: Verzahnung der Arbeitspakete des Projekts „RavE-Bike“

Die Tabelle 5 gibt einen Überblick, welche Rolle das Fraunhofer IFF im Rahmen des Verbundprojektes „RavE-Bike“ oblag, in welchen Arbeitspaketen sie involviert war und welche APs sie leitete.

Tabelle 5: Rolle des Projektpartners im Verbundprojekt

| Partner | Rolle des Projektpartners   | Involvierte in AP        | Leiter von AP |
|---------|---|--------------------------|---------------|
| IFF     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Modellierung des Vorhabens als Logistik-anwendung, Bildverarbeitung, Verarbeitungsplattform Umgebungswahrnehmung, Entwurf und Erprobung eines Nutzer-(Mitarbeiter)-Interfaces, Mensch- Maschine-Interaktion</li> </ul> | AP1, AP4, AP7, AP9, AP10 | AP4, AP10     |

## I.4 Wissenschaftlicher/technischen Stand, an den angeknüpft wurde

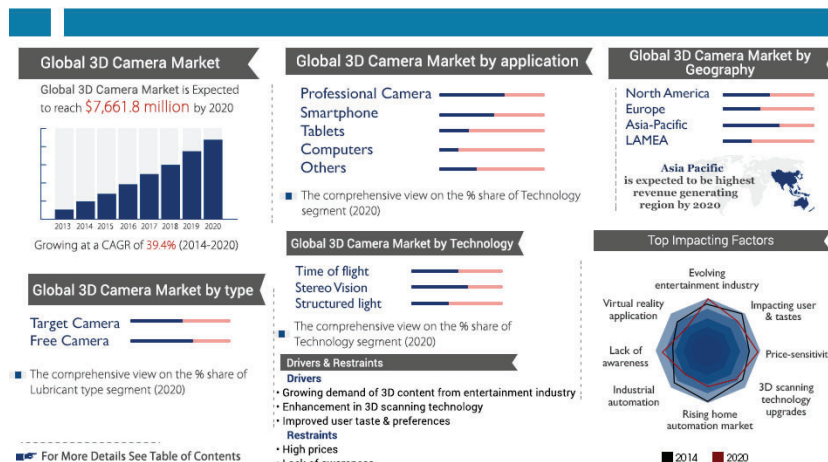
### I.4.1 Stand der Wissenschaft und Technik

#### I.4.1.1 Bildverarbeitung und Bildanalyse

Im Forschungsbereich Bildanalyse und Bildverarbeitung treten - ausgelöst von neuen Möglichkeiten im Hardwarebereich (Megapixelkameras, Hardwarebeschleunigung) - neue Verfahren der 3D-Umgebungsrekonstruktion in den Fokus. Bzgl. der stereobasierten 3D-Rekonstruktion an Fahrzeugen wird aktuell beforscht, welche Kamerakonfigurationen zu einer möglichst kompletten Rekonstruktion führen.<sup>6</sup> Zudem werden neue Verfahren für eine möglichst dichte 3D-Rekonstruktion auf Basis von Weitwinkelobjektiven implementiert und evaluiert<sup>7</sup>. Weiterhin ist der Trend zu beobachten, ToF-Kameras und Musterprojektionskameras zunehmend zur 3D-Analyse zu verwenden.<sup>8</sup> Diesem Aufgabengebiet widmet sich auch das FuE-Projekt FahrAssist des hier zugrundeliegenden ZIM-Netzwerkes „Assistenz in der Logistik“. Im Gegensatz zur stereobasierten 3D-Rekonstruktion arbeiten diese Verfahren auch bei texturloser Umgebung, haben aber Nachteile aufgrund der geringen Reichweite (<10m) und der gegenseitigen Störeinflüsse durch Überlagerungen der ausgesendeten Lichtmuster. Diese neuen bildbasierten Technologien besitzen aber grundsätzlich sehr hohes Potential, sich als heterogene Datenquellen für neue Wahrnehmungsmodule zu etablieren. Man geht derzeit davon aus, dass der globale Markt für derartige Sensoren bis 2020 auf fast 8 Mrd. Dollar wachsen wird, was sich positiv auf die Evolution der Basistechnologien und der Preisstruktur auswirken wird (siehe Abbildung 2).

### Global 3D Camera Market

Segmentation and Forecast, 2013 - 2020



### Abbildung 2: Entwicklungen des globalen 3D-Kameramarkts<sup>9</sup>

Aus der Perspektive der Sicherheitstechnik im industriellen Umfeld widmen sich derzeit etliche Forschungen dem Vergleich technologischer Ansätze mit der Lasertechnologie.<sup>10</sup> Konsens ist, dass derzeit die Lasertechnologie für derartige Anwendungen noch vorteilhaft und erprobt ist. Problematisch an der Lasertechnologie ist, dass das Anwendungsfeld auf sicherheitstechnische Aspekte begrenzt ist, und vorzugsweise Linienlaser genutzt werden, die wenig Potential für die Entwicklung weiterer kooperativer Funktionen besitzen.

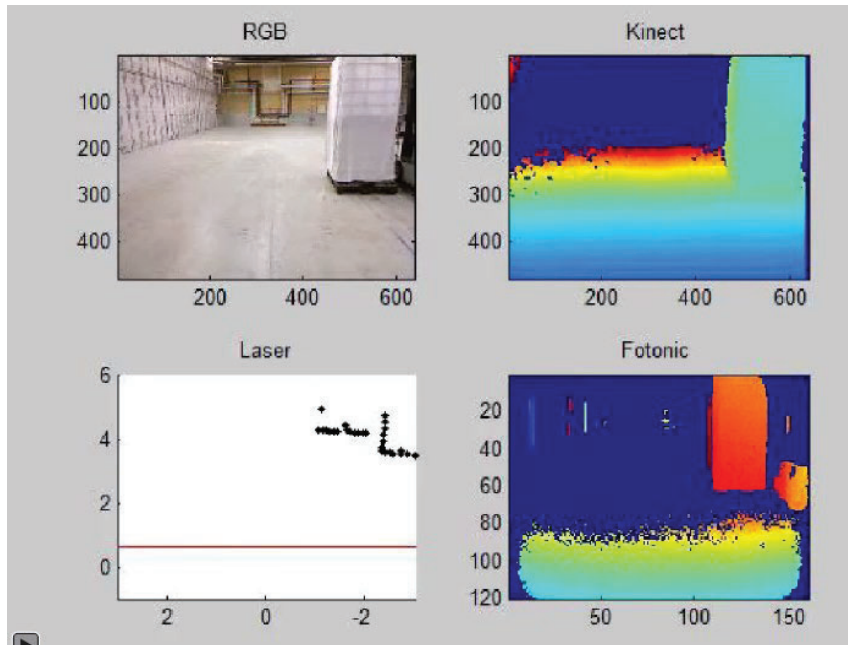


Abbildung 3: Vergleich der neuen technologischen Ansätze mit der Lasertechnologie<sup>11</sup>

#### I.4.1.2 Logistik und Materialflusstechnik

In die Intralogistik haben bildbasierte Technologien bislang nur punktuell Einzug gehalten. Kameramodule werden derzeit vor allem für Dokumentations- und Recherchezwecke im Rahmen von Reklamations- und Retourenmanagement eingesetzt (siehe Abbildung 8). Abbildung 4). Erweiterte Wahrnehmungsfunktionen auf Basis von verteilten, heterogenen Sensorstrukturen mit dem Ziel, Prozesssteuerung des Materialflusses im Mensch-Maschine-Umfeld in Echtzeit durchzuführen, sind Bestandteil verschiedener Forschungsarbeiten.<sup>12, 13, 14, 15</sup>

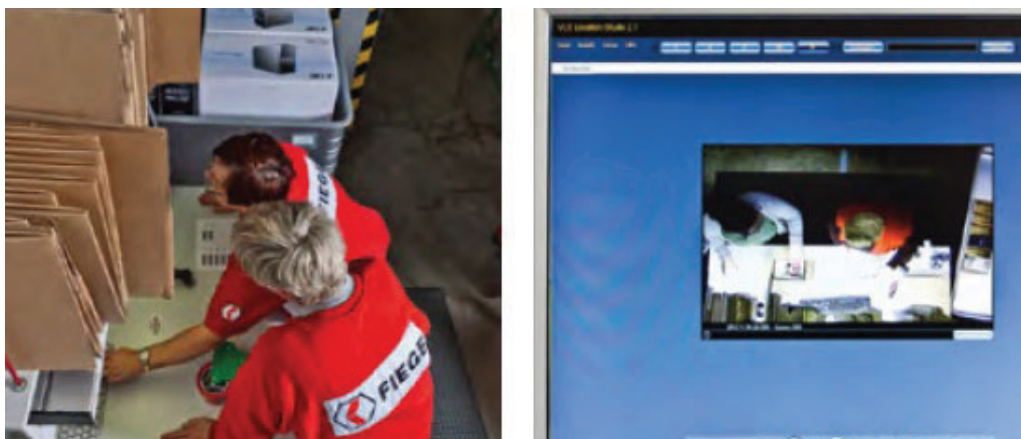


Abbildung 4: Kameraeinsatz in der Intralogistik. Kameras werden über Kommissionierungsarbeitsplätzen installiert und so Bearbeitungsschritte dokumentiert. Nachträglich kann in den Datensätzen recherchiert werden.

Zwar besteht die Möglichkeit, viele einzelne, isolierte Bausteine (eingebettete Rechnersysteme, Kameramodule, Vernetzungskomponenten), mit denen eine Umgebungswahrnehmung prinzipiell implementiert werden kann, zu integrieren. Diese sind aber bisher nicht ausreichend flexibel und robust auf logistische Betriebsmittel adaptierbar. Dies gilt insbesondere für größere Maschinen mit variablen Maschinenteilen, komplexere Szenen (Kreuzungen, Gassen, multimodale Verkehre) sowie für handgeführte Transportmittel mit kraftunterstützenden Systemen. Stattdessen werden Funktionen auf Basis von Umgebungswahrnehmung bisher ausschließlich mittels funkbasierter Ortung implementiert<sup>16</sup>. Somit befinden sich ausschließlich funktechnisch markierte Objekte im erweiterten Wahrnehmungsbereich der Transport- und Umschlagmittel, was die Entwicklung hin zu kooperativen Betriebsmitteln stark einschränkt.

#### **I.4.1.3 Kooperative Systeme**

Kooperative Transportsysteme (C-ITS cooperative intelligent transport systems) stellen aktuell einen innovativen Forschungs- und Entwicklungsbereich dar. Ideen und grundlegende Konzepte (Kommunikation, Ortung, Prädikation) bilden den Stand der Technik für das avisierte Projektvorhaben und werden im Kontext des Intelligenten Logistikraums evaluiert und beforscht. Insbesondere finden die Definitionen von Aramrattana<sup>17</sup> Anwendung und werden auf logistische Betriebsmittel übertragen und erweitert:

- Definition 1: C-ITS is a technical system that implements cooperative behaviour based on communication between two or more actors in the system.
- Definition 2: A cooperative behaviour includes two or more actors working towards a common or mutually beneficial goal, purpose, or benefit; enabled by interaction and information exchange between the actors.

#### **I.4.1.4 Übersicht zur aktuellen Patentsituation**

Es wurde eine Patentrecherche mit den Patentdatenbanken Patbase, Depatisnet und Espacenet durchgeführt. Wichtige Ergebnisse der Patentrecherche sind:

- Vehicle surround view system [Patent EP2554434 (B1)]
- Surround View System Camera Automatic Calibration [Patentanmeldung EP2523163 (A1)]
- Dense structure from motion [Patentanmeldung US 20140161323 (A1)]
- Calibration system and method for vehicular surround vision system [Patentanmeldung WO 2013074604 (A2)]
- Cooperative vehicle collision warning system [Patentanmeldung US20130154853 A1]
- Einrichtung zur Überwachung mindestens eines dreidimensionalen Sicherheitsbereichs [Patentanmeldung WO 2011128117 A2]

Es sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Schutzrechte bekannt, die durch das geplante FuE-Projekt verletzt werden. Die angestrebte Kombination spezifischer Hardwarekomponenten und Auswerteverfahren bietet das Potenzial für neue Schutzrechtsanmeldungen. Für die

gemeinsame Schaffung von neuen Schutzrechten werden rechtzeitig Vereinbarungen getroffen werden, die eine Verwertung durch die Beteiligten ermöglichen.

Das Fraunhofer IFF besitzt umfangreiche Erfahrungen im Umgang mit Schutzrechten. Diese Erfahrungen werden im Rahmen des Projekts genutzt, um diese Positionen abzusichern bzw. auszubauen. Insbesondere wird verwiesen auf:


- Fraunhofer IFF und Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg: System und Verfahren zur Kommunikation mit an Objekten anbringbaren Transpondern sowie Verwendung des Systems, DE 102006047356 B3

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Anforderungsanalyse und Erprobung erfolgte die Zusammenarbeit mit

- Transportwerk Magdeburger Hafen GmbH i.V.

**Tabelle 6: Übersicht der Erprobungspartner**

| Kurzprofil  |   |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Logistik-Partner und System-Dienstleister für multimodale Transportketten</li> <li>• größter Binnenhafen Mitteldeutschlands und auf Platz 10 der bundesdeutschen Häfen</li> <li>• Ausdehnung von ca. 625 ha, auf Stück- und Schüttgüter</li> <li>• z.Z. rd. 4 Mio. t Umschlagvolumen, jährlich steigend</li> </ul> | <p>Die Rolle des Erprobungspartners umfasst:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bereitstellung der Infrastruktur des Testgeländes (geschlossenes Gelände mit vielfältigen Teststrecken (Länge, Boden, Steigung usw.)</li> <li>• Zugang zu Nutzerdaten: Nutzer- und Mobilitätsbedürfnisse, Nutzergruppen, Nutzerverhalten</li> <li>• Werbung, Presse, Öffentlichkeitsarbeit, Entwicklung und Umsetzung von Vermarktung - und Nutzungskonzepten, Projektplanung und -management</li> </ul> |

## II. Eingehende Darstellung

### II.1 Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen

Das Projekt gliedert sich insgesamt in 10 Arbeitspakete. Das IFF bearbeitete davon AP1, AP4, AP7, AP9, und AP10

#### II.1.1 Arbeitspaket 1: Spezifikation der Anwendungsszenarien

##### Identifikation der relevanten Parameter

Identifikation der relevanten Einsatzbedingungen

Verkehrsteilnehmer auf dem Hafengelände:

- Fußgänger, Radfahrer, Binnenschiffer mit Haustieren u. Kinder
- diverse Staplertechnik, Enercon-Schwerstapler, Bagger, Radlader und zum Handling von Packstücken, Paletten und Stückgütern aller Art, 2 Reachstacker zum Handling von Containern, diverse Werkzeugwagen (Kfz)
- Krantechnik (Portalkran bis 50 t Last; Mobilkran bis 500 t Last; schienengebundener Kran, Schwerlastkran)
- LKW (Sattelzüge), PKW, Werksbahn (verschieden Typen; ziehend und schiebend im Einsatz)
- Täglich wechselnde Umschlagsgüter

Weitere Infrastrukturaspekte

- 4 Werkstore
- 10 Lichtmasten
- Kameratechnik (4fach Stapel können Kammersicht verdecken)
- an der Kaikante nummerierte Treppen aller 60 m

Bodenbeschaffenheit

- Pflastersteine, Beton, Asphalt
- zudem Gleisbereich, Schienen und offener Gleisbereich,
- Schotterfläche, Schlitzrinnen zur Entwässerung

Fahrbereich

- Keine ausgewiesenen Straßen, kein Rad- oder Fußweg
- Gelbe Linien markieren Gefahrgutbereich
- Weiße Linien markieren Fahrbereich
- Kaikante ist nicht gesichert, Kaikante ist metallisch; 6m tief



## Klima

- Magdeburg
- Durchschnittlich 9 Regentage pro Monat, im Jahr gleichbleibend

Die Klimadaten<sup>a</sup> bilden die Rahmenbedingungen für die vor Ort zu erwartenden Wetterverhältnisse.

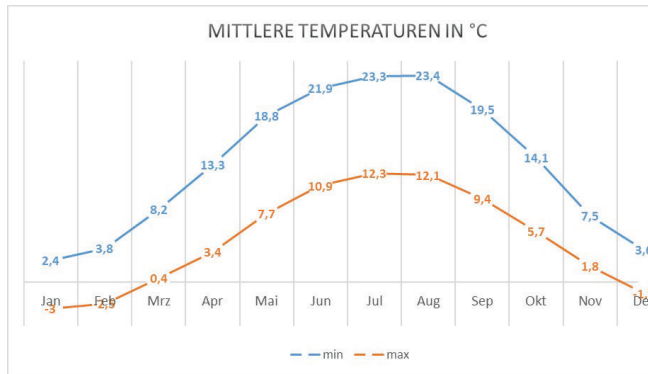


Abbildung 5: Wetterverhältnis – mittlere Temperatur.

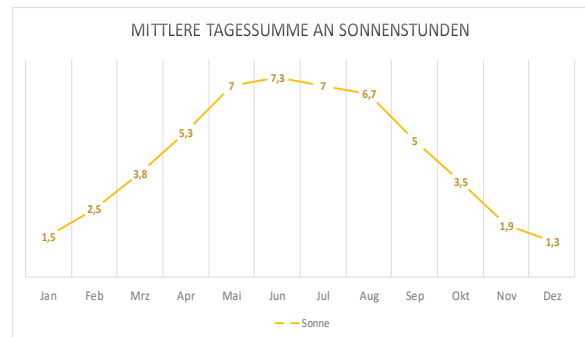


Abbildung 6: Wetterverhältnis – mittlere Tagessumme an Sonnenstunden.

Organisatorische und technische Rahmenbedingungen vor Ort:

Hafen verfügt über umfangreiche gedeckte Lagerflächen und Freilager für verschiedene Güter (Paletten, Stückgüter, Container, Wechselbrücken, Gefahrgut oder Massengüter und/oder massenhaftes Stückgut).

Die Lagerflächen werden elektronisch überwacht.

Das derzeitige Umschlagvolumen im Magdeburger Hafen beträgt rund 4 Mio. Tonnen jährlich mit steigender Tendenz. Damit ist Magdeburg der größte Binnenhafen Mitteldeutschlands und auf Platz 10 der bundesdeutschen Häfen.

Zur wasserstandsunabhängigen Anbindung der Magdeburger Hafenteile an das Wasserstraßenkreuz errichtete die Bundeswasserstraßenverwaltung eine Niedrigwasserschleuse im Rothenseer Verbindungskanal. Durch den Bau der Niedrigwasserschleuse ist der Magdeburger Hafen an 365 Tagen wasserstandsunabhängig bei 4,00 m Wassertiefe.

Die Freilager befinden sich fast ausschließlich am Wasser und haben ebenso Bahnanschluss. Zudem steht in den Lagerbereichen ausreichend Krantechnik zur Verfügung.

### Betriebszeiten / Testzeiten für RavE-Bike

Hafenbetrieb findet Wochentags bis 22:00 Uhr statt und samstags bis 14:00 Uhr; Aktivitätslevel ist wechseln – je nach Auftragslage.

Test ggf. am Wochenende oder bei ruhigem Hafenbetrieb; kurzfristige Abstimmung

<sup>a</sup> Quelle der Daten: wetter.de



### Kameratechnik des Hafens

Technisch grundsätzlich mit nutzbar; Datenverarbeitung geschieht auf Server im Hafen

Normale Nutzung der Kameratechnik im Hafen:

Tagsüber: Überwachung des Hafensbetriebes durch Hafenmitarbeiter

Nachts: Überwachung des Geländes bzgl. unbefugten Betretens, Aktivitäten durch Wachdienst

### Generische Szenariencharakterisierung

Tabelle 7: Vergleich von RavE-Bike mit ähnlich gelagerten Szenarien

|  | Mitgänger-Flurförderzeug | Automated Guided Vehicle AGV | Autonomous Mobile Robot AMR | Autonomes Lastenfahrrad | Assistenz für Pflege | RavE-Bike |
|--|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------|-----------|
| Personenmitnahme                               | (x)                      |                              |                             | x                       |                      | x         |
| Ladevolumen eines Standard-Transportwagen      | x                        | (x)                          | (x)                         |                         | x                    |           |
| Nachrüstfähigkeit für Transportwagen           | x                        |                              |                             |                         | x                    |           |
| Paralleler Hybridantrieb (Motor + Muskelkraft) | (x)                      |                              |                             | (x)                     | x                    | x         |
| Bediener in der Nähe (Notausfunktion)          | x                        |                              | (x)                         |                         | x                    | x         |
| Intuitives HMI (Taktile Griff)                 | (x)                      |                              |                             |                         | x                    | ?         |
| Umgebungs-erkennung (Lidar, Kamera, Radar)     |                          | x                            | x                           | x                       | x                    | x         |
| Folgefunktion Mensch (Fusserkennung)           |                          |                              | x                           |                         | x                    | ?         |
| Autonomer Transport                            |                          | x                            | x                           | x                       | (x)                  | x         |
| Trainingsfunktion für Bediener                 |                          |                              |                             |                         | x                    | ?         |

## II.1.2 Arbeitspaket 4: Verarbeitungsplattform für Echtzeit-Bildanalyse

### Anforderungsdefinition für bildbasierte Umgebungserfassung

Recherche notwendiger Umgebungswahrnehmungsfunktionen

Die Grenze des Befahrbaren, die Kaikante: Es bestand die Idee der Integration eines zusätzlichen Sensors zur Erkennung von Metall. Die Idee wurde jedoch verworfen, weil zu viele Metallgegenstände in der Umgebung sind (u.a. auch Schienen, Container) und weil nichtsicher gestellt werden kann, dass Sensor die Kante früh genug erkennt, um Bremsvorgang noch

rechtzeitig auszulösen. Als statisches „Hindernis“ wird sie stattdessen im Rahmen einer statischen Karte erfasst.

Schienen können für schmalrädige Fahrzeuge eine Herausforderung darstellen. Sie können jedoch relativ gut mit Kamera erkannt werden. Als statisches Objekt kann eine lokale Schienenenerkennung genutzt werden, das Fahrrad in der globalen statischen Karte zu lokalisieren. Diese teilweise verfügbare Lokalisationsquelle wird in der globalen Sensordatenfusion genutzt. Zusätzlich kann die genauere relative Lage des Fahrrads zu den Schienen bei der Planung des optimalen Fahrtweges genutzt werden.

Container bilden einen der häufigsten anzutreffenden Objekte im Hafeneinsatzgebiet. Mit diesen darf keine Kollision geschehen. Dies wird durch eine Definition eines sicheren Einsatzgebietes und eine lokale Erkennung gewährleistet. Die typischen Strukturen der Container sind mittels LIDAR als auch mittels RGB-Sensoren zu erkennen.

**Objekterkennung:** Mobile Hindernisse sind mit Bord-Sensorik zu erkennen: Fußgänger, Fahrzeuge, Container sind im Hafen ebenfalls mobil.

Statische Objekte: Es gibt im Umfeld eine Reihe statischer Objekte, die unmöglich ihre Position ändern können. Die größeren Objekte dieser Art werden in einer globalen statischen Karte des Einsatzgebietes erfasst, bzw. durch Definition des gültigen Fahrbereiches grundsätzlich vermieden und vom Einsatzgebiet ausgeschlossen. Die lokale Wahrnehmung statischer Objekte können als Landmarken genutzt werden, um eine teilweise globale Lokalisierung vorzunehmen. Es gibt jedoch auch kleinere statische Objekte, die vermieden werden müssen, die aber ohne eine lokale Erkennung eine hohe Konfidenz in der globalen Lokalisierung und Orientierung erfordern. Dies kann nicht in allen Fällen sichergestellt werden. Um Kollisionen zu vermeiden, ist also auch die lokale Erkennung einiger statischer Hindernisse erforderlich: Bäume, Maste, Säulen, Bodenlöcher.

Zur Objekterkennung sollen nicht nur RGB-Kameras, sondern auch LIDAR Sensoren genutzt werden. Dies soll eine sichere Erkennung auch kleinerer Objekte gewährleisten.

Erkennung unklassifizierter Hindernisse: Es sind auch Hindernisse, welche in den Sensoren sichtbar sind, jedoch nicht explizit vorher bedacht worden, als solche zu erkennen und auszugeben. Zur Erkennung dieser unbekanntes Hindernisse werden keine Annahmen über die Objekte getroffen. Stattdessen wird z.B. im LIDAR nach Punktmengen gesucht, welche den Weg versperren.

Die Positionen der in lokalen Sensorkoordinatensystemen erkannten Objekte müssen zur Verwendung in der Kollisionsvermeidung und Pfadplanung in metrische 3D-Positionen projiziert sowie deren Eigenbewegungen geschätzt werden.

Bildverarbeitungsalgorithmen zur Umsetzung der Umgebungswahrnehmungsfunktionen

- Kamera-Entzerrung
- Bildregistrierung / Koordinatensystemtransformation
- Objektdetektoren
  - mit Sensoren LIDAR und RGB(-D)-Kamera
  - klassifizierte Objekte: Menschen, Fahrräder, Hafen-Betriebsmittel, Container
  - unklassifizierte Objekte
- Optical-Flow zur Schätzung von Eigen- und Objektgeschwindigkeiten

- Lokalisierung in globaler Karte mit Landmarken und Odometrie
- lokales SLAM zum Update der globalen Karte
- Abgleich lokaler und globaler Karten

### Softwareentwurf bildbasierte Umgebungserfassung

Das grundlegende Bildverarbeitungskonzept basiert auf einem Detektions- und Trackingkonzept:

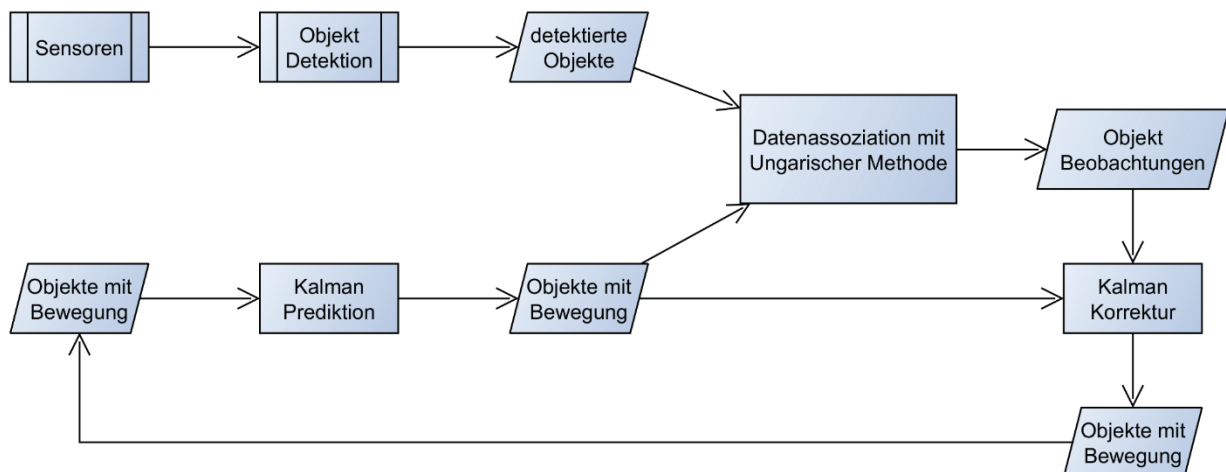


Abbildung 7: Softwareentwurf der bildbasierten Umgebungserfassung

Objektdetektionsalgorithmen verarbeiten Sensordaten und liefern lokal detektierte Objekte. Diese Objekte werden registriert und über die Zeit getrackt. Objekte, welche nicht zu jedem Zeitpunkt detektiert werden (z.B. durch Überdeckungen von anderen Objekten), wird so eine Persistenz verliehen. Die Bewegung der Objekte wird durch Vergleich mit alten Positionen und weiteren Verfahren (wie Optical-Flow) bestimmt und ermöglicht so eine Prediktion der Objekttrajektorien. Dies verbessert die Detektionsrate, erhöht die Rate, mit welcher Aussagen über Objekte gemacht werden (bis zu 100Hz-1000Hz statt 30Hz-60Hz, bei reiner Detektion in Kamerabildern) und dient zur weiteren Verwendung in der Hindernisvermeidung.

Die Recherche der notwendigen Bildverarbeitungsalgorithmen ergab eine Vielzahl relevanter vorhandener Forschungsergebnisse. Auf Grund der Fülle ist im Anhang ein Auszug aus den wichtigsten Quellen aufgeführt.

### Hardwareentwurf eingebettete Bildverarbeitungseinheit

Während der Entwicklung kommt eine überdimensionierte Bildverarbeitungshardware zum Einsatz, um den Anforderungen aller Versuche gerecht zu werden. Einer der genutzten Entwicklungsrechner hat beispielsweise folgende Spezifikationen: Intel i7-CPU, 16GB RAM, nVidia GeForce GTX 1080 Ti GPU. Weitere verwendete Rechner haben ähnliche Spezifikationen.

Die Auslegung der minimalen Anforderungen erfolgt im Laufe des Projektes. Die Portierung der Algorithmen ist auf produktnähere Hardware mit Benchmarks vorgesehen. Dazu wurden

mehrere Hardwareplattformen unterschiedlicher Leistungsklassen zur Durchführung der Benchmarks vorbereitet:

- Raspberry Pi 3b
- MarS-Board i.MX6
- Manifold / Nvidia Jetson TK1
- Intel NUC517R

### **II.1.3 Arbeitspakete 7, 9 und 10: Sensordatenallokation und Lokalisation; Systemintegration und Tests; Probetrieb, Evaluation und Optimierung**

Diese drei Arbeitspakete standen im ständigen Wechselspiel. Die Entwicklung wurde vervollständigt durch begleitende Tests, Evaluationen und Optimierungen über mehreren Entwicklungsstufen.

#### **Infrastrukturelle Objekterkennung**

Statisch platzierte Kameras wurden mit bewegungserkennenden Bildanalysefunktionen ausgestattet.

Dazu wurde eine Vielzahl an Hintergrundsubtraktionsalgorithmen<sup>b</sup> qualitativ auf ihre Anwendbarkeit zur infrastrukturellen Überwachung untersucht. Der beste wurde ausgewählt und auf Basis dessen eine Objekt-Detektion implementiert. Sobald Objekte nicht mehr in Bewegung sind, werden sie nicht mehr erkannt. Dieser Fall ist in Abbildung 1 an den parkenden Fahrzeugen in der Mitte/Unten des Kamerabildes zu sehen. Somit können die Ergebnisse der Objekterkennung nicht direkt verwendet werden. Stattdessen werden die Objektdetektionen genutzt, um ein Objekttracking durchzuführen. Objekte die anhalten, werden so nicht übersehen.

---

<sup>b</sup> Sobral, Andrews: A comprehensive review of background subtraction algorithms evaluated with synthetic and real videos, 2014. BGSLibrary, An OpenCV C++ Background Subtraction Library, 2013.

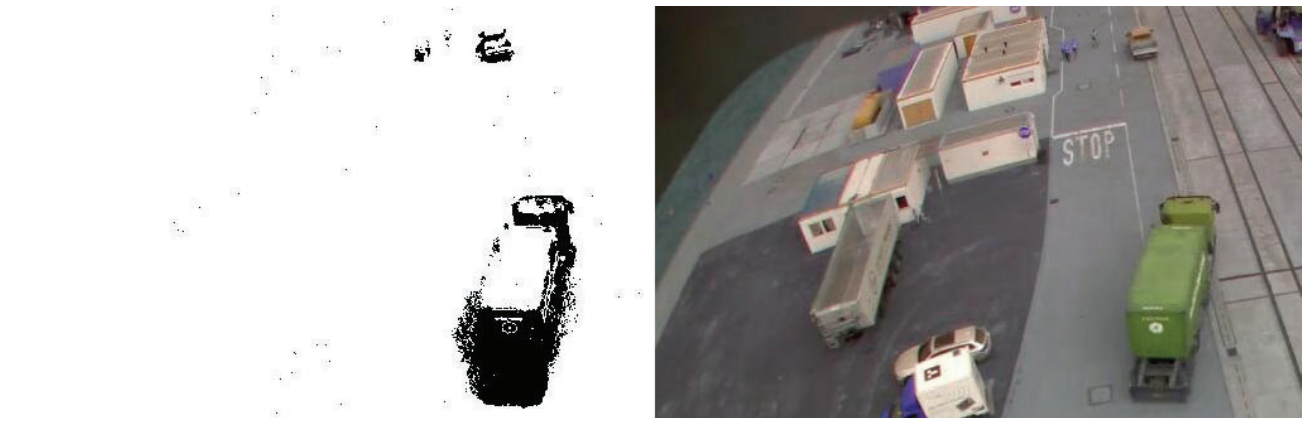


Abbildung 8: Erkennung von bewegten Objekten in Kamerabild. Parkende Fahrzeuge, welche nicht in Bewegung sind, werden von der bewegungserkennenden Bildanalysefunktion nicht erfasst (unten Mitte), diese werden auf Grund ihrer vorherigen Bewegung im Objekttracking behandelt

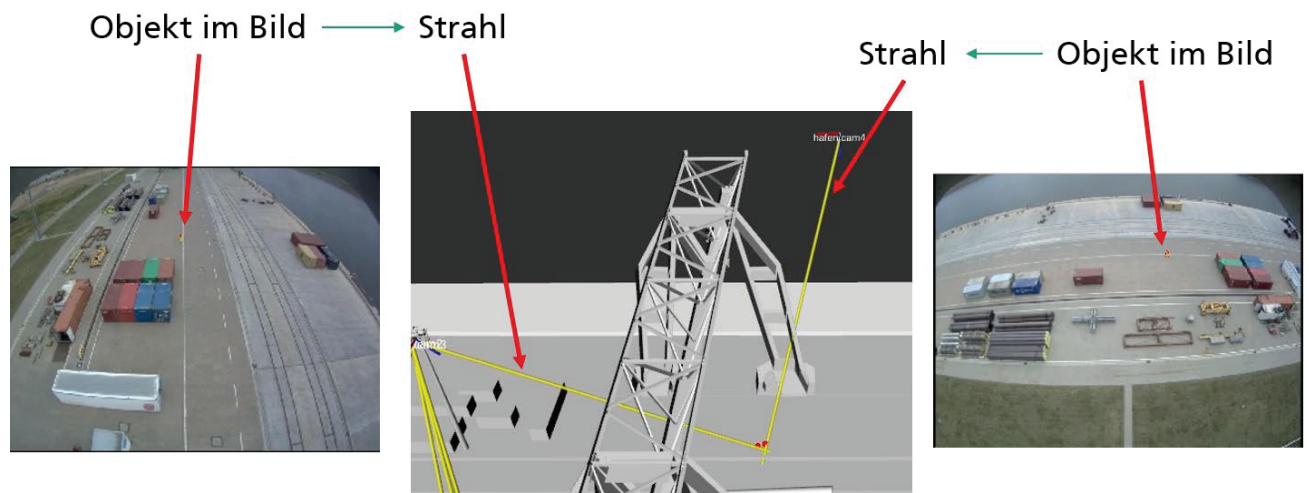


Abbildung 9: Verortung von Objekten im Raum

Objekte, welche in Kamerabildern erkannt werden, werden mit Hilfe der bekannten Kameraverzerrung und -lage in der 3D-Welt des Testgeländes verortet. Für jedes erkannte Objekt im Bild wird ein Strahl in den Raum projiziert, auf welchem das Objekt liegt. Der Schnittpunkt mit der Grundebene kann trivial berechnet werden. Objekte, welche in mehreren Kamerabildern zu sehen sind, bilden für jede Kamera einen Strahl. Diese Strahlen kreuzen sich an der Position des Objektes in der Welt. Veranschaulicht ist dieses Prinzip in Abbildung 2. Nötig ist dazu eine Kenntnis über die intrinsischen Kameraparameter, welche die Verzerrung und das Sichtfeld der Kamera kennzeichnen, sowie eine georeferenzierte Lage der Kameras im Raum.



## Kalibrierung von Infrastruktur-Kameras



Abbildung 10: Koordinatensysteme im Hafbereich



Abbildung 11: Beispielhafte Virtuelle Draufsicht des Testgeländes auf Basis kalibrierter Kameradaten

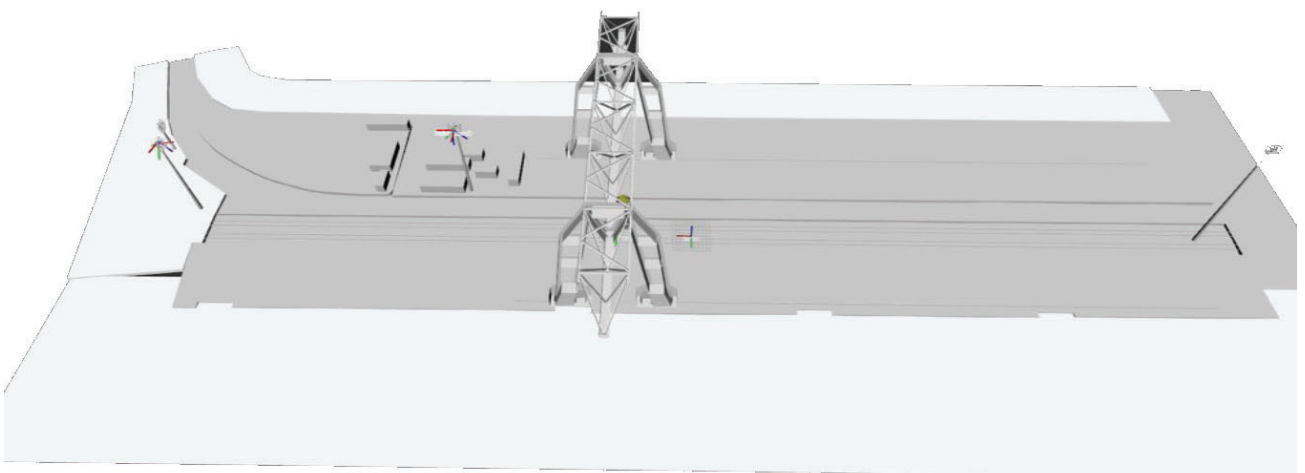


Abbildung 12: 3D-Modell des Testgeländes

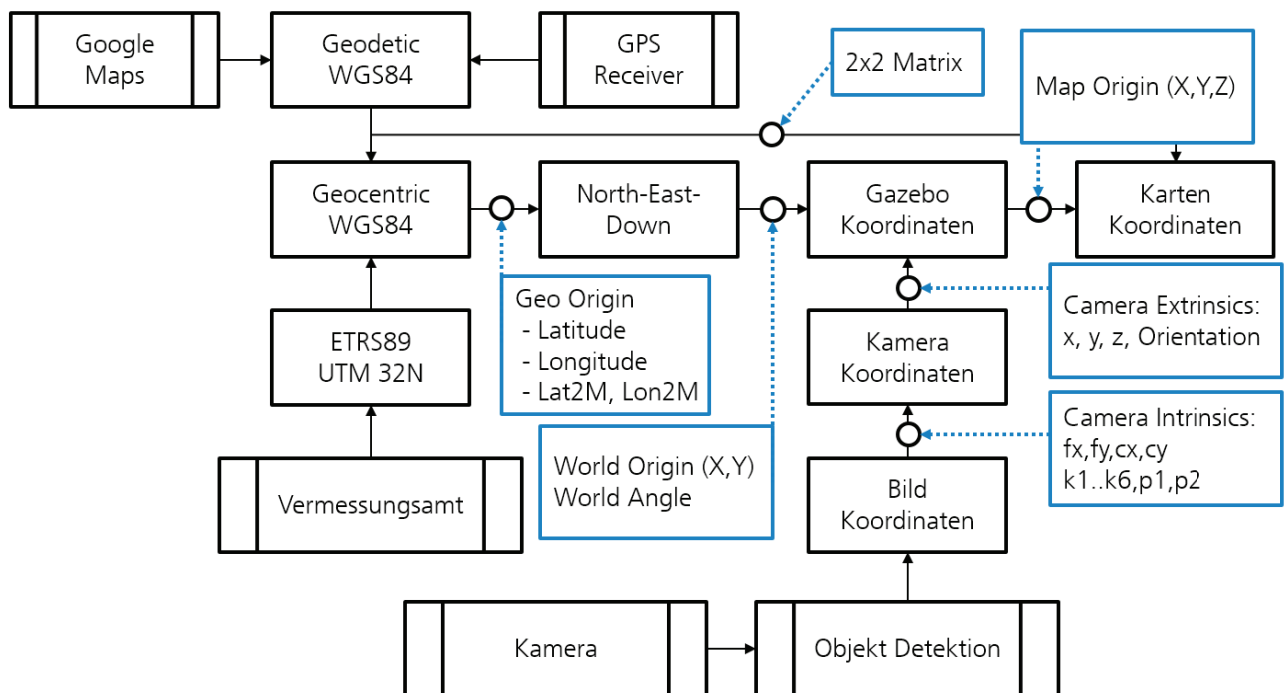


Abbildung 13: Übersicht relevanter Koordinatensysteme

Alle in Abbildung 13 benannten Parameter müssen erhoben werden. Das grundsätzliche Vorgehen nutzt korrespondierende Koordinatenpaare in verschiedenen Koordinatensystemen. Dafür wurden verschiedene Kalibrierungsschritte durchgeführt:

- Definition des Kartenbereichs
- georeferenzierte Einmessung des 3D Modells
- Bestimmung einer lokal optimalen linearen Transformation zwischen GPS und Karten Koordinaten
- intrinsische Kamerakalibrierung
- Extrinsische Kamerakalibrierung, bzw. georeferenzierte Einmessung von Kameras mit Daten vom Landesvermessungsamt

### Objekterkennung am autonomen Fahrzeug

Am autonomen Fahrrad wird zur lokalen Objekt- und Umfelderkennung eine Kombination von LiDAR-Sensor, Aktiv-Stereo-Sensor und Orientierungssensor genutzt.

Der eingesetzte LiDAR-Sensor Livox Mid 40 ist entwickelt für den Bereich des autonomen Fahrens. Besonderes Vorteil des Mid 40 ist sein geringer Preis (~500€), die hohe Reichweite und die konfigurierbare Auflösung. Bisher im autonomen Fahren eingesetzte LiDAR-Sensoren haben einen deutlich höheren Preis (1000€ - 50000€ und mehr) und dabei eine geringere Auflösung: Meist scannen diese Sensoren ihre Umgebung in mehreren Schichten rings um den Sensor herum ab. Zwischen den einzelnen Schichten werden dabei keine Daten erhoben. Kleinere Objekte können so übersehen werden, wenn sie sich zwischen den Schichten befinden.

Der Mid 40 hat ein sich nicht wiederholendes pseudozufälliges Abtastmuster. Es wird nur in eine Hauptrichtung geschaut, in diese Richtung wird jedoch der gesamte Sichtbereich abgetastet. Der Laserstrahl wird dazu entlang einer spiralartigen Kurve geführt (siehe Abbildung 7: Ausschnitt aus Livox Mid 40 Abtastmuster). So entsteht ein runder Sichtbereich der nach



und nach komplett abgetastet wird. Die Wahrscheinlichkeit ein Objekt in dem Sichtbereich nicht zu sehen, weil der Laserstrahl das Objekt verfehlt hat, wird so minimiert.

Der Livox Mid 40 liefert somit keine übliche strukturierte Punktwolke, und auch kein Tiefenbild definierter Größe. Es werden stattdessen kontinuierlich jede Millisekunde 100 Punkte abgetastet und an die Bildanalyse-Software übergeben. Da 100 Punkte relativ wenig sind, um Objekte darin zu erkennen, werden Punktdaten über einen größeren Zeitraum (z.B. 50ms, oder 1 Sekunde) gesammelt und gemeinsam verarbeitet. Bewegte Objekte weisen dadurch einen Bewegungsschatten auf (siehe Abbildung 15: Bewegungsschatten (rot) einer bewegten Person im Vergleich unterschiedlicher Integrationszeiträume). Die Länge des Bewegungsschattens hängt von der Geschwindigkeit und dem betrachteten Zeitraum ab. Durch die freie Konfigurierbarkeit des Betrachtungszeitraum während der Laufzeit lässt sich sowohl auf Position, Größe als auch auf die Geschwindigkeit der beobachteten Objekte schließen.

Zwar hat der Livox Mid 40 eine hohe Reichweite von bis zu 260m selbst im Außenbereich, jedoch ist der Sichtbereich selbst mit 38,4° Öffnungswinkel relativ klein (Tunnelblick). Da auch Hindernisse an anderen Seiten des Fahrrads auftreten können sollen diese ebenfalls erkannt werden. Es werden 3D-Stereo-Kameras eingesetzt um den Sichtbereich an den Seiten zu vergrößern. Diese liefern ebenfalls 3D-Punktdaten. Die Objekterkennung arbeitet mit den kombinierten Daten von Laserscanner und den Stereo-Kameras.

Die Sensorik am autonomen Fahrzeug ist in Bewegung und daher Erschütterungen und Vibrationen ausgesetzt. Durch Erschütterung ist insbesondere die Orientierung der Umwelt abbildenden Punktwolke beeinträchtigt. Als Gegenmaßnahme wird ein Orientierungssensor eingesetzt.

Aus der resultierenden Punktwolke werden nicht relevante Daten, wie die Grundebene auf der gefahren wird, entfernt. Objekte und Hindernisse sind in den nun noch zusammenhängenden Punkten zu suchen.

### **Datenfusion und Objekttracking**

Die Daten werden sowohl bei der infrastrukturellen Objekterkennung, sowieso beim autonomen Fahrzeug fusioniert, nachverarbeitet und gefiltert. Das Grundprinzip entspricht dabei der nachfolgenden Abbildung und wurde bis zum Ende des Projektes weiter optimiert.

#### Lidar Livox Mid40

- Erfassungsreichweite von 1 bis zu 260 Metern
- Sichtfeld (FOV) von 38,4° kreisförmig
- 2 cm Standardabweichung bei 20 m
- 100.000 Punkte pro Sekunde



Abbildung 14: Ausschnitt aus Livox Mid 40 Abtastmuster

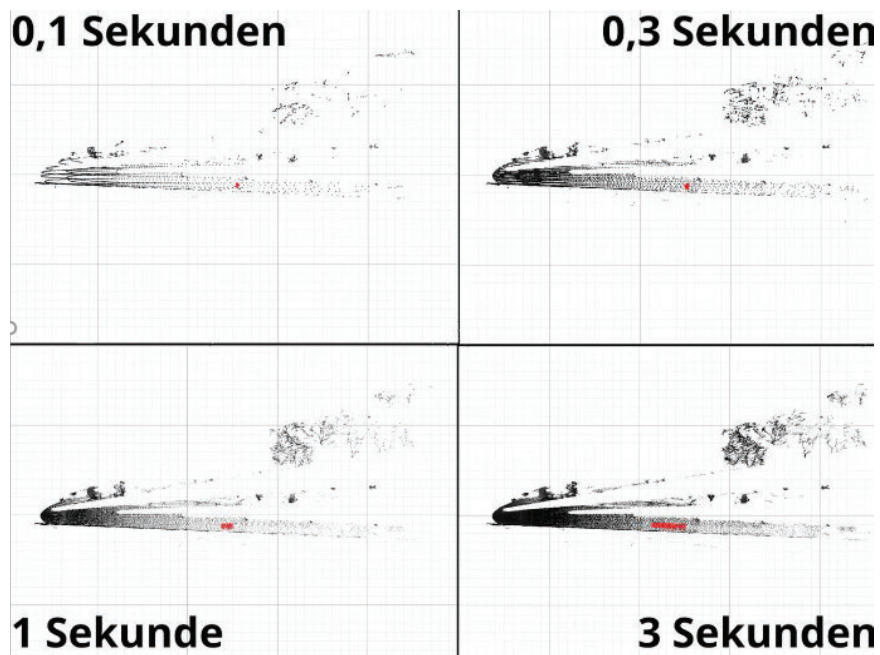


Abbildung 15: Bewegungsschatten (rot) einer bewegten Person im Vergleich unterschiedlicher Integrationszeiträume



Abbildung 16 Umwelterfassung mit Lidar Mid40 im Hafengebiete (links Farbbild zur Veranschaulichung der Situation, rechts: Punktdaten farblich kodiert nach Höhe über Grundebene)

### Intel Realsense D400er

- Active IR stereo
- Erfassungsreichweite von bis zu 10 Metern
- Sichtfeld (FOV)
- 69.4° Horizontal
- 42.5° Vertikal

Eine Kamera der Intel Realsense D400er Reihe wird genutzt, um den Sichtbereich des LiDARs zu erhöhen. Der Livox Mid40 bietet zwar eine große Reichweite, hat allerdings auch einen Tunnelblick. Die Intel Realsense Stereokameras vergrößern den Sichtbereich an den Seiten. Die 3D-Punktclouds werden mit den Daten des LiDARs kombiniert verarbeitet.



### Intel Realsense T265

- Zwei Fisheye Linsen mit 163° FOV
- Positions- und Orientierungstracking durch SLAM
- Inertial Measurement Unit (IMU)

Wird zur Orientierungsbestimmung der anderen Sensoren genutzt. Im Gegensatz zu einer reinen IMU-Lösung arbeitet dieses System zusätzlich mit einer sehr weitwinkligen Stereokamera, welche die Umwelt durch ein SLAM Verfahren direkt auf dem Sensor modelliert. Dadurch kann sich die T265 in der Umwelt sowohl lokalisieren als auch seine Orientierung bestimmen. Vibrationen und Erschütterungen können durch das Erkennen der von Positions- & Orientierungsänderungen ausgeglichen werden. So wird der T265 als virtueller Gimbal genutzt um die Orientierung von aufgenommenen Punktwolken zu korrigieren. Der Effekt ist in Abbildung 17 zu sehen.



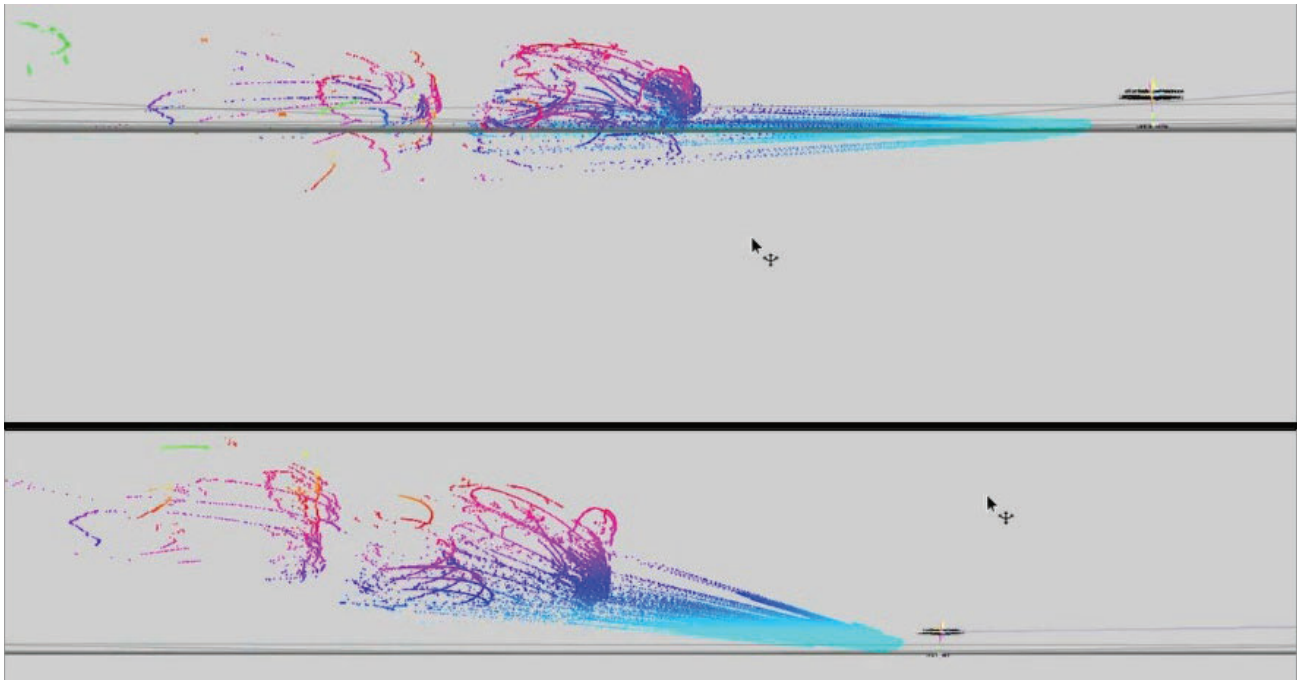


Abbildung 17: Durch Erschütterung ist die Orientierung der Punktwolke beeinträchtigt. Effekt des Virtual Gimbals (oben mit, unten ohne) beim Überqueren eines Bordsteins

### Kamerakalibrierung

Zur intrinsischen Kamerakalibrierung der Intel Realsense D400er Kameras wird das vom Hersteller empfohlene Kalibrierungsverfahren genutzt. In Abbildung 18 ist der dafür nötige Testaufbau exemplarisch dargestellt. Weiterhin wird die Lage der einzelnen Kameras zueinander in einer extrinsischen Kalibrierung bestimmt. In den Farbbildern der Stereo-Kameras wird die Lage von bekannten 2D-Markern erkannt, während der LiDAR die Lage des Würfels vor einer planaren Fläche bestimmt. Die Korrespondenz der Ebenen- & Würfellagepaare führt zur extrinsischen Kalibrierung. Der Testaufbau ist dazu in Abbildung 19 dargestellt.



Abbildung 18: Testaufbau für intrinsische Kamerakalibrierung der Stereo-Kameras<sup>c</sup>

<sup>c</sup> Intel® RealSense™ Depth Module D400 Series Custom Calibration, 2019.





Abbildung 19: Testaufbau für extrinsische Kalibrierung des LiDARs und der Stereo-Kameras

## Manuelle Kalibrierungsunterstützung

Auf Basis eines handelsüblichen MIDI Mixer Boards wurde ein Kalibrierungstool zur schnellen manuellen Nachkorrektur entwickelt. Dies erweist sich als sehr nützlich während der Entwicklung, um schnell verschiedene Kamera-Konfiguration auszuprobieren. Wir nutzen das Tool in anderen Projekten mittlerweile auch für andere Parametereinstellungen.

Abbildung 20: MIDI Mixer zum effizienten manuellen Einstellen von Parametern



Vorteile:

- Blindes Bedienen
- aktueller Stand lässt sich erfühlen
- persistent über Programmneustarts
- mehrere Parameter gleichzeitig einstellen
- über 120x schnelleres Arbeiten, als Parameter in Datei zu ändern oder neu zu kalibrieren (unter 500ms vs. über 1min)

## Effekt von verschmutzten Kameras

Im Laufe des Jahres 2020 wurden die Kameras von Schmutzansammlungen, welche sich in einem Zeitraum über 8 Jahren angesammelt haben, befreit. Großteils haben sich Flechten und sonstige grün-bräunliche Ablagerungen auf der Schutzscheibe angesammelt. Dies sorgte für ein verschwommenes Bild, ähnlich einem Blick durch Milchglas. In folgender Abbildung ist Vorher-Nachher Vergleich zu sehen.



Abbildung 21: Effekt von verschmutzten Kameras (links verschmutzt, rechts gereinigt)

## Portierung von externe Kamera Bildverarbeitung für höhere Performance

Es wurde eine Portierung der Programme zur Bilderkennung auf den Infrastruktur-Kameras von Python zu C++ vorgenommen. Dies führte, insb. durch weniger Zeitaufwand beim Verar-

beiten von Datenstrukturen, zu einer erheblichen Beschleunigung und in Folge dessen zu einer verbesserten Synchronisation zwischen den einzelnen Kameras.

### **Lokale Umgebungswahrnehmung**

Eine lokale Umgebungswahrnehmung ermöglicht dem autonomen Fahrzeug, auf Objekte in der Nähe zu reagieren und Kollisionen während der autonomen Fahrt zu vermeiden. Auf Grund der hohen Dynamik bei der Messung in Bewegung ist eine latenzarme Erkennung mit hoher Framerate nötig. Da eine Kollision auf jeden Fall zu vermeiden ist, sollten Objekte nicht übersehen werden. Computer Vision Systeme für autonomes Fahren basieren meist auf regulären Farbkameras, Stereo-Kameras und/oder Lidar Technologie. Oft werden dabei moderne Verfahren des maschinellen Lernens eingesetzt, um Objekte und Umgebung in den Sensordaten zu identifizieren und zu klassifizieren. Diese Methoden benötigen jedoch große Mengen an Trainingsdaten, die Qualität der Objekterkennung hängt maßgeblich von der Qualität und Vollständigkeit dieser Trainingsdaten ab und es werden selten hohen Frameraten erreicht.<sup>d</sup>

LiDAR hat eine hohe Reputation für Sicherheitsanwendungen<sup>e</sup>, jedoch ist diese Technologie trotz maßgeblicher Preisreduktionen noch immer relativ kostspielig und liefert im Vergleich zu bildbasierten Verfahren relativ wenig Punktdaten. Durch Sensor Fusion von Stereo-Kameras und Lidar kann die Menge an Punktdaten erhöht, Sichtbereiche doppelt abgedeckt und/oder vergrößert werden. Die Nutzung von physikalisch begründeten Messverfahren legt eine Objektdetektion direkt in diesen Messdaten nahe. Durch die Wahl mehrerer unterschiedlicher Technologien, kann die Wahrscheinlichkeit von nicht-erkannten Objekten auf Grund vereinzelter ungünstiger Beobachtungsbedingungen verringert werden. Die Fahrradsensorik zur lokalen Objektwahrnehmung wird durch eine Fusion von ASIL-zertifiziertem LiDAR-Sensoren und Intel Realsense-Sensorik (Active Stereo Vision Kameras und Visual-Inertial Sensorik) realisiert.

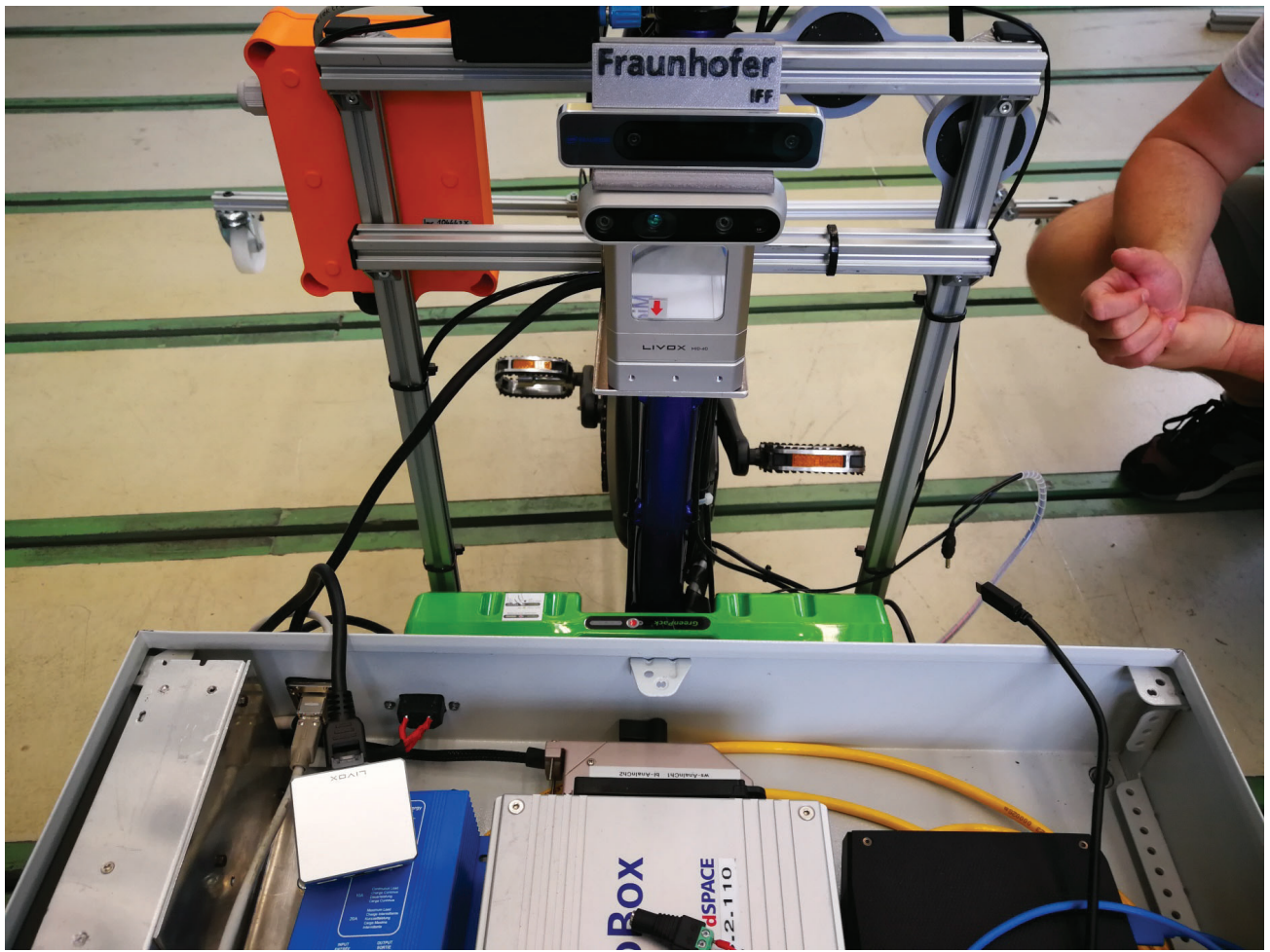
Eine *performante und robuste* Verarbeitung mit hoher Framerate ist nötig, um ein sicheres autonomes Fahren zu ermöglichen.

---

<sup>d</sup> Murray, S. (2017). Real-time multiple object tracking-A study on the importance of speed.

<sup>e</sup> Asvadi, A., (2018). Multi-sensor object detection for autonomous driving (Doctoral dissertation, Universidade de Coimbra).





**Abbildung 22: Installierte Sensorik am RavE-Bike Prototypen, Zwischenstand im Projektverlauf**

Erste Prototypen wurden mit Hilfe von vorhandener Software aus ROS und PCL realisiert. So konnte die Eignung von Sensorik und Software bewertet werden. Das grundsätzliche Messprinzip und die gewählte Sensorik bewiesen sich als richtungsweisend. Die Wahl von vorgefertigten Softwarekomponenten aus der bekannten Softwarebibliothek für Punktwolkenverarbeitung „PCL“ sorgte jedoch für eine relativ geringe Performance von ein bis fünf Rückmeldungen pro Sekunde. Die geringe Performance war auch durch die prototypische Umsetzung selbst begründet.

### **Iterative Entwicklung für Performance Optimierung**

In iterativen Entwicklungsschritten wurden, gestützt durch Recherche von State-of-the-Art Technologien, und geleitet durch Benchmarks, ein performantes Multi Sensor Objektsegmentierungsverfahren entwickelt. Die Prototypen wurden in Python programmiert, welches eine schnelle Entwicklung ermöglicht, jedoch selbst für Einschränkungen bei der Performance sorgt. In einer ersten Optimierungsstufe, wurde das prototypische System zu einer performanteren Programmiersprache (C++) portiert. Die Entwicklungszeit dafür ist höher, jedoch ist die Ausführungszeit auch um ein Vielfaches erhöht. Wir haben realisiert, dass sich ein Großteil der Punktwolkenverarbeitung sehr gut für eine Parallelisierung auf der Grafikkarte (GPU) eignet. So haben wir große Teile nach GLSL Compute portiert, welches GPU Beschleunigung auf Basis von OpenGL ermöglicht. Ein alternativer Entwicklungsweg mit CUDA wurde nicht gegangen, da dies nur auf Grafikkarten Hardware von einem Hersteller (nVidia) unterstützt wird. Eine Entwicklung mit CUDA wäre an vielen Stellen einfacher gewesen, womöglich sogar performanter. Wir wollen jedoch auch andere Hardware für die GPU in

Betracht ziehen können und das Verfahren nicht an die proprietäre Hardware eines einzelnen Herstellers binden.

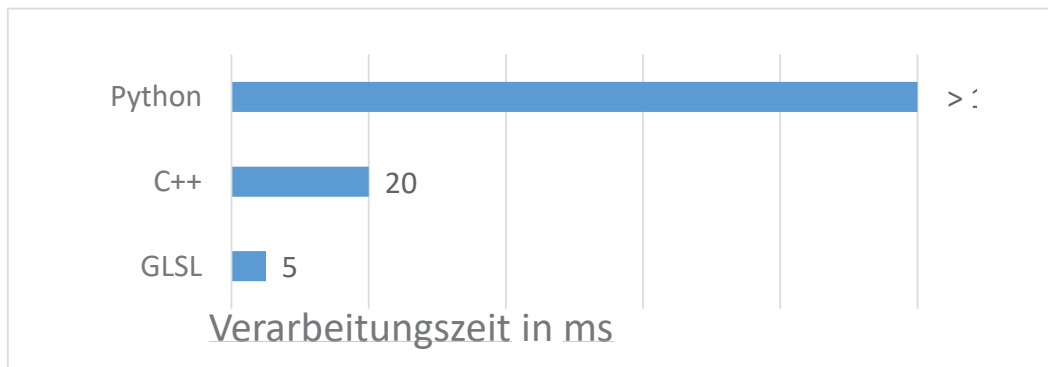


Abbildung 23: Performancegewinn bei der iterativen Entwicklungen

Das finale Verfahren wurden im Oktober auf der RelStat 2020 in Riga als „**Fast connected components object segmentation on fused lidar and stereo-camera point clouds with visual-inertial-gimbal for mobile applications utilizing GPU acceleration**“<sup>f</sup> vorgestellt und bekam einen Best Paper Award verliehen. Die Veröffentlichung wurde im Frühjahr 2021 abgeschlossen. In Auszügen berichten wir hier von den Inhalten in übersetzter Form mit originalen Abbildungen.



Abbildung 24: Best Paper Award Certificate für veröffentlichtes Paper

Punktwolken Sensor Fusion Verfahren können in Punkt-basiert und Voxel-basiert kategorisiert werden.<sup>g</sup> Bei Voxel-basierten Verfahren werden den Punkten jeweils Zellen in einem räumlichen Gitter zugeordnet. Oftmals wird das Gitter in horizontalen Schichten weiterarbeitet<sup>h, i</sup> oder auf einzelne Draufsicht-Schichten reduziert<sup>j</sup>.

Unsere Software ist modularisiert in separate ROS (Robot Operating System) Prozesse. Sensor Treiber Prozesse stellen über USB, bzw. Ethernet, eine Verbindung zu den Sensoren auf und senden Tiefendaten, Punktwolken und Position + Orientierung im Raum über ROS zu einem zentralen Verarbeitungsprozess.

<sup>f</sup> Hünermund, M., Groneberg, M., & Schütz, A. (2020, October). Fast Connected Components Object Segmentation on Fused Lidar and Stereo-Camera Point Clouds with Visual-Inertial-Gimbal for Mobile Applications Utilizing GPU Acceleration. In *International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication* (pp. 73-83). Springer, Cham.

<sup>g</sup> Qian, R., Garg, D., Wang, Y., You, Y., Belongie, S., Hariharan, B., ... & Chao, W. L. (2020). End-to-End Pseudo-LiDAR for Image-Based 3D Object Detection. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 5881-5890).

<sup>h</sup> Zhao, X., Sun, P., Xu, Z., Min, H., & Yu, H. (2020). Fusion of 3D LIDAR and camera data for object detection in autonomous vehicle applications. *IEEE Sensors Journal*, 20(9), 4901-4913.

<sup>i</sup> Barrera, A., Guindel, C., Beltrán, J., & García, F. (2020). BirdNet+: End-to-End 3D Object Detection in LiDAR Bird's Eye View. *arXiv preprint arXiv:2003.04188*.

<sup>j</sup> Yang, B., Luo, W., & Urtasun, R. (2018). Pixor: Real-time 3d object detection from point clouds. In *Proceedings of the IEEE conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 7652-7660).

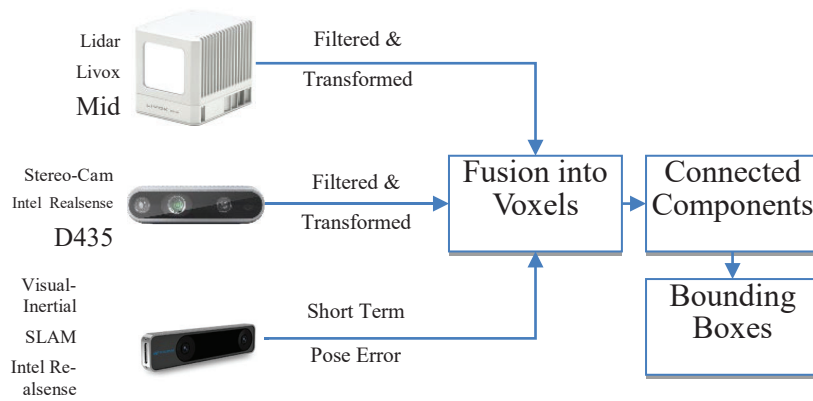


Abbildung 25: Sensorfusion und Objektsegmentierung

Auf Grund der Anforderungen für eine hohe Performance ist die eigentliche Objektsegmentierung nicht in weitere ROS Prozesse unterteilt. Neue Daten werden in regelmäßigen Abständen zur GPU hochgeladen und dort in mehreren Schritten weiterarbeitet. Neue Punkte werden gefiltert, so dass Flying Points entfernt werden. Anschließend werden die Punkte voxelisiert. Auf dem resultierenden Belegungsgitter wird eine dreidimensionale Objektsegmentierung durchgeführt.



## Flying Point Filter

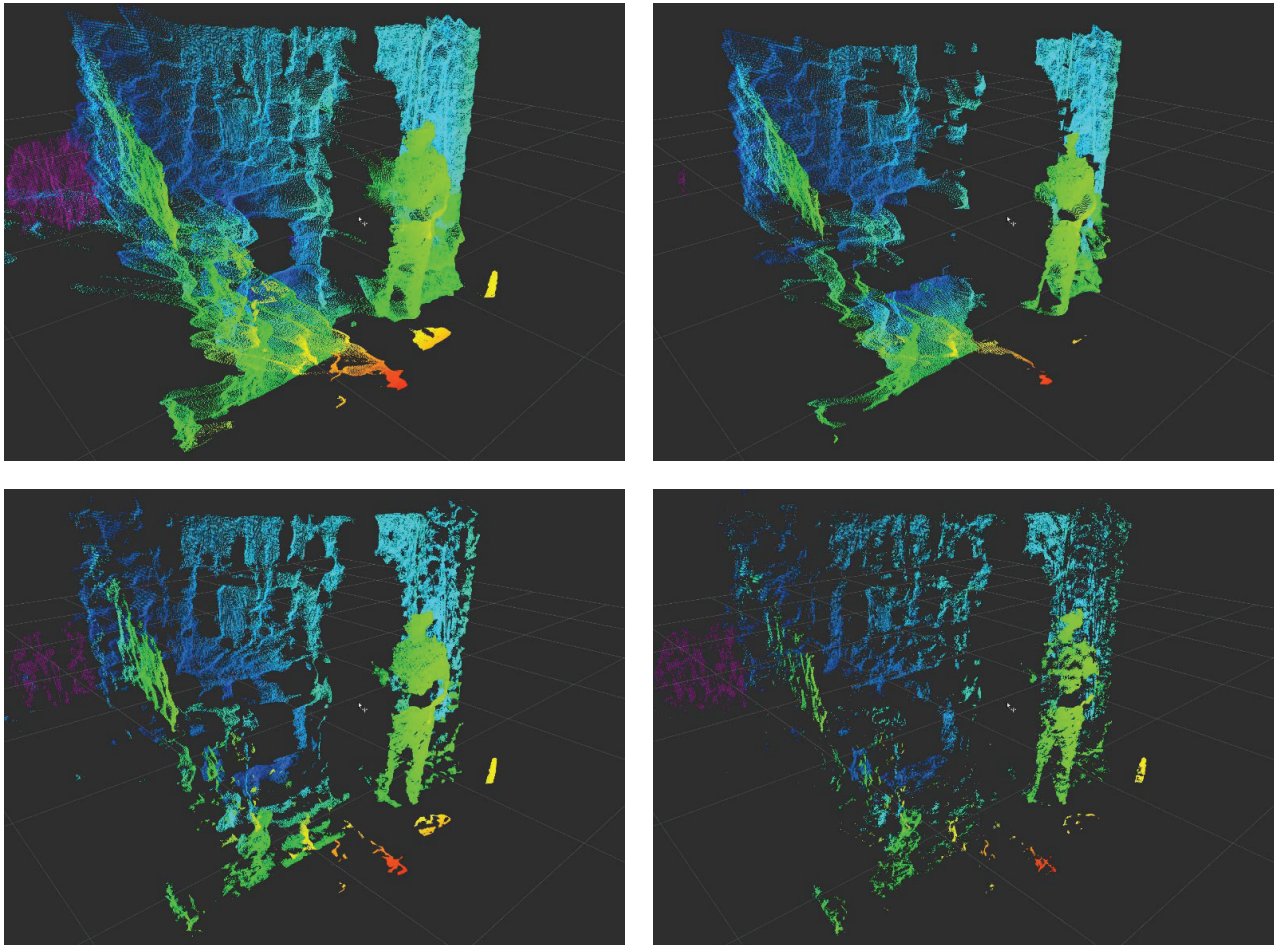


Abbildung 26: „Flying Point“ Filter

Flying Points sind ein Art Sensorfehler, bei dem fälschlicherweise Punkte zwischen benachbarten Tiefenebenen geliefert werden. Bei Stereo-Kameras passiert dies durch Interpolation benachbarter Tiefenwerte. Beim Lidar hat der Laser eine Divergenz und bekommt eine Antwort von zwei Oberflächen zur gleichen Zeit. Beide Technologien zeigen diese Fehlerart. Durch eine Schätzung der Oberflächenrichtung um jeden Punkt herum können wir diese fliegenden Punkte detektieren und verwerfen. Punkte bei denen die Oberfläche in Richtung der Kamera zeigt, werden akzeptiert. Wenn die Oberfläche parallel zur Sichtrichtung ist, dann sind es zu verwendende Flying Points. Es kann ein Schwellwert festgelegt werden, ab welchem die Punkte verworfen werden. Obere Abbildung zeigt den Effekt des Flying Points Filter von oben-links ungefiltert und dann immer stärker werdendem Effekt. Es ist zu sehen, dass die Flying Points sehr zuverlässig entfernt werden. Es sollte aber nicht zu viel gefiltert werden,

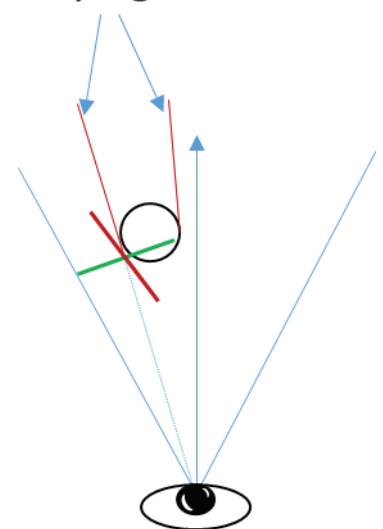


Accept:  
Camera Facing



Reject:  
In Viewing  
Direction

### Flying Point Zone



Es sollte aber nicht zu viel gefiltert werden,

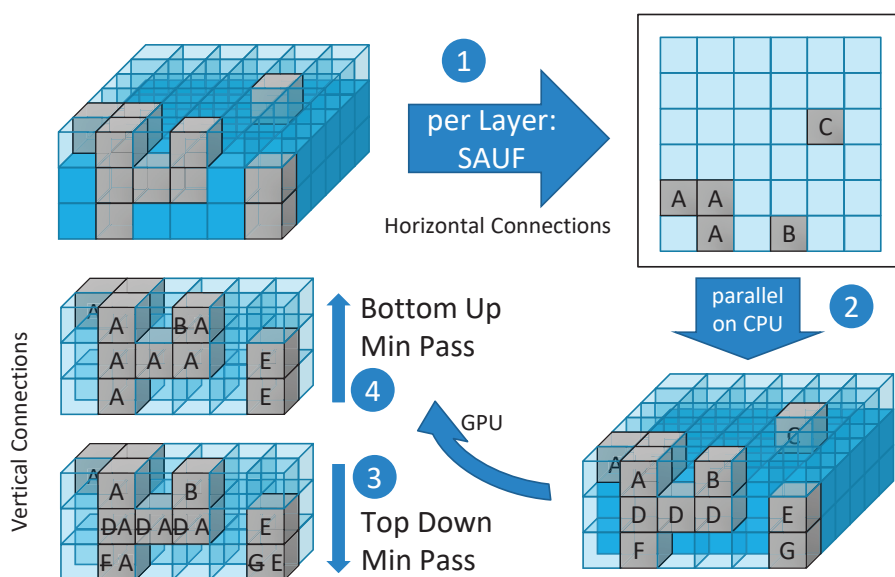
da sonst signifikante Punkte verloren gehen können. Da nur benachbarte Punkte zur Filterung nötig sind, lässt sich dieses Verfahren sehr gut parallelisieren.

### Objektsegmentierung

Die Objektsegmentierung wird durch einen Connected Components (übersetzt „Zusammenhängende Komponenten“) Algorithmus auf dem Belegungsgitter durchgeführt. Das Gitter wird in horizontale Schichten geteilt. Der SAUF Algorithmus<sup>k</sup> wird im ersten Schritt benutzt, um zusammenhängende Komponenten auf den einzelnen Schichten zu bestimmen. Dazu wird eine vorhandene Implementierung von OpenCV genutzt und die Schichten parallel von allen CPU Cores bearbeitet (Schritt 2).

Um die Verbindung zwischen den horizontalen Schichten herzustellen, benutzen wir einen Two-Pass Connected-Component Algorithmus: Die gefundenen zusammenhängenden Komponenten der einzelnen Schichten werden zunächst von oben nach unten global eindeutig durchnummeriert. Die Komponenten einer einzelnen Schicht erhalten dabei nacheinander folgende Nummern. Nun werden Paare aus Gitterzellen benachbarter Schichten untersucht. Sind beide Zellen mit einer Komponente besetzt, wird die Verbindung der beiden Komponenten in einer Matrix notiert. Dies ist ohne Synchronisierung über alle Zellen parallelisierbar. Die finalen zusammenhängenden Komponenten werden gebildet durch Propagation der kleinsten Komponentennummer in zwei Passes über alle Schichten. Der erste Pass (Schritt 3) startet von der horizontalen Schicht mit der kleinsten global eindeutigen Komponentennummer. Der zweite Pass (Schritt 4) ist in Rückwärtsrichtung und endet wieder bei der ursprünglichen Startschicht. Die überbleibenden Komponentennummern bilden die zusammenhängenden Komponenten über alle Schichten. Die Komponenten werden in eine einzelne Draufsicht-Schicht projiziert. Konturen sowie minimale, rotierte Rechtecke werden bestimmt. Die Höhe wird auf Grund der beteiligten Schichten bestimmt.

Abbildung 27: CCA Objektsegmentierung



<sup>k</sup> Wu, K., Otoo, E., & Suzuki, K. (2009). Optimizing two-pass connected-component labeling algorithms. Pattern Analysis and Applications, 12(2), 117-135.

## Robustheit

Der Betrieb im mobilen Kontext führt zu suboptimalen Bedingungen für Hardware und Kabel. Besonders problematisch sind Vibrationen, extreme Temperaturen aufgrund thermischer Einschränkungen und Spannungsschwankungen. Dies kann zu Fehlverhalten der Sensoren, Problemen mit der Rechenhardware und Verbindungsproblemen führen. Hohe Temperaturen können zu einer Überhitzung der integrierten Schaltkreise für Ethernet- oder USB-Controller führen. Vibrationen können zu losen Kabelkontakten führen. Wir empfehlen physikalische Maßnahmen wie hochwertige Kabel, Kabelverschraubungen, möglichst wenige Steckverbinder, Schwingungsdämpfer, Kühlkörper, sowie Lüftungs- und Spannungsregler. Dies reduziert das Auftreten von Fehlern, die wir regelmäßig im mobilen Betrieb beobachten.

Die in Tabelle 8 aufgeführten Fehler treten gelegentlich trotz aller getroffenen Vorsichtsmaßnahmen auf. Für einen kontinuierlichen Betrieb ist es wichtig, sich von diesem Fehler „erholen“ zu können. Eine Strategie, um dies zu erreichen, ist der Neustart bei einem Fehler. Wir wenden dieses Prinzip auf jede Komponente an, die ausfallen könnte. Wir haben die Software in separate Prozesse modularisiert, mindestens einen für jeden Sensor und einen zusammen für die Sensorfusion und Objektsegmentierung.

Jede Softwarekomponente wird vollständig beendet und bei einem Fehler neu gestartet. Um bei Stromausfälle des gesamten Systems weiterarbeiten zu können, ist das Betriebssystem so konfiguriert, dass beim Start automatisch alle Softwarekomponenten gestartet werden. Wir haben oft beobachtet, dass die Intel Realsense ROS-Treiber versuchen, sich von USB-Controller-Fehler zu erholen, jedoch nicht ordnungsgemäß, wodurch der Prozess zum Stillstand kommt. Wir haben die Treiber so geändert, dass sie bei einem Fehler vollständig beendet und dann neu gestartet werden. Wir haben gelegentlich beobachtet, dass der T265-Sensor nur ungültige Werte sendet. Um die kurzfristige Minderung von Posenfehlern wiederherzustellen, haben wir den T265-Treiber so geändert, dass er sich bei ungültigen Werten von neuen Sensordaten beendet und neu startet. Wenn kein nahes Objekt vorhanden ist, scheint der Pose-Sensor T265 Probleme beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit im offenen Raum zu haben. Manchmal tendiert die geschätzte Geschwindigkeit dann dazu, gegen Null zu konvergieren. Wir glauben, dass dies auf den internen SLAM zurückzuführen ist, der auf Merkmalspunkten von zwei Fischaugenobjektivkameras arbeitet: Das weite Sichtfeld der Fischaugenobjektive begrenzt den maximalen Abstand, der durch eine Stereotiefenschätzung erkennbar ist. Wenn alle Objekte weit entfernt sind, bewegen sich die Punkte in den projizierten Bildern auf Grund des weiten Sichtfelds von der Fischaugenlinse nicht viel. Während der Fahrt mit langen vibrationsintensiven Kurven beobachteten wir ein weiteres Problem der T265-Posenschätzung: Eine falsch geschätzte Drehung um die Vorderachse (d.h. in Fahrtrichtung). Wir nehmen an, dass die T265-Posen wie bei herkömmlichen Orientierungsfiltren<sup>1,m</sup> geschätzt werden, indem angenommen wird, dass der lineare Beschleunigungsmessvektor auf die Schwerkraftichtung zeigt, d.h. nach unten. Die Kurvenfahrt führt zu einer Zentrifugalkraft, die die lineare Beschleunigungsmessung beeinflusst. Sehr kurze Kurvenfahrten haben keinen Einfluss auf die geschätzte Bodenrichtung, aber längere Bewegungen mit konstanter Drehgeschwindigkeit und konstanter Geschwindigkeit können den Sensor verwirren. Da wir die hochpassgefilterte Pose verwenden, um lokale kurzfristige Po-

---

<sup>1</sup> Madgwick, S. O., Harrison, A. J., & Vaidyanathan, R. (2011, June). Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In 2011 IEEE international conference on rehabilitation robotics (pp. 1-7). IEEE.

<sup>m</sup> Valenti, R. G., Dryanovski, I., & Xiao, J. (2015). Keeping a good attitude: A quaternion-based orientation filter for IMUs and MARGs. *Sensors*, 15(8), 19302-19330.

senabweichungen zu korrigieren, wirken sich die geschätzte globale Geschwindigkeit und die globale Pose nicht direkt auf das virtuelle Gimbal aus.

**Tabelle 8: Beobachtete Sensorfehler im mobilen Betrieb**

| Livox Mid 40    | Intel Realsense D435 | Intel Realsense T265             |
|-----------------|----------------------|----------------------------------|
| Connection lost | USB controller error | USB controller error             |
| Power lost      | Connection lost      | Connection lost                  |
|                 | Driver issues        | Driver issues                    |
|                 |                      | Occasionally only invalid values |

### Upgrade der Sensorik

Ursprünglich waren ein Livox Mid40 in Kombination mit einer Intel Realsense D435 Stereokamera vorgesehen, welche den recht schmalen Sichtbereich des Mid40 ergänzen sollte. Mittlerweile gibt es eine neuen Lidar von der gleichen Baureihe, welcher ein weit größeres Sichtfeld und zusätzlich eine höher auflösende Abtastung mitbringt. Der Sichtbereich des neuen Livox Horizon ist beispielhaft in folgender Abbildung mit dem des Mid40 gegenübergestellt.

**Abbildung 28: Sichtbereich Livox Horizon, Quelle <https://www.livoxtech.com/de/horizon>**

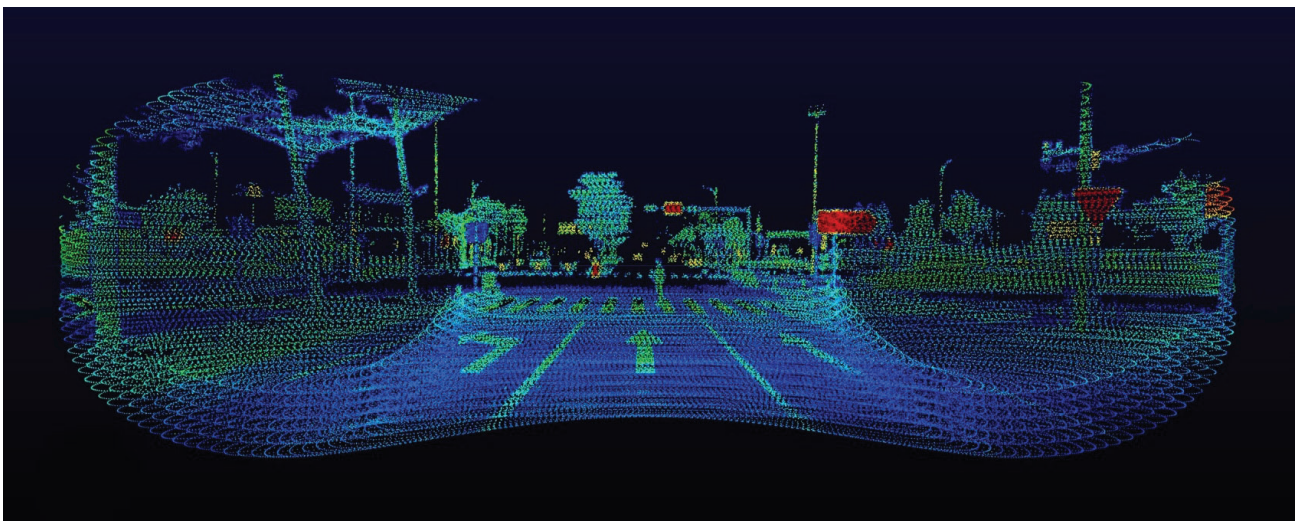






Abbildung 29: Sichtbereich Livox Horizon verglichen mit Aufnahmen des Livox Mid40

Die Sensorhalterung wurde so entworfen, dass die Sichtbereiche der einzelnen Sensoren sich in geringer Distanz überlappen, und dabei das gesamte Sichtfeld erweitern.

Die Stereo-Kameras haben vier Linsen: RGB-Kamera, linke und rechte Kamera für Stereo und IR-Projektor für Active-IR-Stereo-Vision. Der Sichtbereich des IR-Projektors ist vom Hersteller so ausgelegt, dass er den Sichtbereich, in dem eine Tiefenwahrnehmung möglich ist, komplett ausleuchtet. Der IR-Projektor liegt zwischen der linken und der rechten Kamera. Der Sichtbereich, in dem Punktdaten bestimmt werden können, bildet sich durch die Überschneidung der Sichtbereiche von linker und rechter Kamera. Orange Linien zeigen Sichtbereich von RGB-Kamera, Rot und Blau zeigen Sichtbereich von linker und rechter Kamera pro Stereo-Kamera. Graublau ist der Sichtbereich des Livox Horizon LiDARs. Die Sichtbereiche von RGB überlappen sich in 80cm Entfernung und ermöglichen für den gemeinsamen Sichtbereich eine zusätzliche Klassifizierung mit maschinellen Lernen auf Basis von Farbbilddaten. Die linke der beiden Stereokameras (obere im Bild), wird auf den Kopf gedreht, um symmetrische Sichtbereiche zu bilden. In unserem Fall beginnt der gemeinsame Sichtbereich von beiden Stereokameras ab der Überschneidung der roten Linien, also ab einer Distanz von 50cm.

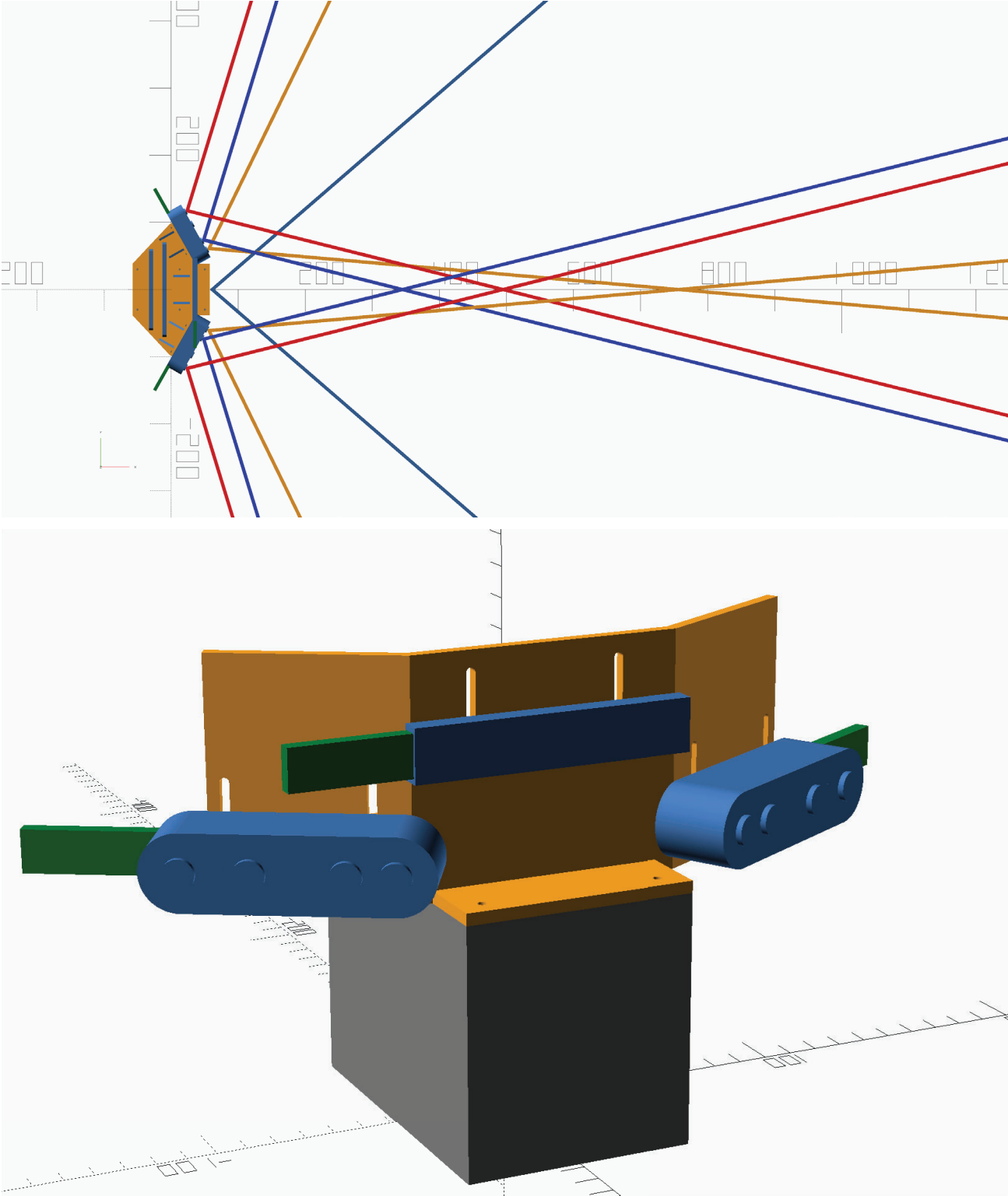


Abbildung 30: Entworfenen Sensorhalterung für den erweiterten Sichtbereich

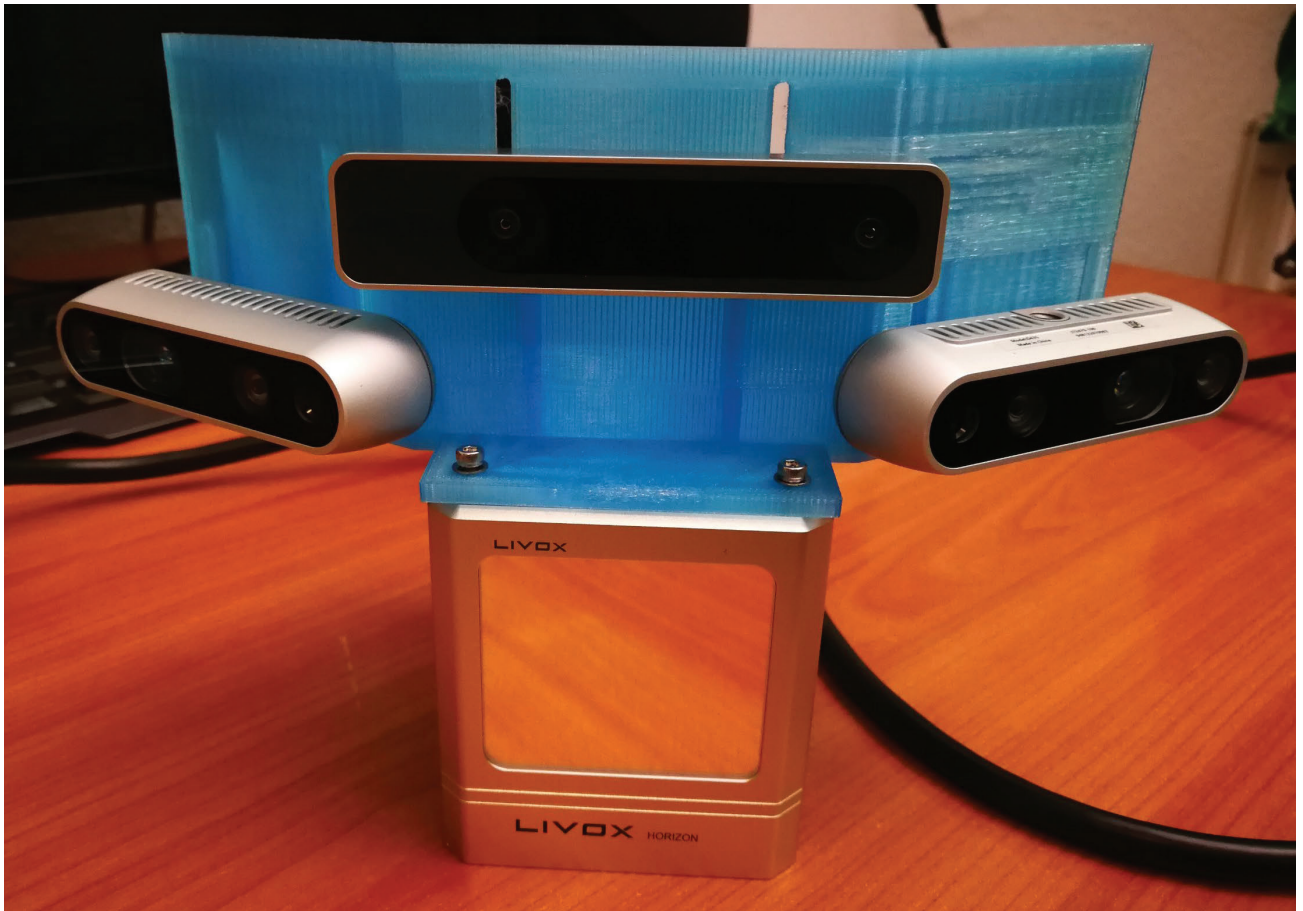


Abbildung 31: Fertiggestellte Sensorhalterung für den erweiterten Sichtbereich

### Objekt Klassifizierung

Es wurde mit dem KI-Modell YOLOv3<sup>n</sup> eine Objektklassifizierung der Bilddaten vorgenommen. Die Ergebnisse sollen im Objekt-Tracking genutzt werden, um den Objekten, welche in den Punktdaten erkannt werden, Klassifizierungen („Auto“, „Mensch“, etc.) zuzuordnen. Dabei werden die Punkte der Objekte in das Bildkoordinatensystem der Farbkamera transformiert und die Klassifizierungsergebnisse von den entsprechenden Pixeln übernommen. Problematisch dabei ist die höhere Latenz der Klassifizierungsergebnisse, welches eine nachträgliche Zuordnung erfordert.

### Objekt Tracking Prototyp

Ein Objekt Tracking wurde prototypisch und in erster Optimierungs- und Integrationsstufe entwickelt. Es werden Objekt Detektionen aus der Objektsegmentierung von aufeinander folgenden Zeitschritten miteinander assoziiert und Position, Orientierung, Größe und Bewegung der Objekte schätzt. Bei der Bewegungsschätzung aus rotierten Rechtecken ist es wichtig, die Rotation der Rechtecke nicht direkt zu übernehmen, da äquivalente Rechtecke, jeweils um 90° verdreht beschrieben werden können. Die Filterung geschieht zurzeit basierend auf einfach zu parametrisierbaren exponentiell gewichteten Filtern. Diese ermöglichen eine hochperformante Implementierung, auch für tausende von Objekten. Es wird so auch das Problem vermieden, dass Kalman-Filterung ein bekanntes Bewegungsmodell der gefilterten Objekte sowie Kenntnis über die Unsicherheit dieses Modells erfordert. Die gewählte Art zu

---

<sup>n</sup> Redmon, J., & Farhadi, A. (2018). Yolov3: An incremental improvement. *arXiv preprint arXiv:1804.02767*.

Filtern ist grundsätzlich austauschbar. Wir können uns in der weiteren Entwicklung auch eine Aggregation der Detektionbeobachtungen mit Hilfe von Informationsfiltern vorstellen.

### Objekt Tracking

Für die Kollisionsvermeidung im RavE-Bike wurden sowohl mobile als auch georeferenzierte stationäre Sensorik vorgesehen. Die Fusion der Objekt-Detektionen von diesen Sensoren erfordert ein schnelles und flexibles Multi-Objekt-Tracking Verfahren. Die Verwendung mehrerer Sensoren und Detektionsalgorithmen resultiert in unterschiedlichen Latenzen und Zeitintervallen zwischen einzelnen Detektionen. Dies erschwert es, schnelle Multi-Objekt-Tracking Verfahren wie SORT<sup>o</sup> („simple online realtime tracking“) einzusetzen. Beim Einsatz von flexibleren Verfahren wie dem Objekt-Tracking-System „Wire“<sup>p</sup> beobachteten wir numerische und Performanz-Probleme bei der Beobachtung von vielen Objekten (>50).

Performante State-of-the-Art Multi-Objekt-Tracking Verfahren arbeiten häufig mit nur einzelnen Sensoren, koppeln Tracking und Detektion, unterstützen nur eine Art von Objektrepräsentation oder unterstützen keine variierenden Latenzen und Zeitintervalle.

Auf Grund unserer spezifischen Anforderungen und dem Mangel an nutzbaren Lösungen haben wir ein schnelles generisches Multi-Objekt-Tracking System für den praktischen Einsatz entwickelt, welches grundsätzlich das Tracking von Objekten beliebiger Sensoren und Detektor-Arten mit ihren jeweiligen veränderlichen Latenzen und Wiederholraten ermöglicht.

Dazu verallgemeinerten und erweiterten wir das Tracking-System „SORT“ um eine Historie von empfangenen Detektionen. Eintreffende Sensorinformationen, ob alt oder neu, können so genutzt werden, um die bisherigen getrackten Objekte samt ihrer Pfade zu korrigieren. Detektionen können so auch korrekt verarbeitet werden, wenn sie verzögert oder in anderer Reihenfolge eintreffen.

Durch Modularisierung und Verallgemeinerung des Tracking-Schemas unterstützt das System verschiedene Objekt-, Sensor-, Detektor-, Filter- und Tracking-Strategie-Typen. Durch den Einsatz von C++ Meta-Programmierung und eines datenorientierten Designs wird eine hohe Performance erreicht. Insbesondere die Vermeidung von wiederholten Speicherallokationen sorgt für eine hohe Effizienz.

Zur Evaluation bewerteten wir das entwickelte System mit den „Mot-17“<sup>q</sup> und „Mot-20“<sup>r</sup>-Benchmark. Dies sind Benchmarks für Multi-Objekt-Tracking in Szenen mit vielen Objekten. Wir erreichen dort im Trainingsdatensatz sehr hohe Frameraten von **400 bis 10000 Hz** mit

---

<sup>o</sup> Wojke, N., Bewley, A., & Paulus, D. (2017, September). Simple online and realtime tracking with a deep association metric. In *2017 IEEE international conference on image processing (ICIP)* (pp. 3645-3649). IEEE.

<sup>p</sup> Elfring, J., van den Dries, S., Van De Molengraft, M. J. G., & Steinbuch, M. (2013). Semantic world modeling using probabilistic multiple hypothesis anchoring. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(2), 95-105.

<sup>q</sup> Milan, A., Leal-Taixé, L., Reid, I., Roth, S., & Schindler, K. (2016). MOT16: A benchmark for multi-object tracking. *arXiv preprint arXiv:1603.00831*.

<sup>r</sup> Dendorfer, P., Rezatofighi, H., Milan, A., Shi, J., Cremers, D., Reid, I., ... & Leal-Taixé, L. (2020). Mot20: A benchmark for multi object tracking in crowded scenes. *arXiv preprint arXiv:2003.09003*.

guten Evaluationsmetriken. Für den Einsatz zur Kollisionsvermeidung im RavE-Bike ist es insbesondere wichtig, eine hohe Performance zu erzielen, dabei aber möglichst keine Hindernisse zu übersehen. Die für den Anwendungsfall somit relevanten Metriken sind in Tabelle 9 aufgelistet. Besonderes Augenmerk liegen dabei auf den Metriken FN, ML und Hz.

Tabelle 9: Für Kollisionsvermeidung relevante Multi-Objekt-Tracking Metriken <sup>5</sup>

|           |  |
|-----------|--|
| HOTA      | Higher Order Tracking Accuracy. Geometric mean of detection accuracy and association accuracy. Averaged across localization thresholds               |
| TP        | True Positives, vorhandene Objekte wurden erkannt  |
| <b>FN</b> | False Negatives, vorhandene Objekte wurden übersehen   |
| FP        | False Positives, nicht vorhandenes Objekt wurde erkannt  |
| IDSW      | Number of Identity Switches (ID switch ratio = #ID switches / recall)  |
| MT        | Mostly tracked targets. The ratio of ground-truth trajectories that are covered by a track hypothesis for at least 80% of their respective life span |
| <b>ML</b> | Mostly lost targets. The ratio of ground-truth trajectories that are covered by a track hypothesis for at most 20% of their respective life span     |
| <b>Hz</b> | Processing speed (in frames per second excluding the detector) on the benchmark  |

Wir vergleichen die Ergebnisse mit den öffentlich gelisteten schnellsten Verfahren in Tabelle 10, jeweils für den Benchmark Mot17 und Mot20. Die Methoden sind nach Geschwindigkeit sortiert, fett markiert sind die Gewinner pro Metrik. Das entwickelte Multi-Objekt-Tracking-System (in Tabellen "RaveRRect") **ist zwei- bis achtmal schneller** als die bisher schnellsten dort gelisteten Verfahren. Erfreulicherweise sind auch die anderen für uns relevanten Metriken, FN und ML, besser als die der anderen Verfahren. Dabei ist anzumerken, dass es durchaus andere Verfahren gibt, welche in diesen Metriken besser abschneiden. Wir vergleichen hier jedoch nur mit den schnellsten Verfahren, die grundsätzlich echtzeitfähig wären. Wir vermuten, dass durch den Einsatz von anderen Filter-Strategien, insb. Time-lagged Kalman-Smoother, noch weitere Verbesserungen in einzelnen Metriken erzielt werden können.

<sup>5</sup> <https://motchallenge.net/data/MOT20/>



Tabelle 10: Benchmark Ergebnisse des Multi-Objekt-Tracking Verfahrens für Rave-Bike RaveRRect

| MOT17     | HOTA        | TP            | FN            | FP          | IDSW       | MT         | ML         | Hz           |
|-----------|-------------|---------------|---------------|-------------|------------|------------|------------|--------------|
| RaveRRect | 0.38        | <b>211778</b> | <b>125113</b> | 182954      | 5191       | <b>522</b> | <b>354</b> | <b>10728</b> |
| HMM       | <b>0.55</b> | 199226        | 137665        | <b>8104</b> | <b>571</b> | 466        | 573        | 5728         |
| IOU17     | 0.41        | 173682        | 163209        | 9733        | 3634       | 352        | 582        | 1523         |
| SORT17    | 0.41        | 169028        | 167863        | 15477       | 2702       | 272        | 652        | 143          |

| MOT20       | HOTA        | TP            | FN            | FP          | IDSW        | MT         | ML         | Hz         |
|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
| RaveRRect   | <b>0.44</b> | <b>782510</b> | <b>352104</b> | 59437       | 7206        | <b>903</b> | <b>222</b> | <b>447</b> |
| SORT20      | 0.44        | 603209        | 531405        | <b>5090</b> | 6103        | 386        | 393        | 57         |
| IOU_KMM     | 0.39        | 391011        | 743603        | 14530       | <b>2969</b> | 383        | 1038       | 30         |
| GMPHDRd20   | 0.40        | 672716        | 461898        | 15757       | 15952       | 537        | 294        | 25         |
| FlowTracker | 0.34        | 646522        | 488092        | <b>7230</b> | 17295       | 487        | 328        | 19         |
| MrMOT       | 0.40        | 699000        | 435614        | 76179       | 9574        | 636        | 403        | 17         |

### Objekt-Tracking Zusammenfassung

Die anderen gebenchmarkten Verfahren sind meist rechenaufwändig, ineffizient implementiert und für bestimmte Sensor-Konfigurationen konzipiert. Es werden häufig Bilddaten von einzelnen Sensoren verarbeitet, spezifische Annahmen über Objekte getroffen und mit fixen Zeitschritten gearbeitet.

Im Vergleich zu diesen Verfahren ist unser System sehr flexibel. Das Tracking-Verfahren selbst ist hochperformant. Durch die Modularisierung, Flexibilität und insbesondere den zeitgerechten Umgang mit empfangenen Detektionen lässt sich das Multi-Objekt-Tracking System über Rechengrenzen hinweg skalieren. Es können neue Sensoren hinzugefügt werden, Detektionen können durch beliebige Detektionsalgorithmen durchgeführt werden und durch die Verteilbarkeit auf mehrere Rechner kann die Rechenlast geteilt werden.

Weitere Details zum Multi-Objekt-Tracking Verfahren befinden sich noch im Veröffentlichungsprozess.

Das entwickelte Verfahren erfüllt alle Anforderungen für den Einsatz im RavE-Bike Szenario. Es lassen sich so selbst die Objektdetektionen der Hafen-Kamerainfrastruktur, welche leider unvermeidbar über eine Sekunde Latenz aufweisen, verarbeiten. Durch Prediktion der erkannten Objekte kann die Latenz somit grundsätzlich ausgeglichen werden. Jedoch sind Prädiktionen über ein solch langen Zeitraum problematisch für Sicherheitsanwendungen wie Kollisionsvermeidung. Das Problem besteht darin, dass innerhalb einer Sekunde ein großes bewegtes Hindernis seine Bewegungsrichtung unvorhersehbar ändern kann. Auf Grund der langen Latenz von über einer Sekunde bei der bestehenden Sensorik haben wir mit den Projektpartnern beschlossen, die Hafen Kamerainfrastruktur nicht zur Kollisionsvermeidung zu nutzen.



## II.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Projektlaufzeit erstreckte sich vom 16.04.2018 bis zum 15.06.2021. Die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind in nachfolgender Übersicht dargestellt:

Tabelle 11: Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

| Pos.                       | Ausgaben/Finanzierung                | Lt. ZWB/ÄB          | IST          |
|----------------------------|--------------------------------------|---------------------|--------------|
| A)                         | Materialkosten                       | - €                 |              |
| B)                         | FE-Fremdleistungen                   | - €                 |              |
| C)                         | Personalkosten                       | - €                 |              |
|                            | Gehälter                             | 271.544,00 €        | 288.046,92 € |
|                            | Entgelte                             | 44.366,40 €         | 32.562,94 €  |
|                            | Gemeinkosten                         | - €                 |              |
|                            | Summe C                              | 315.910,40 €        | 320.609,86 € |
| D)                         | Reisekosten                          | 1.110,00 €          |              |
| E)                         | Anlagekosten                         | - €                 |              |
| F)                         | Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten | 3.165,00 €          |              |
| G)                         | Gesamte unmittelbare Vorhabenkosten  | <b>320.185,40 €</b> |              |
|                            |                                      |                     |              |
| K)                         | Übersicht über die Finanzierung      |                     |              |
|                            | <b>Eigenmittel</b>                   | - €                 |              |
|                            | <b>Zuwendung</b>                     | <b>320.185,40 €</b> | 320.609,86 € |
|                            | <b>Förderquote</b>                   | 100%                |              |
| Alle Betragsangaben in EUR |                                      |                     |              |

## II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt eingesetzten Mittel wurden nach dem Grundsatz der Angemessenheit und Sparsamkeit verwendet. Das beschriebene Verbundvorhaben beinhaltet Arbeiten, die anteilig von öffentlichen Einrichtungen unter Beteiligung von Industriepartnern durchgeführt wurden. Eine Finanzierung für die erheblichen Ausgaben entsprechend den Angaben im Antrag waren nicht aus Eigenmitteln zu bewerkstelligen. Das Vorhaben konnte daher nur durch eine entsprechende Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft durchgeführt werden.

## II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

### II.4.1 Geplante Ergebnisverwertung

Die Verwertung der Projektergebnisse basiert auf 5 Säulen mit folgender Partner-Beteiligung:

Tabelle 12: Verwertungskonzept des Antragstellers

|   | Verwertungsbereich   | IFF |
|---|--|-----|
| 1 | Publikation der Ergebnisse   | X   |
| 2 | Darstellung des Projektes auf Fachmessen, Projektworkshops   | X   |
| 3 | Einbindung der Ergebnisse in die Lehre   | X   |
| 4 | Veröffentlichung von anonymisierten Forschungsdatensätzen, Konstruktionsplänen und Software unter Open-Source Lizenz | X   |
| 5 | Wirtschaftliche Verwertung der Resultate   | X   |

### II.4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten mit Zeithorizont

Einhergehend mit Industrie 4.0 und der Fertigung auf „Losgröße 1“ ist auf Fachmessen (z.B. LogiMAT, Hannovermesse) ein deutliches Anwachsen des Interesses für intelligente, vernetzte Systeme zu verzeichnen. Das Interesse für Umgebungswahrnehmungsmodule hängt insbesondere mit den wachsenden Anforderungen an die innerbetriebliche Arbeits- und Prozesssicherheit zusammen. Interessensbekundungen zu Umgebungswahrnehmungsmodulen gibt es beispielsweise seitens der Automobilzulieferer: Weidplas GmbH, Geiger Automotiv, KWD Schnellecke. Kooperative Systeme auf Basis kognitiver und informationstechnischer Funktionen im erweiterten Wahrnehmungshorizont sind für Logistikdienstleister interessant: VLS Engineering GmbH. Interessensbekundungen zu kooperativen wirkenden Systemkomponenten in Form einer visuellen Umgebungserfassung gibt es seitens des Kameraherstellers: ELTEC Elektronik AG. Die Volkswagen Konzernlogistik hat Transportwagen für genauere Untersuchungen hinsichtlich kooperativer Transporte unter besonderer Betrachtung der Wirkungskette Mensch-Maschine zur Verfügung gestellt.

Weitere potentielle Märkte ergeben sich mit der Übertragung des Konzeptes auf eine Anwendung in einem Freizeitpark bzw. Messegelände. Dabei eröffnet sich für den Besucher die Möglichkeit, das Areal mit seinen Sehenswürdigkeiten entsprechend den persönlichen Interessen und unabhängig von der Kondition individuell zu erkunden, ohne die negativen Aspekte fahrradoffener Areale (Häufung von Fahrrädern an den Highlights, permanentes Mitführen der Räder) zu erleben. Nutzer sind Familien mit Kindern oder ältere Menschen, die durch Realisierung des Konzeptes einen komfortablen Zugang zu Freizeit-, Messe- und Naherholungsangeboten erhalten. Als potentielle Anwender des Systems kommen allein in Deutschland ca. 86 Landschaftsparks<sup>18</sup> und über 100 Themen- und Freizeitparks in Frage. Durch eine geeignete Präsentation von Zusatzinformationen, etwa über anstehende Events oder Highlights entlang der Fahrstrecke, kann es gelingen, neben der eigentlichen Mobilitätssteigerung einen weiteren Zusatznutzen für die Parkbetreiber zu generieren. Hinsichtlich

der Komplexität des Gesamtvorhabens sind industrielles und Freizeitszenario vergleichbar (abgeschlossenes Areal, definierte Wege, ...), so das eine Übertragung realistisch erscheint.

Autonome Fahrzeuge, die im Publikumsbetrieb mit einem Ruf-Konzept betrieben werden, existieren nach dem Kenntnisstand des Konsortiums noch nicht. Praktische Umsetzungen sind bisher lediglich auf Prototypenniveau publiziert. Exemplarisch sei hier ein Projekt der Universität von Singapur genannt, bei dem im Universitätsgelände ein Fahrzeug auf Golf-Caddy Größe geordert werden kann<sup>19</sup>. Eine Übertragung des Systems auf den Stadtpark ist nach Aussage der Entwickler vorgesehen. Der Kostenaufwand für die Umrüstung pro Fahrzeug für das autonome Fahren wird mit 30.000 Dollar angegeben<sup>20</sup>. Auf diesem Niveau wäre das System nicht wirtschaftlich zu betreiben.

Alternative Betriebsmittel zur Gewährleistung individueller Mobilität in einer Parklandschaft bzw. in Industriearealen können durch traditionelle Verkehrsmittel (park- bzw. werksinterne Shuttle-Busse) oder individuelle Fahrzeuge wie (Miet-)Fahrräder oder Segways gewährleistet werden. Die Frage der Betriebswirtschaftlichkeit lässt sich nur unter Berücksichtigung verschiedener Parameter wie der Arealgröße, der Nutzerzahlen, der Lokalisierung der „Hotspots“ usw. beantworten. Gleichzeitig muss vom Betreiber hinterfragt werden, welches Beförderungskonzept gewünscht wird. Das Ruf-System verbindet die positiven Eigenschaften des Individualverkehrs mit denjenigen eines Shuttlebusses. Der Nutzer ist in der Lage, sich unabhängig von Fahrlinien und Abfahrtzeiten zu bewegen, gleichzeitig wird aber für die individuellen Verkehrsmittel durch das Teilen mit anderen Anwendern eine hohe Auslastung garantiert.

### **II.4.3 Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten mit Zeithorizont**

Die Ergebnisse des Projektvorhabens werden durch den Antragsteller auf wissenschaftlicher Seite, primär durch die Kooperationspartner OVGU und IFF, über drei Kanäle veröffentlicht:

#### **1. Publikationen**

Die zentralen Ergebnisse werden als wissenschaftliche Publikationen auf relevanten Konferenzen/Workshops vorgestellt. Dabei wird darauf geachtet, dass auch wenn der wissenschaftliche Schwerpunkt auf einem Einzelaspekt liegt, das gesamte Projekt vorgestellt wird.

#### **2. Veröffentlichung der Forschungsdaten**

Die im Hafenszenario gesammelten Daten (Sensormessungen, extrahierte Features, resultierende Verfahrbefehle, Nutzereingaben) werden nach erfolgter Erstausswertung für die wissenschaftliche Forschung und Lehre unter der Creative Commons Lizenz CC BY-NC-SA 4.0 zur Verfügung gestellt werden. Metadaten, wie die Methodik, Erhebungsdaten, beteiligte Forschende, werden als Textdatei eingereicht. Die Prüfung der sachlichen Richtigkeit der Daten wird durch die durchführenden Wissenschaftler vorgenommen. Soweit Rechte Dritter berührt werden, werden Einverständniserklärungen eingeholt und gemeinsam mit den Daten gespeichert.

#### **3. Veröffentlichung der Implementierungen**

Die entwickelten Softwarebibliotheken werden der wissenschaftlichen Community unter einer Open Source Lizenz zur Verfügung gestellt.

Ausgehend von der Idee der Antragssteller, dass die Bearbeitung des Vorhabens unmittelbaren Eingang in die Lehre finden sollte, wird der wissenschaftliche Nachwuchs in Form von studentischen Mitarbeiter in die Forschungsarbeit eingebunden, als auch deren Ergebnisse in entsprechenden Lehrveranstaltungen besprochen.

Die wissenschaftlichen Resultate werden zudem in den Austausch im Rahmen des Netzwerkes „Assistenz in der Logistik“ eingebracht und über die entwickelte Kompetenz über die entsprechenden Transferstellen sichtbar gemacht.

#### **II.4.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Am Ende der Projektlaufzeit:

1. kann auf ein variabel konfigurierbares E-Bike-Modulsystem zurückgegriffen werden,
2. besteht eine Hard- und Softwarelösung für die Implementierung eines verteilten Ruf- und Leit-System,
3. wurde das Konzept unterschiedlichen Szenarien erprobt, so dass ein auf breiten Erfahrungsschatz zum betriebswirtschaftlich orientierten Einsatz zurückgegriffen werden kann.

Entsprechend schlüsselt sich die Verwertungsstrategie in unterschiedlichen Richtungen auf, wobei es für die weitere Vermarktung von großer Bedeutung ist, dass auf eine existierende, erfolgreich betriebene Implementierung verwiesen werden kann:

**Zu 1:** Der Entwurf der Trägerplattform dient als Ausgangspunkt für die Planung einer Kleinserienproduktion durch den Industriepartner Pedalpower. Besonders aussichtsreich beurteilen die Antragsteller dabei die Möglichkeit der variablen Konfiguration des Systems im Hinblick auf verschiedene Ausstattungsmerkmale, die nach Projektabschluss weiter ausgebaut werden kann.

**Zu 2:** Darauf aufbauend lassen sich weitere Anwendungsfelder aggregieren. Die potentiellen Applikationen sind neben den Use-Cases im industriellen Bereich auch Parklandschaften. Allein in Deutschland existieren ca. 86 Landschaftsparks und über 100 Themen- und Freizeitparks. Dabei geht das Konsortium davon aus, dass sich aufbauend auf den Ergebnissen des Projektes unterschiedliche Degradierungsstufen sehr effektiv umsetzen lassen. Zum anderen ergeben sich weitere vielfältige Anwendungsmöglichkeiten im industriellen Kontext. Als Anwender kommt prinzipiell jeder größere Industriebetrieb mit geeignetem Werksgelände aber auch komplette Gewerbeparks, wie beispielsweise Chemieparcs in Frage. Die existierende Installation des Hafen-Szenarios dient dabei als Ausgangspunkt und Aushängeschild für die Akquise.

Wissenschaftlich muss das Konzept für diese neuen Szenarien weiterentwickelt werden, da die Unsicherheit, insbesondere bezüglich des Handelns von Passanten steigt. Diese sind anders als im industriellen Anwendungsfall nicht über die Installation des Rufsystems informiert oder belehrt worden. Folglich wird die Nutzerinteraktion hier einen wesentlichen Fokus einnehmen müssen.

**Zu 3:** Die Detaillösungen, die im Rahmen der Umsetzung des „RavE-Bike“ Projektes zur Nutzerinteraktion, dem Management und der Koordination entstanden sind, lassen sich mit dem erprobten Hardware- und Infrastrukturkonzept auch auf gänzlich andere Einsatzfelder anwenden (Smart Home, Industrie 4.0, Logistiksznarien, etc.).

#### **II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Regelmäßige Informationsrecherchen (Literaturrecherchen, Recherchen im Internet und Teilnahme an Fachtagungen und Workshops) wurden vorrangig von den Forschungspartnern (OVGU und IFF) durchgeführt.

Es sind während der Durchführung des Vorhabens keine Fortschritte von anderen Stellen bekannt geworden, die für den Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens relevant wären.

## **II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen**

Es gab folgende Veröffentlichungen:

Hünermund, M., Groneberg, M., & Schütz, A. (2020, October). Fast Connected Components Object Segmentation on Fused Lidar and Stereo-Camera Point Clouds with Visual-Inertial-Gimbal for Mobile Applications Utilizing GPU Acceleration. In *International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication* (pp. 73-83). Springer, Cham.

Es sind folgende Veröffentlichungen geplant:

Multi-Objekt-Tracking Verfahren

## **III. Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht, der nicht veröffentlicht wird**

Siehe Anlage.



- 
- <sup>1</sup> Chong, Z. J., et al. "Autonomy for mobility on demand." Intelligent Autonomous Systems 12. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 671-682.
- <sup>2</sup> Sven Beiker, „Implementation of an Automated Mobility-on-Demand System“. In Autonomous Driving: Technical, Legal and Social Aspects, Springer Berlin, Heidelberg, 2016
- <sup>3</sup> s. auch <http://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/materialflusstechnik/forschung.html>
- <sup>4</sup> [https://delivering-tomorrow.com/wp-content/uploads/2015/08/CSI\\_Studie\\_Low\\_Sensor.pdf](https://delivering-tomorrow.com/wp-content/uploads/2015/08/CSI_Studie_Low_Sensor.pdf)
- <sup>5</sup> Richter, K. u. a.: Leuchtturmprojekt Logistik – IoT-Konnektivität im intelligenten Logistikkaum. [http://plattform-digitale-netze.de/app/uploads/2017/06/20170612\\_PF1-Leuchtturmprojekt-Logistik.pdf](http://plattform-digitale-netze.de/app/uploads/2017/06/20170612_PF1-Leuchtturmprojekt-Logistik.pdf) 12.08.2017
- <sup>6</sup> [Esp14a] J. Esparza; M. Helmle; Bernd Jähne: Towards surround stereo vision: Analysis of a new surround view camera configuration for driving assistance applications, 2014 IEEE 17th International Conference on, Intelligent Transportation Systems (ITSC), October 8-11, 2014. Qingdao, China.
- <sup>7</sup> José Esparza, Michael Helmle, Bernd Jähne: Wide Base Stereo with Fisheye Optics: A Robust Approach for 3D Reconstruction in Driving Assistance. GCPR 2014: 342-353
- <sup>8</sup> [Rau16] G. Rauscher; D. Dube; A. Zell: A Comparison of 3D Sensors for Wheeled Mobile Robots, In: Intelligent Autonomous Systems 13, 29-41, 2016.
- <sup>9</sup> <https://www.alliedmarketresearch.com/3D-camera-market>
- <sup>10</sup> [Her15] Hedenberg, Klas, Åstrand, Björn (2015). 3D Sensors on Driverless Trucks for Detection of Overhanging Objects in the Pathway. ICRA 2015 Workshop on Autonomous Industrial Vehicles: From the Laboratory to the Factory Floor, Seattle, WA, USA, 30 May, 2015.
- <sup>11</sup> [Her15] Hedenberg, Klas, Åstrand, Björn (2015). 3D Sensors on Driverless Trucks for Detection of Overhanging Objects in the Pathway. ICRA 2015 Workshop on Autonomous Industrial Vehicles: From the Laboratory to the Factory Floor, Seattle, WA, USA, 30 May, 2015.
- <sup>12</sup> Richter, K.; Pathan, S.; Soffner, M.: Bildbasierte Verfahren zur Situationsanalyse im Intelligenten Logistikkaum. In: VDE Verlag GmbH (Hrsg.): Tagungsband – Innosecure 2013. Berlin: VDE-Verlag GmbH, 2013, S. 87-93, ISBN: 978-3-8007-3532-7
- <sup>13</sup> Richter, K.; Schumann, M.; Hafenumschlag im intelligenten Logistikkaum – Tests in der virtuellen Welt. In: Hebezeuge Fördermittel, Berlin 54 (2014) 11-12.
- <sup>14</sup> Hagen Borstell, Liu Cao, Saira Pathan, Olaf Poenicke, and Klaus Richter: Toward Mobile Monitoring of Cargo Compartment Using 3D Sensors for Real-Time Routing, To appear in: Lect. Notes Logistics, Jan Dethloff et al. (Eds): Logistics Management, 978-3-319-13176-4, Springer, 2015.
- <sup>15</sup> Michael Soffner, [Mykhaylo Nykolaychuk](#), [Friederike Adler](#), [Klaus Richter](#): A Case Study of Radio-Based Monitoring System for Enhanced Safety of Logistics Processes. [SAFECOMP Workshops 2012](#): 477-485
- <sup>16</sup> [Hör12] Hörl, T: Warnsystem für Krane zur Kollisionsvermeidung mit ortsfesten und beweglichen Objekten im Innen- und Außenbereich. In: Tagungsband zur 20. Kranfachtagung – 20 Jahre Evolution im Kranbau (2012), S. 157-168.
- <sup>17</sup> M. Aramrattana; T. Larsson, J. Jansson, C. Englund (2015): Dimensions of Cooperative Driving, ITS and Automation. 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Seoul, South Korea, June 28 - July 1, 2015.
- <sup>18</sup> Wettbewerb „Deutschlands schönster Park“
- <sup>19</sup> Chong, Z. J., et al. "Autonomy for mobility on demand." Intelligent Autonomous Systems 12. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 671-682.
- <sup>20</sup> Magazin für Autonome Autos, Autonome Systeme, Assistenzsysteme und Telemetrie, "Singapur: Autonome Fahrzeuge im Park", 23.10.2014