

# Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: <b>Otto-von-Guericke-Universität</b>	Förderkennzeichen: <b>03VNE2063C</b>
Vorhabenbezeichnung: <b>RavE-Bike - Ruf- und Leitsystems für autonome vernetzte E-Bikes</b>	Teilvorhabenbezeichnung: <b>RavE-Bike-Plan - Pfadplanung und kontextsensitive Koordination</b>
Laufzeit des Vorhabens: <b>von: 16.04.2018 bis: 15.06.2021</b>	
Berichtszeitraum: <b>von: 16.04.2018 bis: 15.06.2021</b>	
Erstellt am: <b>29.11.2021</b>	



## Inhalt

I.	Kurzdarstellung .....	4
I.1	Aufgabenstellung .....	4
I.1.1	Ziel des Gesamtvorhabens .....	4
I.1.2	Wissenschaftliche und/ oder technische Arbeitsziele .....	5
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	6
I.2.1	Konsortialstruktur .....	6
I.2.2	Vorarbeiten und Expertise, die in das Vorhaben eingebracht wurden .....	7
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	7
I.4	Wissenschaftlicher/technischen Stand, an den angeknüpft wurde .....	8
I.4.1	Stand der Wissenschaft und Technik .....	8
I.4.1.1	Sensordatenfusion und Umgebungsmodellierung .....	8
I.4.1.2	Kontextbeschreibung, -identifikation und -wechsel .....	9
I.4.1.3	Pfadplanungsalgorithmen .....	10
I.4.1.4	Übersicht zur aktuellen Patentsituation .....	11
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	11
	Tabelle 6: Übersicht der Erprobungspartner .....	11
II.	Eingehende Darstellung .....	12
II.1	Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen .....	12
II.1.1	Arbeitspaket 1: Spezifikation der Anwendungsszenarien .....	12
II.1.2	Arbeitspaket 3: Simulation und Organisation des verteilten Systems .....	13
II.1.3	Arbeitspaket 7: Sensordatenallokation und Lokalisation .....	18
II.1.4	Arbeitspaket 8: Wissensrepräsentation und Kontext-Awareness .....	21
II.1.5	Arbeitspaket 9: Systemintegration und Tests .....	22
II.1.6	Arbeitspaket 10: Probetrieb, Evaluation, Optimierung .....	24
II.2	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	27
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	27
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	28
II.4.1	Geplante Ergebnisverwertung .....	28
II.4.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten mit Zeithorizont .....	28
II.4.3	Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten mit Zeithorizont .....	29
II.4.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	29
II.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	30
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen .....	30
III.	Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht, der nicht veröffentlicht wird .....	32
IV.	Kurzfassung (Berichtsblatt) .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verzahnung der Arbeitspakete des Projekts „RavE-Bike“ .....	8
--	---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Teilprojekt von OVGU im Verbundprojektes „RavE-Bike“ .....	5
Tabelle 2: Ziele des TP 3 im Verbundvorhabens „RavE-Bike“ .....	5
Tabelle 3: Projektpartner des Verbundprojektes „RavE-Bike“ .....	6
Tabelle 4: Teilprojekte des Verbundprojektes „RavE-Bike“ .....	6
Tabelle 5: Rolle des Projektpartners im Verbundprojekt .....	8
Tabelle 6: Übersicht der Erprobungspartner .....	11
Tabelle 7: wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	27
Tabelle 8: Verwertungskonzept des Antragstellers .....	28

# 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. Im Rahmen des Projektes wurde eine erste Realisierung des Konzepts anhand eines **Anwendungsszenarios** auf einem **Industriegelände** (Magdeburger Hanse-Hafen) vorgenommen. 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 wurde ein prototypischer Betrieb mit bis zu 2 automatisierten, auf die industrielle Anwendung zugeschnittenen, Fahrradsystemen umgesetzt.

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 Szenarios 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 erfolgte im Rahmen eines Verbundprojekts mit vier Teilprojekten (TPs). Die Otto-von-Guericke Universität Magdeburg bearbeitete das TP 3 (siehe hierzu Tabelle 1).

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

Partner	TP-Nr.	Bezeichnung des Teilprojekts	Akronym
OVGU	TP 3	Pfadplanung und kontextsensitive Koordination	RavE-Bike-Plan

Um die gesteckten Ziele zu erreichen, musste das FuE-Vorhaben den Stand der Technik erweitern und setzte 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** wurde die Wahrnehmung der autonomen Elemente und des Rufsystems insgesamt erforscht. Dabei galt 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 TP3.

Tabelle 2: Ziele des TP 3 im Verbundvorhabens „RavE-Bike“

Partner	Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele
OVGU	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mechanismen der Kontextbeschreibung, -detektion und -sensitivität der Verarbeitungskette</li> <li>• Auslegung der fahrradlokalen Sensorik und Aktorik für autonomes Fahren</li> <li>• Fusionsstrategie für die Zustandsschätzung des autonomen Systems auf der Basis interner und externer Sensordaten</li> <li>• Planungs- und Koordinationsstrategien für ein Multi-Roboter-System bei unsicherem Umgebungswissen</li> </ul>

Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des TP3 zielen im Wesentlichen auf die Umsetzung einer **Kooperations- und Steuerungsstruktur** zur Koordination der verschiedenen Entitäten autonomer Fahrräder. Einen wesentlichen Aspekt bildet hierbei ein Mechanismus zur **Kontextdetektion und -beschreibung** inkl. der nachgelagerter **Planungsebene**, welche die Fahrzeuge in die Lage versetzen dynamisch auf unterschiedliche Umgebungs- und Fahrsituationen zu reagieren. Je nach Kritikalität der Fahrsituation bzw. Zuverlässigkeit der Umgebungsinformation werden so unterschiedliche Fahrstrategien wie etwa das Fahren mit reduzierter Geschwindigkeit oder der Abwurf bestimmter Automatisierungsfunktionen möglich, ohne dies mit explizitem Regelapparat zu hinterlegen. Die Entwicklung dieser Kooperations- und Steuerungsstrategien erfolgte im Rahmen eines modelbasierten Entwicklungsansatzes auf Basis eines **komplexen Simulationsmodells** welches die mikro- (einzelnes physikalisches Fahrradsystem) und makroskopischen (Verhalten der Fahrzeugflotte) Effekte des Gesamtsystems abbildet.

Die Grundlage für die Kontextdetektion bildet eine umfangreiche Wissensbasis auf Basis einer **komplexen Umfeldfusion** von verschiedenen internen und externen Sensordaten. Hierfür wurde ein **multimodales Sensorkonzept** implementiert, welches an das kostensensitive Fahrradszenario angepasst wird. Auf Basis einer geeigneten **Metrik zur Beschreibung des Situationskontextes** erfolgen dann die angesprochenen Adaptionen der Fahrstrategien.

## 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, - Fakultät für Maschinenbau, Institute für Mobile Systeme	OVGU	Magdeburg
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, - 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

## 1.2.2 Vorarbeiten und Expertise, die in das Vorhaben eingebracht wurden

Die **Otto-von-Guericke Universität Magdeburg** (kurz OVGU) versteht sich als Profiluniversität und strebt eine scharf konturierte und schlanke Struktur an, die in den Ingenieur- und Naturwissenschaften sowie in der Medizin einen traditionellen Schwerpunkt hat, und in den Wirtschafts-, Sozial- und Geisteswissenschaften für eine moderne Universität in der Informationsgesellschaft unerlässliche Disziplinen sieht. Aufgabe unserer Universität ist es, den Stand der Bildung und Wissenschaft durch Lehre und Forschung voranzutreiben.

Die Arbeitsgruppe vom **Institut für Intelligente Kooperierende Systeme der Fakultät für Informatik** um Prof. Sebastian Zug ist mit Ruf von Prof. Zug im Frühjahr 2019 an die Universität Freiberg aus dem Konsortium ausgeschieden. Die Arbeiten der Mitarbeiter der Arbeitsgruppe wurden ab diesem Zeitpunkt vom Partner OVGU-IMS koordiniert.

Das **Institut für Mobile Systeme (IMS) der Fakultät für Maschinenbau** wurde am 01.01.2006 aus dem Institut für Maschinenmesstechnik und Kolbenmaschinen (IMKO) und dem Institut für Mechatronik und Antriebstechnik (IMAT) gegründet. Der Lehrstuhl für Mechatronik vertritt das Gebiet der Mechatronik und Antriebstechnik in Maschinenbau und Fahrzeugtechnik. Die Entwicklung von Steuerungs- und Regelungsfunktionen für assistierte und automatisierte Fahrfunktionen wird seit 2012 von der am Lehrstuhl für Mechatronik angegliederten Forschungsgruppe „Autonome Fahrzeuge“ vertreten.

Auszug bisheriger Projektarbeit:

- Bahnplanungs- und Regelungsalgorithmen für autonome Fahrzeuge
- Elektrisch angetriebenes Fahrzeug zur Ausbringung biologische Pflanzenschutzmittel im Mais
- Einheitliches Planungsverfahren für die aktive Sicherheit
- Planung unter Unsicherheiten

Zugeschnitten auf dieses breite Anwendungsspektrum bietet das Institut ein ebenso breitgefächertes Lehr- und Forschungsangebot an Komponenten- und Systemlösungen der Fahrzeugtechnik von der Entwicklung von Antriebssystemen, über den Aufbau von Gesamtfahrzeugen bis zur Implementierung von übergeordneten Leit- und Steuerfunktionen. In enger Abstimmung mit den breitgefächerten ingenieurwissenschaftlichen Schwerpunkten der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, befasst sich der Lehrstuhl in Forschung und Lehre mit dem rechnergestützten Entwurf und dem prototypischen Aufbau der verschiedenen Systeme. Methodische Grundlage ist die interdisziplinäre Betrachtungsweise, welche Aufgabenstellungen und Lösungen des Maschinenbaus, der Elektronik und der Informationsverarbeitung zu einem geschlossenen Systemkonzept verbindet.

Aktuelle Problemstellungen industrieller Anwendungen können somit auf einem hohen Niveau wissenschaftlicher Forschung bearbeitet werden. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass ein moderner und realitätsnaher Systementwurfsprozess von der Systemkonzeption bis zur vollständigen Realisierung komplett beherrscht wird.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das 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.

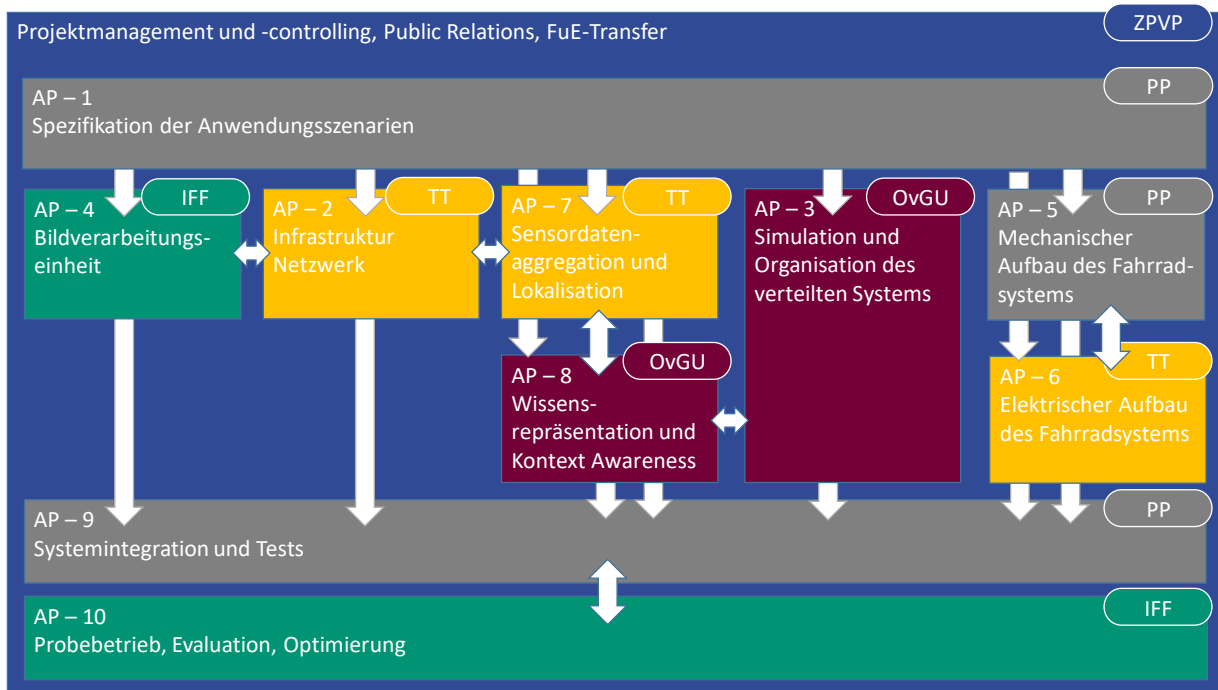


Abbildung 1: Verzahnung der Arbeitspakete des Projekts „RavE-Bike“

Tabelle 5 gibt einen Überblick, welche Rolle der Otto-von-Guericke Universität 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
OVGU	<ul style="list-style-type: none"> <li>adaptive Regelung, Pfadplanung in unsicheren Umgebungen</li> <li>Umgebungsrepräsentation für Outdoorszenarien, Kontextsensitive Koordination von verteilten Entitäten</li> </ul>	AP1, AP3, AP7, AP8, AP9, AP10	AP3, AP8

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

### I.4.1 Stand der Wissenschaft und Technik

#### I.4.1.1 Sensordatenfusion und Umgebungsmodellierung

Im Kfz-Bereich sind spätestens seit der Einführung des ESP robuste Fahrzustandsbeobachter Stand der Technik. Diese schätzen in einem modellbasierten Ansatz auf Basis eines komplexen physikalischen Fahrzeugmodells den Bewegungszustand des Fahrzeuges mittels des Kalman-Filters, einer seiner Erweiterungen (extended KF, unscented KF) oder nichtlinearen Beobachtungsansätzen<sup>345</sup>. Die robuste Zustandsschätzung des eigenen Bewegungszustandes ist wiederum eine wesentliche Voraussetzung für die Verfolgung und Prädiktion externer Objekte im Rahmen eines Multi-Sensors, Multi-Target Fusionsansatzes, wiederum auf Basis des Kalman-



Filters. Ein Beispiel für ein kommerziell umgesetztes System findet sich im Fahrerassistenzsystem ACC, hier angewandt auf die reine Objektverfolgung in Fahrzeuginnenrichtung<sup>6</sup>.

Der Bereich der Outdoor-Umgebungsmodellierung zielt gegenwärtig vorrangig auf das autonome Fahren von Kraftfahrzeugen. Basierend auf einer Vielzahl von multimodaler Umgebungssensorik (Kameras, Radar, Ultraschall, Laserscanner) wird eine Abbildung der relevanten Features abgeleitet. Standard in diesem Bereich sind leistungsfähige 360 Grad Lidarsysteme, die die Umgebung auf bis zu 64 Ebenen bis zu einer Distanz von 200m abtasten<sup>7</sup>. Darauf aufbauend extrahieren nachgeordnete Verarbeitungsketten relevante Informationen wie Freibereiche<sup>8</sup>, andere Fahrzeuge, Passanten<sup>9</sup> usw. Eine Umsetzung dieses Ansatzes findet sich im Google Fahrzeug „Wayo“<sup>10</sup>. Analog zu anderen ähnlichen Implementierungen werden aufbauend auf der Featureextraktion dynamische und statische Hindernisse klassifiziert, beispielsweise zwischen Fußgängern und Radfahrern unterscheiden, um anhand spezifischer Bewegungsmodelle Aussagen zur zukünftigen Situation zu treffen<sup>11</sup>. Um dieses Konzept kostengünstig umzusetzen werden gegenwärtig zwei Zielrichtungen verfolgt, zum einen wird die Zahl der Abtastebenen auf ein Minimum beschränkt, zum anderen sind die Fahrzeughersteller bestrebt die Umgebungsabbildung mit der Verwendung von Kameras zu realisieren.

Dieser Richtung folgten auch Projekte zur Outdoor-Robotik. Zumeist kombinierten die Systeme bildgebende Verfahren<sup>12</sup> (Objekterkennung) mit Single-Layer Lidar-Systemen<sup>13</sup> (Outdoor-SLAM Anwendung). Diese werden durch satellitengestützte Navigation und Inertialmesysteme<sup>14</sup> ergänzt. Aktuelle Arbeiten zielen darauf ab, die Laserscanner durch 3D Kameras zu ersetzen<sup>15</sup>. Bei der Analyse der relevanten Darstellungen lässt sich feststellen, dass anders als im Bereich der Indoor-Lokalisation, noch keine etablierten „Standards“ bestehen. So existieren beispielsweise nur rudimentäre Implementierungen für Outdoor-Anwendungen unter dem Robot Operating System (ROS) Framework.

Die genannten Ansätze decken zwar, wie in Tabelle 5 (Vergleichende übergreifende Einordnung) der Gesamtvorhabenbeschreibung dargestellt, in der Summe alle Aspekte (Erfassung des Verkehrs, Kategorisierung von Hindernissen, des Nutzers, usw.) ab, die für das intendierte Szenario umzusetzen sind, allerdings lassen sich aber nicht in den bisher domainspezifischen Randbedingungen (Kostenniveau, Energieaufnahme, Wahl der Sensorpositionierung) vereinen. Entsprechend ist die Anwendung einer übergreifenden Egozustands- und Umfeldschätzung auf das Szenario Fahrrad zum aktuellen Zeitpunkt nicht bekannt.

#### 1.4.1.2 Kontextbeschreibung, -identifikation und -wechsel

Die zentrale Herausforderung bei der zuverlässigen sensorbasierten Abbildung relevanter Aspekte der Umgebung liegt in der Breite der möglichen Situationen. Diese bestimmt sich durch die Konfiguration der Umgebung (Dynamik der Szene, Materialien der Oberflächen, räumliche Anordnung der Objekte), die Randbedingungen/Störquellen der Erfassung (Lichteinflüsse, Temperaturen, Untergrund) und dem aktuellen Zustand des Sensorsystems (Parameterisierung, Redundanz)<sup>16</sup>. Abhängig von den aktuellen Spezifika muss zwischen unterschiedlichen Konfigurationen, Gewichtungen und Parametersätzen für die Sensorik gewechselt werden, um kontinuierlich eine hinreichende Qualität sicherzustellen. Die Literatur beschreibt diesen Vorgang als *context awarness*.

Für die Kontextbeschreibung und -identifikation bieten die etablierten Methoden aber bisher nur implizite Darstellungen. Innerhalb der Verarbeitungskette werden aus dem Wissen des Entwicklers herau Methoden integriert, die bestimmte kritische Situationen erkennen und anzeigen sollen (zum Beispiel Regentropfen auf der Kamera<sup>17</sup> oder störendes Umgebungslicht bei Infrarot-Distanzmessungen<sup>18</sup>). Der Kontext muss somit zur Entwicklungszeit bekannt sein

und in Bezug auf den zu erwartenden Kontext korrekt parametrisiert werden. Damit fließt das Kontextwissen implizit in die Anwendung ein. Jüngste Forschungsarbeiten versuchen die Kontextsensitivität bei der Sensorauswahl mit den Methoden des Maschine Learning abzudecken. Anhand eines Referenzdatensatzes, der neben den Messgrößen, erkannten Features auch Randbedingungen umfasst werden Neuronale Netze<sup>19</sup>, Bayesche Netze<sup>20</sup> oder andere Klassifikationen trainiert, um anschließend kontextbezogene Qualitäts- und Gewichtungsinformationen für Sensoren als Ganzes, dessen Rohdaten oder bestimmte Merkmale der Umgebung bereitzustellen.

RavE-Bike geht an dieser Stelle über den Stand der Technik hinaus, in dem die Idee des Kontexts nicht nur auf die Interpretation und Gewichtung der Umgebungsinformationen angewendet wird, sondern auf das gesamte verteilte System. Zu den eingangs erwähnten Aspekten einer Situation kommt dann die gegenwärtige Positionierung des verteilten Systems und die sich draus ergebenden Randbedingungen (Verfügbarkeit von externen Sensoren, redundante Erfassung, Kommunikationsbedingungen)<sup>21</sup> hinzu. Diese zusätzliche Komplexität in der Kontextdefinition lässt sich dann aber nicht mehr implizit handhaben, sondern muss explizit definiert werden. Dazu bedarf es eines geeigneten Kontext-Beschreibungs- und Interpretationskonzeptes, das in die Gesamtarchitektur integriert wird.

#### 1.4.1.3 Pfadplanungsalgorithmen

Die Pfad- bzw. Trajektorienplanung beinhaltet die Bestimmung einer zeitlichen Abfolge von Zustandstransitionen zwischen zwei diskreten Zustandspunkten. Im Kontext des automatischen Fahrens bedeutet dies, einen Bewegungsverlauf zwischen einen gegebenen Startpunkt und einem gewünschten Zielpunkt zu berechnen. Zur Definition dieser Trajektorie existieren in der Literatur, vor allem aus dem Bereich der mobilen Robotik, verschiedenste Methoden. Einige Methoden setzen auf stochastische Suchverfahren über inkrementell wachsende Bäume welche die Umgebung explorieren, wie etwa der Rapidly-exploring Random Tree RRT<sup>22</sup>. Andere Ansätze arbeiten mit einer shortest-path Suche in definierten Bäumen, welche die bekannte Umgebung geeignet diskretisieren. Ein Beispiel hierfür die der Dijkstra-Algorithmus<sup>23</sup> und seiner verschiedenen Erweiterungen wie A\*, D\*.

Eine weitere Klasse von Methoden stellen die regel-, bzw. manöverbasierten Ansätze dar. Hierbei wird über einen gegebenen Regelapparat eine Menge vordefinierter Manöver parametrisiert. Bei den Manövern handelt sich in der Regel um polynomiale Beschreibungen der Zustandsübergänge (parametrierbare Splines). Besonders im definierten Kontext, beispielsweise bei Parkmanövern, haben sich diese Algorithmen als besonders leistungsfähig erwiesen<sup>24</sup>. Schwächen haben sie demgegenüber in unstrukturierten Umgebungen und bei unbekanntem Fahrsituationen.

Eine Alternative zu den genannten Suchverfahren stellen optimierungsbasierte Planungsverfahren auf Basis der optimalen Steuerung dar. Diese berücksichtigen explizit die Fahrzeugdynamik über ein komplexes Fahrzeugmodell im Planungsverfahren und berechnen zugehörige Stellgrößen, die eine physikalische Plausibilität der definierten Trajektorien sicherstellen. Über die Definition geeigneter Zielfunktionen sind diese zudem geeignet, Energieoptimale oder komfortoptimale Trajektorien zu erzeugen<sup>25</sup>. Als nachteilig sind der erhöhte Rechenaufwand und ggf. schlechte Konvergenzeigenschaften zu nennen.

Der im Projekt „RavE-Bike“ verfolgte Ansatz kombiniert Graphensuche und optimierungsbasierte Trajektorienplanung miteinander. Hierbei wird über eine vorgeschaltete globale Suche in einem strukturierten Baum eine Initiallösung für die nachgeschaltete Trajektorienoptimierung berechnet. Der Einstieg in das Planungsproblem ist dabei ein, gegenüber statischen und

dynamischen Hindernissen, kollisionsfreier Pfad. Dies erlaubt bessere Konvergenzeigenschaften und vermeidet lokale Minima der Trajektorienoptimierung. Die über die Kontextidentifikation bereitgestellte Kontextinformation kann zusätzlich genutzt werden, um die Unsicherheit des Umgebungsmodells zu quantifizieren und diese im Planungsproblem über ein angepasstes Zielfunktional zu berücksichtigen. Damit wird ein Übergang von deterministischer kollisionsfreier zu probabilistischer, risikominimaler Planung möglich.

#### I.4.1.4 Übersicht zur aktuellen Patentsituation


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.

### 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. Die OVGU bearbeitete davon AP1, AP3, AP7, AP8, AP9 und AP10

#### II.1.1 Arbeitspaket 1:

##### AP1: Spezifikation der Anwendungsszenarien

##### TAP1.1 Identifikation der relevanten Parameter

Die Recherche vergleichbarer Szenarien, wie automatisierte Zustelldienste, Haushaltsroboter und anderer radgebundener Systeme lieferte Anhaltspunkte für die mikroskopische Auslegung des RavE-Bikes. Dazu wurden Artikel in Fachzeitschriften gelesen und nach relevanten Vergleichsprojekten im Internet recherchiert. Für elektromechanische Fahrradlenk- und Bremsaktuatorik wurde eine Patentrecherche durchgeführt. Die technischen Einsatzparameter im Projekt wurden durch die Untersuchung des Einsatzszenarios festgelegt. Dazu wurden die möglichen Hauptenergieverbraucher, sowohl auf aktorischer, sensorischer und rechentechnischer Ebene identifiziert. Mit der Abschätzung des Gesamtgewichtes wurde ein Antriebsmomentbedarf ermittelt und Rahmenbedingungen wie Einsatzdauer, Fahrgeschwindigkeiten, maximale Beschleunigungen und die Bordspannungsebene festgelegt. Für das elektromechanische Lenk- und Bremssystem wurden Konzepte entwickelt und deren Umsetzung diskutiert. Die auftretenden Lenk-, Brems- und Beschleunigungsmomente sollen mit entsprechender Sensorik durch simulative und reale Fahrversuche ermittelt werden.

##### TAP1.2 Datenerhebung im Hafen

Zunächst wurde gemeinsam mit allen Partnern eine Begehung des Hafengeländes mit anschließendem Gespräch mit den Hafenverantwortlichen durchgeführt. Hierbei wurden grundsätzliche Fragen zu Zutrittsberechtigungen, Sicherheitsvorschriften und infrastrukturellen Gegebenheiten auf dem Gelände geklärt. Die geplanten Messfahrten auf dem Hafengelände konnten aufgrund von Verzögerungen in AP1.1 erst mit einiger Verzögerung durchgeführt werden. Um trotzdem erste Daten zu erhalten wurden Messfahrten auf dem Unicampus durchgeführt. Dabei wurden als Sensorik vier Laserscanner (2D und 3D), vier Kameras (Mono und Stereo), zwei GNSS-Module und eine IMU verwendet. Eines der beiden GNSS-Module agierte dabei als Referenz-System. Ein Teil der Ergebnisse konnte bereits für Vorabtests (z.B. der Wegerkennung oder der Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer) verwendet werden. Ausgehend von den Aufnahmen auf dem Universitätsgelände wurden für die Datenaufzeichnung im Hafen eine Kamera, ein GPS-Modul und die IMU verwendet.



Abbildung 1: Konfiguration des dreirädrigen Messträgers A für die ferngesteuerte Datenaufnahme



Abbildung 2: Konfiguration eines Messträgers für die manuell getriebene Datenerfassung



Abbildung 3 Pfaderkennung im gesammelten Datensatz auf der Basis von Convolutional Neural Networks

Im Ergebnis steht nunmehr eine Tool-Chain bereit, die die variable Aufzeichnung unterschiedlicher Sensorkonfigurationen abdeckt und diese für eine nachträgliche Verarbeitung vorbereitet.

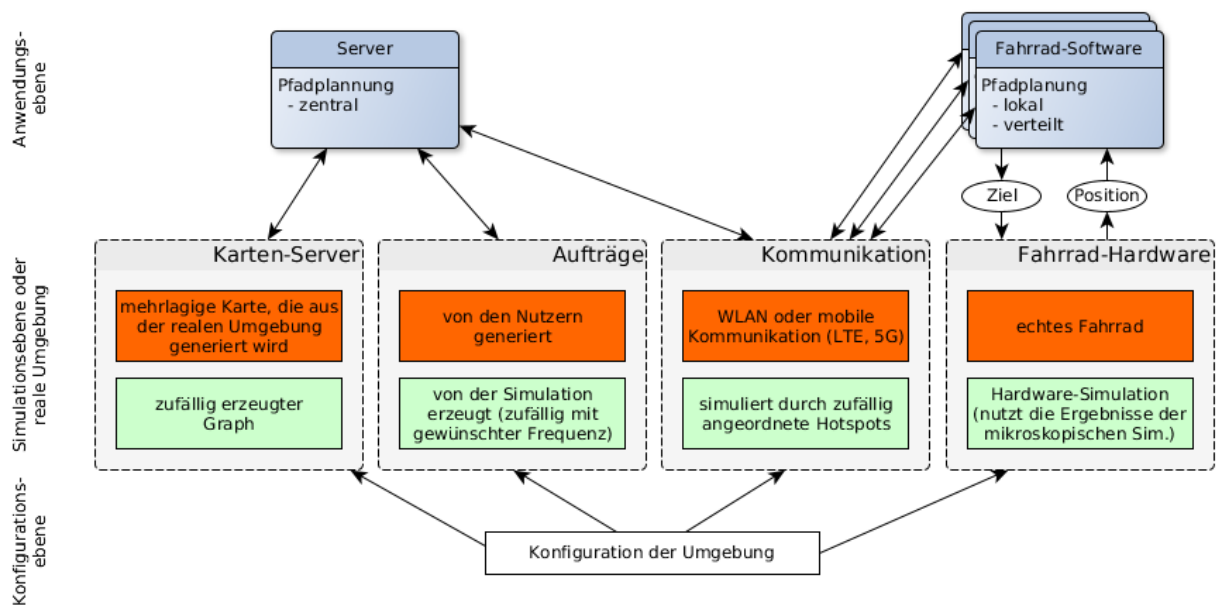
Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit wurde für die ZDF-Sendung „Planet-e“ das Anwendungsszenario im Hafen Magdeburg vorgestellt. Dieser Drehtermin wurde ebenfalls zur Datenaufnahme und Evaluierung des Anwendungsszenarios genutzt.

## II.1.2 Arbeitspaket 3: Simulation und Organisation des verteilten Systems

### TAP3.1 Konzept, Implementierung einer Simulationsumgebung

In der Konzeptphase wurde der hybride Simulationsansatz für das autonome System im Hinblick auf die zwei Ansätze - mikroskopische Darstellung für die Auslegung des Verhaltens des einzelnen Fahrrades und makroskopische Evaluation des Gesamtsystems hinsichtlich der Anforderungen konkretisiert. Auf der mikroskopischen Ebene verknüpft die Simulation die Modellierung der Umgebung im Hinblick auf Pfadattribute (Reibung, geometrische Konfiguration, Steigung, Absätze), dynamische Hindernisse (Fahrzeuge, Personen) mit einem physikalischen Fahrradmodell, das neben der Kinematik und Dynamik auch den Energieverbrauch nachbildet. Der Abstraktionsgrad des Fahrzeugmodells wird dabei jeweils für Energie, Antrieb, Lenkung und Bremse einzeln festgelegt und jeweils in einem gesonderten Simulationsmodell umgesetzt. Als Interface für den Nutzer ist eine abstrakte Beschreibung für die Charakterisierung einer Szene (No-Go-Areas, Haupt-Bewegungskorridor, Hindernisse) vorgesehen die auch das intendierte Bewegungsmuster bzw. Störgrößen enthält. Die mikroskopische Simulation wird mit der Software Matlab/Simulink durchgeführt. Damit können die dynamischen Vorgänge mit verschiedenen Konfigurationen parametrisiert und analysiert werden. Die Teilsimulationen der einzelnen Aktorsysteme sollen später zu einem Gesamtmodell zusammengefügt werden.

Für die Abstraktion auf makroskopischer Ebene wird hingegen das Fahrrad als Punkt dargestellt und die Umgebung auf ein Graph-basiertes Wegenetz reduziert. Den einzelnen Kanten sind spezifische Eigenschaften zuordenbar, die mit analogen Beschreibungsformaten wie bei der mikroskopischen Simulation gehandhabt werden. Erlaubte Wege sollten dynamisch blockiert werden können und eine individuelle Richtungs- und Geschwindigkeitsdefinition enthalten. Im Hinblick auf die Koordination des Gesamtsystems muss zudem von einer lokal variierenden Konnektivität ausgegangen werden. Folglich bedarf es einer geeigneten Abstraktion, um die Abdeckung und die Position von Kommunikationsknoten (Hotspots) im Umgebungsmodell zu gewährleisten. Die Umsetzung erfolgte mit C++ und ROS, wobei für die Visualisierung mit rViz gearbeitet wird. Diverse Konfigurationsdateien (Verwendung der C++-Bibliothek „cereal“ zum Speichern von Klassenzuständen) implementieren die Konfigurationen sowie Systemzustände reproduzierbar und anpassbar. Abbildung 4 fasst die Aspekte des makroskopischen Modells zusammen.



**Abbildung 4: Architektur des Makroskopischen Modells**

Die Konzeptionierung der Simulationsumgebung wurde mit der Integration der Teilmodelle für die Aktorik abgeschlossen.

### TAP3.2 Mikroskopische Simulationsumgebung

Das erste erarbeitete Teilsimulationsmodell, siehe Abbildung 5, bildet die Energieversorgung und den Antriebsstrang ab. Im Modell wurden der Antriebsmotor und Umwelteinflüsse mit Parametern versehen, um deren Wirkung auf die Energieversorgung untersuchen zu können. In einer Parameterstudie wurden die Änderungen der Einflüsse untersucht, um den Antrieb und die Energieversorgung parametrieren zu können.



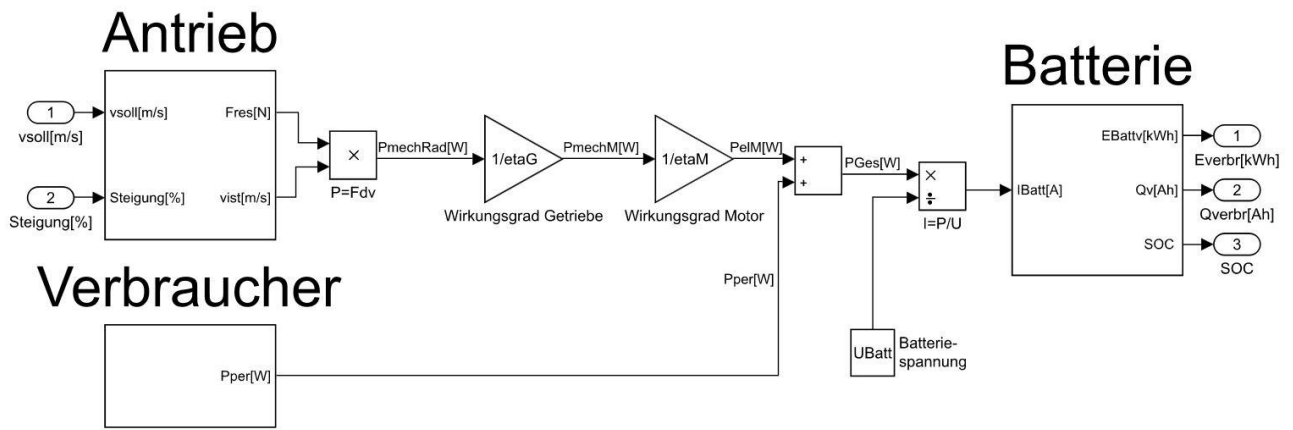


Abbildung 5: Antriebsstrang- und Energiesimulation

Die mikroskopische Simulation wurde mit Hilfe der Software Matlab/Simulink realisiert. Die Simulation dient zur modellbasierten Reglerauslegung für die Längs- und Querführung des Fahrzeugs. Dazu wurden sowohl das lineare als auch das nichtlineare Einspurmodell sowie lineare Reifenmodelle mit den Kennwerten des realen Fahrzeugs parametrisiert. Die Eingangsgrößen des Einspurmodells sind das Antriebsmoment und der Lenkwinkel. Als Ausgangsgröße des Einspurmodells wird die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Fahrzeugposition berechnet. Die berechneten Ausgangsgrößen dienen in der Simulation der Längs- und Querführung als Regelgröße. Die Sollwertvorgabe der Regelgrößen erfolgt durch einen Sollwertrechner der anhand der Fahrzeugparameter realisierbare Testtrajektorien erzeugt. Aus den Soll- und Istwerten wird unter anderem mit einer Koordinatentransformation ein Längs- und Querfehler ermittelt und mit Hilfe von Reglern zu den Stellgrößen Antriebsmoment und Lenkwinkel verarbeitet. Die erzeugten Stellgrößen werden dann wieder als Eingang auf das Einspurmodell zurückgeführt. Das Simulationsmodell soll zum einen die modellbasierte Realisierbarkeit der Längs- und Querführung zeigen und dient zum anderen auch zur modellbasierten Auslegung der Reglerparameter.

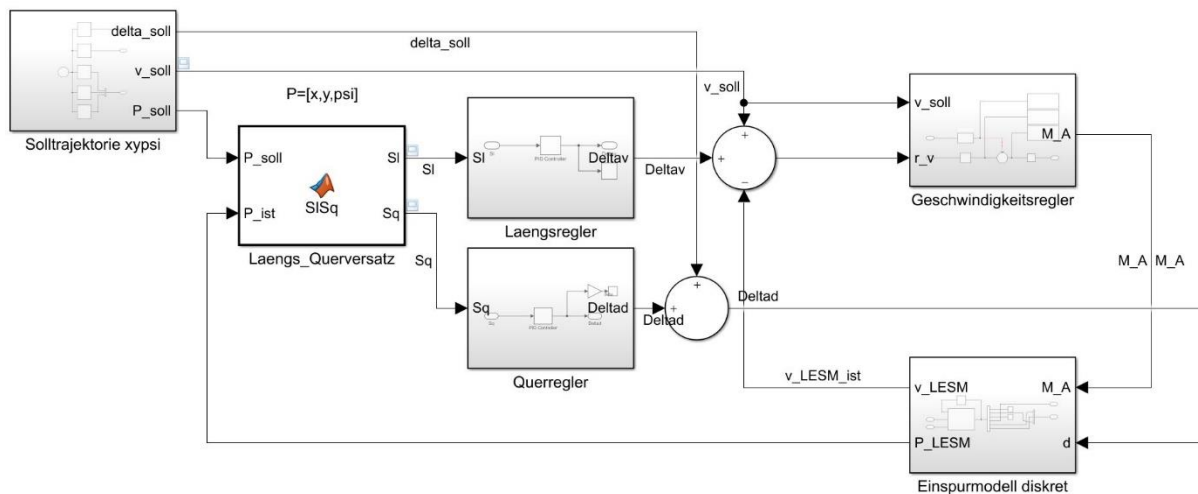


Abbildung 2: Simulationsmodell der Längs- Querführung

TAP3.3 Makroskopische Simulation des Systems

Einzelne Simulationen auf der Basis der in AP3.1 implementierten generischen Umgebungsbeschreibungen wurden durchgeführt. Abbildung 6 zeigt ein beispielhaftes Szenario. Der Graph wurde anhand von gleichverteilten Stützstellen generiert. Die grünen Punkte mit den rot gefärbten Erfassungsbereichen illustrieren die Kommunikations-Hotspots. Insgesamt sind in diesem Szenario 5 Roboter aktiv (rot-grün-blaue Koordinatensysteme auf einzelnen Knoten). Aktuelle Fahranforderungen liegen für gelbe und rote Pfeile vor. Alle Aspekte können entsprechend der beschriebenen Architektur über ein abstraktes Beschreibungskonzept konfiguriert werden. Während des Simulationslaufes wird die Veränderung des Gesamtsystemzustandes durch die sich verändernden Aufträge, die Bewegungen der Fahrräder und das Verschwinden einzelner Kanten angezeigt.

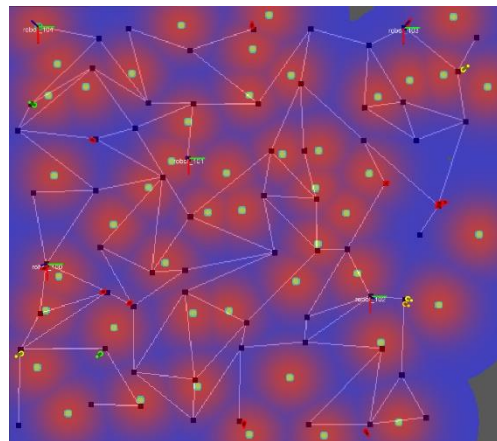


Abbildung 6: Simulationsumgebung (Top-View)

In ersten Evaluationsphasen wurden unterschiedliche Szenarien manuell ausgeführt. Die Auswertung gewonnener Daten, z.B. durchschnittliche Wartezeit von Aufträgen, Arbeits- und Wartezeiten der Fahrräder und bearbeitete Aufträge je Fahrrad, ist teilautomatisiert. Nach der vollständigen Umsetzung der Analysefunktionen und der selbstständigen Ausführung von Simulationsbatches erfolgt dann der Wechsel auf das eigentliche Hafenszenario. Wesentliche Bestandteile der makroskopischen Simulation sind die Abstraktion des Verhaltens der Fahrräder unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der mikroskopischen Simulation, die Generierung von sinnvollen Aufträgen sowie die Einschränkung bzw. Verzögerung der Kommunikation zwischen den beteiligten Entitäten. Abb. 2 zeigt beispielhaft fünf Fahrräder (weiterhin als Koordinatensysteme dargestellt) auf der Karte des Hafengeländes. Die Anzahl der simulierten Fahrräder kann frei gewählt werden und wird effektiv nur durch die verwendete PC-Hardware limitiert. Gegenüber dem abstrakten Setup können die Fahrräder sich frei bewegen und sind nicht mehr auf vorgegebene Kanten angewiesen. Das Verhalten der Fahrräder kann über eine Konfigurationsdatei angepasst werden. So können die Ergebnisse der mikroskopischen Simulation in die makroskopische Simulation integriert werden.



Abbildung 3: Simulationsumgebung mit Karte vom Hafen



Die Auftrags-Generierung wurde an das geplante Szenario angepasst. Rufsäulen können mit einer festen Position auf der Karte angelegt werden und ermöglichen dann je nach Konfiguration die Erstellung von zufälligen oder per Debug-Tool gezielt ausgelösten Aufträgen. Es kann auch ein (automatisch erstelltes) Konfigurationsskript geladen werden, welches eine vorher gespeicherte, zeitliche Abfolge von Aufträgen enthält. Dadurch ist ein konstantes Testscenario möglich, welches den Vergleich unterschiedlicher Softwareversionen erlaubt.

Die Simulation baut auf dem Framework "ROS" (Robot Operating System, [<https://wiki.ros.org>]) auf. Die Werkzeuge "rqt" und "rviz" werden für die Steuerung und Visualisierung verwendet. Die Konfiguration und Speicherung der Szenarien wird mit textbasierten Beschreibungssprachen (xml, yaml) umgesetzt. Die Inter-Prozess-Kommunikation in ROS erfolgt mittels "Publish/Subscribe" über "Topics". Dieses Konzept ermöglicht es der Simulationssoftware sich in die Datenströme zwischen Server und Fahrrädern einzuhängen und zu manipulieren. Dadurch können verschiedene Kommunikationssituation (Drop, Delay, ...) nachgestellt werden.

#### TAP3.4 Kooperations- und Koordinationsschicht

Am Simulator wurden 3 mögliche Koordinationsstrategien für die Fahrräder implementiert:

- *lokal* (das Fahrrad plant für sich selbst; unabhängig vom Gesamtsystem),
- *verteilt* (das Fahrrad stimmt sich mit anderen Fahrrädern in der Nähe ab; unabhängig vom Server),
- *zentral* (der Server übernimmt Teile der Berechnungen und Entscheidungen für das Fahrrad unter Einbeziehung der aktuellen Situation des Gesamtsystems)

Dabei sind die Modi *lokal* und *verteilt* nur als Fallback für den Fall der Unterbrechung der Kommunikation geeignet. Neue Aufträge können individuelle Fahrräder oder Gruppen von Fahrrädern dann nicht erreichen, da diese zentral über die globale Instanz erfasst werden. Das Koordinationsprofil *verteilt* wird im Rahmen des Projektes nicht weiter betrachtet, da die notwendige Entitätendichte im Szenario nicht gegeben ist.

Somit entscheidet das Fahrrad lediglich anhand der Kommunikationsqualität ob ein Fallback in das lokale Verhalten notwendig ist. Dabei liegt die Priorität im lokalen Modus auf der Abarbeitung des Auftrags gefolgt vom Verlassen des Bereichs mit geringer Kommunikationsqualität.

Als Grundlage zur Bestimmung der Kommunikationsqualität werden sowohl vom Fahrrad als auch vom Server regelmäßig Statusnachrichten (Job- oder Fahrradzustand) gesendet. Alle Nachrichten enthalten einen Zeitstempel. Schwankungen der Nachrichtenfrequenz sowie Laufzeitveränderungen werden zur Bewertung der aktuellen Kommunikationsqualität herangezogen. Ein Wechsel erfolgt dann bereits vor dem kompletten Abriss der Kommunikation, damit keine unnötigen Wartezeiten entstehen.

Im zentralen Kontext vergibt der Server die Aufträge und übernimmt die globale Pfadplanung. Aufträge können dabei sowohl von Nutzern des Systems als auch durch das System selbst, z.B. zum Umverteilen der Fahrräder, erzeugt werden. Wenn ein Fahrrad gezwungen ist in den lokalen Kontext zu wechseln, muss es beide Aufgabenbereiche selbst übernehmen. Lokal werden nur Aufträge generiert, die entweder zum nächsten Bereich mit guter Kommunikationsqualität oder zur nächsten Ladestation führen. Für die globale Pfadplanung auf dem Fahrrad wird dasselbe Softwaremodul wie auf dem Server verwendet. Dass die Berechnungen länger als auf dem Server dauern, wird als wenig relevant angesehen, da nur kurze Pfade geplant

werden sollen und eine alternative Möglichkeit einen Bereich mit schlechter Kommunikation zu verlassen nicht besteht. Die Entwicklung einer vom Server unabhängigen globalen Pfadplanung wäre unverhältnismäßig aufwendig und würde dem Modularitätsgedanken entgegenstehen.

### TAP3.5 Methoden situationsorientierter Kooperation

Im TAP erfolgte die Evaluation des in [Schmidt, S. (2013) Ein optimales Steuerungs- und Regelungskonzept für autonome Elektrofahrzeuge (Dissertation). Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg] beschriebenen Bewegungsplanungsalgorithmus bezüglich Anwendbarkeit im Projektkontext. Ein erster Entwurf der Kontextbeschreibung basierend auf der Trennung von dynamischen, statischen und permanenten Hindernissen wurde durchgeführt. Anschließend erfolgte die Implementierung des beschriebenen Bewegungsplanungsalgorithmus als lokales Planungsverfahren sowie dessen experimentelle Applikation und Anbindung an die Regelungsebene.

## **II.1.3 Arbeitspaket 7: Sensordatenallokation und Lokalisation**

### TAP 7.1 Entwurf eines einheitlichen Softwaremodells für die Verarbeitungsmodule der Sensordaten

Als Übertragungsmedium für die Sensordaten der internen Sensorik wurde ein CAN-Bus gewählt. Dazu wurden CAN-fähige Einzelkomponenten für die Teilsysteme Antrieb, Bremse und Lenkung beschafft und ein provisorisches Netzwerk für das Zusammenwirken zwischen Sensor und Aktor in den einzelnen Teilsystemen evaluiert. Aufgrund des CAN-Bus ist eine variable Knotenarchitektur im Gesamtsystem automatisiertes Lastenrad möglich und einzelne Komponenten können ersetzt oder ausgetauscht werden. Es wurden vorzugsweise CANopen-Geräte ausgewählt, um das darin integrierte Kommunikationsprotokoll zur Überwachung der verteilten Verarbeitungskette zu nutzen. Im CANopen-Standard existieren bereits festgelegte Dienste, um zum Beispiel den Ausfall eines Sensors oder Aktors zu detektieren. Diese sollen im Gesamtsystem genutzt werden, um einen sicheren Zustand bei Ausfall eines Teilsystems zu erreichen. Zur Implementierung von Fehlerzuständen im verteilten System wurde mit Hilfe der Software Matlab/Simulink und einem USB-zu-CAN-Adapter einzelne CAN-Messages deaktiviert oder manipuliert, um das Konzept der Selbstüberwachung zu evaluieren.

### TAP7.2 Aggregation und Vorverarbeitung der Sensordaten

Im Rahmen des Prototypischen Aufbaus des Versuchsträgers im TAP 9.1 wurde das Fahrzeug mit Sensorik ausgestattet und erste Testfahrten unternommen. Zum Berichtszeitpunkt sind IMU, GPS und diverse weitere Fahrzustandserfassende Sensoren funktionsfähig.

Als Sensordaten dienen alle Informationen, die aus den Teilsystemen Antrieb, Bremse und Lenkung gewonnen werden können. Damit einhergehend sind auch Positions- und Lagezustände des Lastenrades. Die Messwerte werden durch die jeweiligen Sensorsysteme auf einem CAN-Bus bereitgestellt.

Im Teilsystem Antrieb werden die Motorwerte mit Hilfe des Motorcontrollers auf dem CAN bereitgestellt und aufgezeichnet. Von Bedeutung ist dabei die Raddrehzahl des Hinterradantriebes, da diese mit in den Fahrzustandsbeobachter einfließen soll. Die Drehzahlen der Vorderräder sollen über einen separaten Drehzahlsensor bestehend aus induktivem Sensor an

den Bremscheiben und Mikrocontroller erfasst werden. Für das Teilsystem Bremse wird der Druck in der Bremsanlage durch einen Drucksensor gemessen und per CAN-Message zyklisch in das Netz gesendet. Informationen des Controllers für den Linearaktor der Bremsanlage wie zum Beispiel Vorschubkraft und -weg werden ebenfalls aufgezeichnet. Im Lenksystem werden die Lageinformationen der Vorderräder durch einen Winkelsensor erfasst und ebenfalls auf dem CAN-Bus bereitgestellt. Die Erfassung der Position und Lage des Fahrzeugs geschieht mit einer kombinierten IMU/GPS-Einheit. Diese erfasst zum einen die Drehraten/Linearbeschleunigungen und zum anderen die Positionsdaten von einem GPS-Chip. Beide Informationen werden zyklisch auf dem CAN-Bus übermittelt. Zusätzlich ist am Versuchsträger ein differentielles GPS System (DGPS) installiert, um eine hochpräzise Ermittlung der Fahrzeugposition und Kalibrierung des Fahrzustandsbeobachters zu ermöglichen. Die seriellen Datensätze des DGPS werden von einem Mikrocontroller auf dem CAN bereitgestellt.

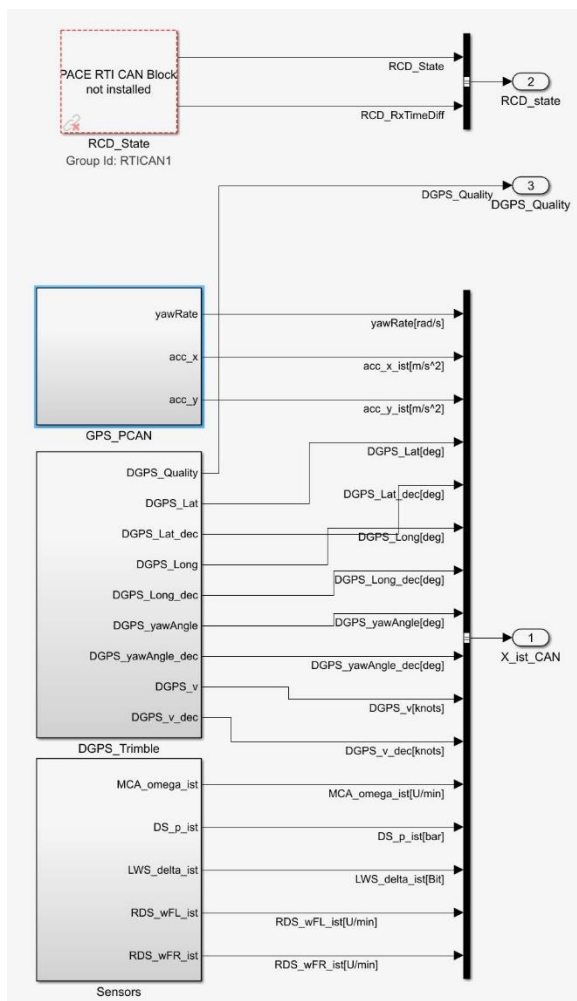


Abbildung 4 Modell zur Erfassung der Sensordaten

Die Erfassung der Sensordaten geschieht mit Hilfe des CAN-Interfaces eines Real Time Devices (dSPACE MicroAutoBox II) (siehe Abbildung 1). Auf dem Device läuft die Software für die Bahnregelung des Fahrzeugs. Grundsätzlich unterscheidet diese Software zwischen Datenerfassung, -verarbeitung und -ausgabe. Die empfangenen Sensordaten werden von der Teilkomponente CAN-to-SI-Converter (siehe Abbildung 2) für die Weiterverarbeitung in SI-Einheiten umgerechnet und mit Filtern höherer Ordnung geglättet. Aus den errechneten SI-konformen Fahrzustands-Istwerten und den per UDP-vorgegebenen Fahrzustands-Sollwerten werden durch den Bahnregelalgorithmus die Stellgrößen für die einzelnen Aktoren (Antrieb, Bremse und Lenkung) generiert. Dazu wird der Längs- und Querabstand der aktuellen

Fahrzeugposition zu vorgegeben Solltrajektorie berechnet (siehe Abbildung 3) und durch Antrieb/Bremse und Lenkung ausgeregelt. Zur hochgenauen Fahrzeug-Positionsermittlung soll im weiteren Verlauf des Projektes ein Fahrzustandsbeobachter unter Nutzung aller Sensordaten genutzt werden. Dazu fließen die GPS-Informationen aus Delusion Of Precision in Form von Varianzen in den Beobachter mit ein und geben Auskunft über die Güte der Positionsdaten.

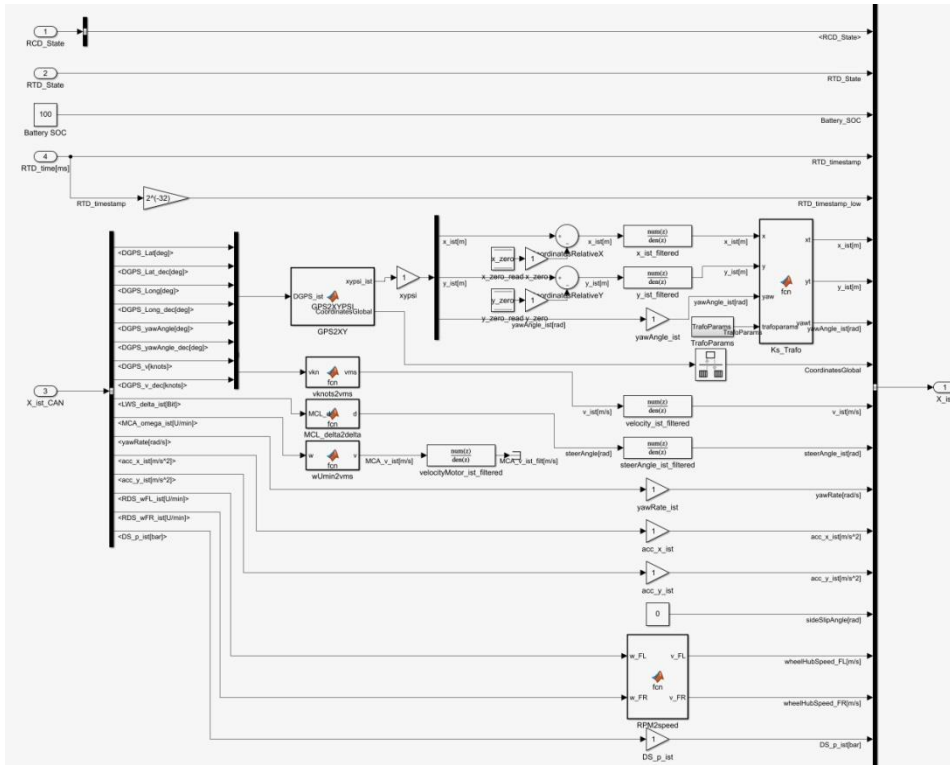


Abbildung 5 CAN to SI Converter

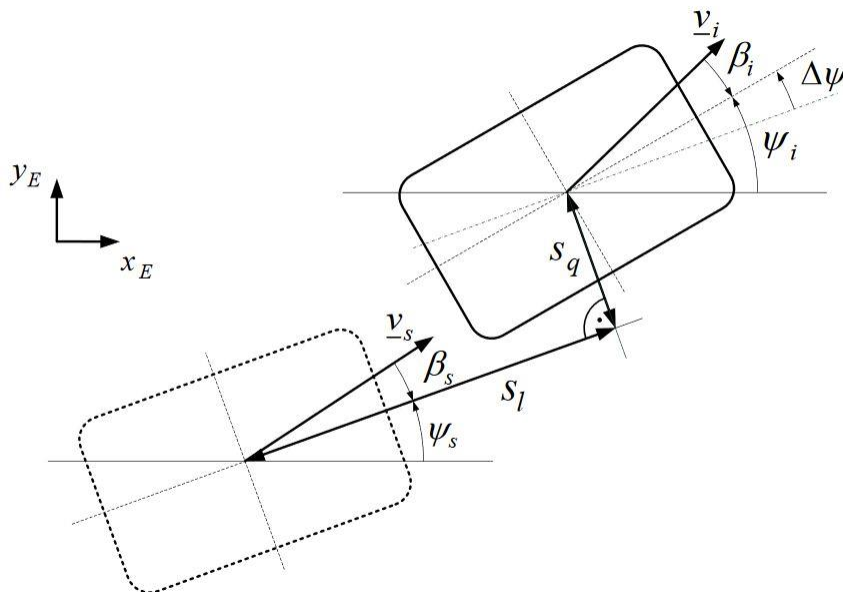


Abbildung 6 Längs- und Querabstand zwischen aktueller Position (rechts) und Position des Referenzfahrzeugs (links)

### TAP 7.3 Adaptive Datenfusion für Fahrzustandsbeobachtung

Für den Fahrzustandsbeobachter wurde aufgrund der Fahrzeuggeometrie ein kombiniertes Einspur/-Mehrspurmodell entwickelt (siehe Anhang 2 Modellierung). Als Filterelement für die Fahrzustandsbeobachtung wurde ein Extended Kalman Filter (EKF) gewählt. Dafür wurde ein Fahrzustandsvektor definiert und die Messgrößen für das Filter festgelegt. Die Modellgleichungen sowie das Filter wurden in der Simulationssoftware Matlab/Simulink implementiert. Als Interface zur Parametrierung des Filters wird das Real Time Device (MicroAutoBox II) genutzt, da hier im Online Betrieb Messdaten überwacht und Parameter per Rapid Prototyping eingestellt werden können. Als Referenzmessgrößen zur Kalibrierung werden zum einen die DGPS Daten verwendet und zum anderen die Messdaten einer weiteren installierten inertialen Messeinheit.

## II.1.4 Arbeitspaket 8: Wissensrepräsentation und Kontext-Awareness

### TAP8.1 Identifikation relevanter Elemente der Umgebung



**Abbildung 3: Rasterkarte der Hafenumgebung. Unbeschränkte Befahrbarkeit wird repräsentiert durch weiße Grauwerte, eingeschränkte, bzw. nicht befahrbare Bereiche werden durch dunklere, bzw. schwarze Grauwerte definiert**

Die vorliegende Umgebung des Hafens wurde in Form einer Rasterkarte abgebildet, welche geometrische Informationen, statische Hindernisse, wie etwa Schienen und Gebäude, und Details zur uneingeschränkten, bzw. eingeschränkten Befahrbarkeit kombiniert. (Siehe Abbildung). Statische und dynamische Hindernisse, werden in einer Objektdatenbank erfasst und verwaltet. Informationen über die allgemeine Straßeninfrastruktur werden über OpenStreet-Map bezogen.

### TAP8.2 Multimodale Kartendarstellung für das Szenario

Für die zentrale Organisation und Bereitstellung statischer und dynamischer Umgebungsinhalte wurde eine multimodale Karten-Software implementiert. Sie bietet die Möglichkeit der flexiblen und anforderungsspezifischen Zusammenführung einzelner Views (Kartenebenen) für ein kontextsensitives Planungsverfahren. Ebenen werden über eine Plug-in Struktur in das

Karteninterface integriert, was die Grundlage für eine unkomplizierte Erweiterung und unabhängige Weiterentwicklung liefert. Es wurden vier Kartenebenen umgesetzt:

Ausgangspunkt stellt die im TAP 8.1. erfasste Rasterkarte dar, welche von der sogenannten GridMap-Ebene geladen wird. Diese kann mittels der Objekt-Ebene um dynamische und statische Hindernisse ergänzt werden. Hierfür erfolgt eine Weiterverarbeitung der von der Umgebungsüberwachung generierten Nachrichten in entsprechende kollisionsvermeidende Kartenobjekte. Des Weiteren bietet eine OSM-Ebene an, allgemein zur Verfügung stehende Informationen aus dem OpenStreetMap Projekt dem Kontextwissen hinzuzufügen. Eine abschließend zu nennende Polygon-Ebene ermöglicht die Integration von beispielsweise Untergrundinformationen.

Pfadplanungstests wurden mit Hilfe von simulierten Objektnachrichten durchgeführt.

### TAP 8.3 Kontextwechsel und Kontextdetektion

Basierend auf der im TAP 8.2 entwickelten Belegungskarte erfolgte die Weiterleitung der Karteninformation an das Bewegungsplanungsmodul. Unterschieden wird dabei in zwei Bereiche des Erprobungsgeländes. Im ersten steht eine Umgebungserfassung mittels Infrastrukturkameras bereit, im zweiten ist diese nicht verfügbar. Im ersten Bereich ist daher die Objekterkennung robuster, so dass das Fahrzeug ein höheres Sicherheitsniveau abbildet. Entsprechend dieses Kontextes erfolgt eine Umschaltung im Bewegungsplaner zwischen einer mehr offensiven oder defensiven Fahrweise. Erkennung, Umschaltung und Reaktion wurden in Simulationsexperimenten erprobt.

## **II.1.5 Arbeitspaket 9: Systemintegration und Tests**

### TAP9.1 Gesamtintegration

Nach der elektrischen Integration der Lenk- und Antriebskomponenten wurden diese kommunikationstechnisch eingebunden. Die Kommunikation der Antriebs- und Lenkkomponenten erfolgt auf Basis eines CANs. Dabei werden Sollwerte von einem übergeordneten Regelkreis bereitgestellt und an die jeweiligen Controller gesendet. Die Istwerte der entsprechenden Sensoren werden ebenfalls als CAN-Nachricht bereitgestellt und dann in den unterlagerten Regelkreisen zu Stellgrößen verarbeitet. Dabei wird die Lenkwinkelregelung auf dem internen Mikrocontroller des Motortreibers berechnet und als Lenkwinkelrate durch den Motor im drehzahlgeregelten Modus gestellt. Der Antriebscontroller wurde mit den Parametern des Hinterradmotors konfiguriert. Der Controller wird im Drehmomentmodus betrieben und erhält Drehmomentsollwerte von einem übergeordneten Drehzahlregelkreis. Die Lenk- und Antriebsdynamik wurde dann mit Hilfe von Messdaten ausgewertet und parametrisiert.

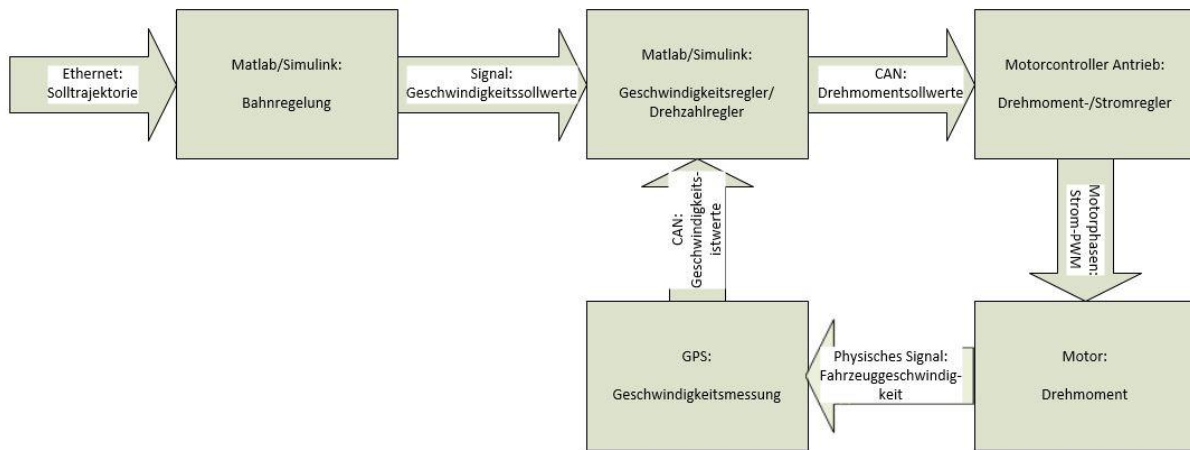


Abbildung 7: Signalflussplan Antriebsregelung

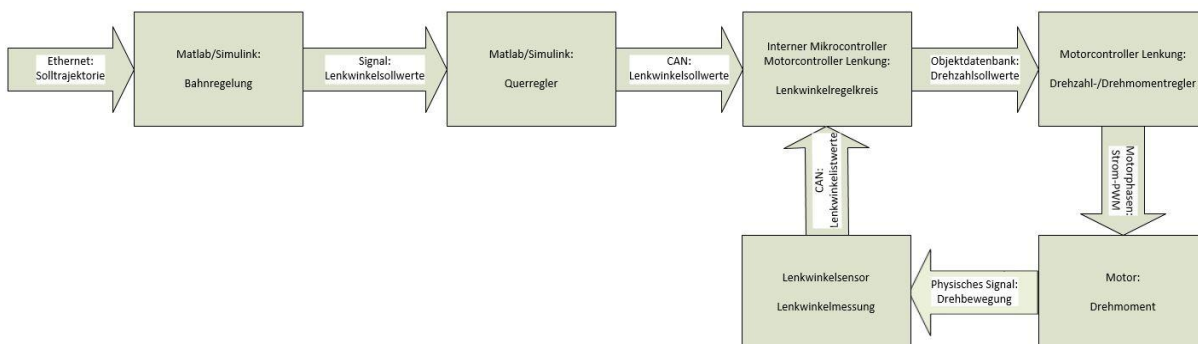


Abbildung 8: Signalflussplan Lenkwinkelregelung

Am Fahrzeug wurden alle Teilsysteme des Antriebs, der Bremse und der Lenkung sowie Sensorik und Steuerungshardware integriert. Dies umfasste die mechanische Integration der Sensorik/Aktorik in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Pedalpower und die elektrische Integration in das Bordnetz des Fahrzeugs, dazu wurden Stromlaufpläne und Signallaufpläne erstellt. Als Kommunikationsebene wurde ein CAN-Bus System zwischen der Fahrzeugsensorik/-aktorik und den Steuerungskomponenten implementiert. Alle integrierten Teilsysteme können der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 7 Liste der installierten Hardware

Sensorik	Aktorik	Steuerung
Raddrehzahl vorn	Motor/Controller Antrieb	Real Time Device (MicroAutoBox II)
Drucksensor	Linearaktor/Controller Bremse	Remote Control Device
Winkelsensor	Motor/Controller Lenkung	Funk Not-Aus
IMU/GPS		
DGPS		
Referenz IMU		

Als Steuerungsarchitektur wurde ein verteiltes Sicherheitssystem entwickelt und auf der Steuerungshardware in Form von Software bzw. im Gesamtsystem in Form von Hartverdrahtung umgesetzt. Auf Software Ebene wird die Funktionstauglichkeit aller CAN-Teilnehmer durch

das Remote Control Device überwacht. Aus Redundanzgründen überwachen sich zusätzlich das Remote Control Device und das Real Time Device gegenseitig, um im Fehlerfall die Aktorik per CAN Messages automatisch zu stoppen. Zusätzlich können die Bediener von Fernbedienung und Funk-Notaus jederzeit per Hartverdrahtungssignal zwischen der Steuerung und der Aktorik eine Abschaltung bzw. gezielten Nothalt des Fahrzeugs auslösen. Alle Sicherheitsfeatures und die dazugehörigen Zustände in der Software auf den Steuerungen und Aktoren werden im Stillstand des Fahrzeugs als Abnahmetest mit einem definierten Testplan vor der Inbetriebnahme als automatisiertes Versuchsfahrzeug durchgeführt.

### TAP 9.2 Allgemeine Erprobung des Fahrradsystems

Die Tests und Probefahrten wurden auf einem abgeschlossenen Gelände der Universität durchgeführt. Es wurde ein mehrstufiges Verfahren gewählt. In der ersten Phase wurde die Kontrolle des Fahrrades mittels einer Fernbedienung auf Stabilität getestet. Besonders relevant war das Verhalten in kritischen Situationen, wie z.B. der plötzliche Abbruch der Verbindung zwischen Fahrrad und Fernbedienung oder der Ausfall der Steuerungskomponente auf dem Fahrrad. Zusätzlich wurde auf eine intuitive Bedienung der Fernbedienung geachtet.

Im Anschluss wurden Basis-Manöver wie Sinuslenken, Konstantkreisfahrten, Beschleunigungs- und Ausrollversuche durchgeführt. Daraus wurden Fahrzeugparameter für die Modellgleichungen der Längs- und Querdynamik ermittelt und die Regler Antrieb und Lenkung parametrisiert. Anhand von vorgegebenen Solltrajektorien wurde das Verhalten auf Bahnregelungsebene untersucht und entsprechend kalibriert.

Die dritte Phase sah den Test des High-Level-Software-Stacks (Bahnplanung, Verhaltensmanagement, Bereitstellung der Umgebungskarte) vor. Dazu wurden einfache Zielvorgaben im grafischen Entwicklerwerkzeug gesetzt und u.a. die Ausgaben der Lokalisierung, im Verhältnis zu den realen Bewegungen des Fahrrades, auf Plausibilität geprüft.

In der abschließend vierten Phase wurde die Bearbeitung von Nutzaufträgen hinzugefügt. Dazu stand sowohl eine einfache Web-App, nutzbar auf jedem Smartphone und PC, sowie die vom Projektpartner Thorsis entwickelte Rufsäule bereit. Somit konnten zur Vorbereitung des Probetriebs im Szenario Tests des Komplettsystems (vom Nutzauftrag bis zur Bewegung des Fahrrades zur gewünschten Position) durchgeführt werden.

## **II.1.6 Arbeitspaket 10: Probetrieb, Evaluation, Optimierung**

### TAP 10.1 Probetrieb im Szenario

Es wurden mehrere erfolgreiche Testläufe im Hafengelände durchgeführt. Objekterkennung und Lokalisation waren zum Projektende auf Basis von lokaler Sensorik funktionsfähig. Daher wurde nur ein Teil der Karte des Hafengeländes zur Navigation freigegeben (Visualisierung in Abb. 4). Dort konnte während des Tests sichergestellt werden, dass sich keinerlei statische Hindernisse (z.B. Container, parkende Autos, ...) auf der Fahrbahn befinden. Innerhalb dieses Karten-Abschnitts konnte prinzipiell die Funktion des Konzepts demonstriert werden. So war es möglich das Fahrrad gezielt zu einem Ort innerhalb der Karte zu rufen bzw. zu bestellen. Anschließend konnte der Nutzer die manuelle Fahrt antreten. Nach der Freigabe durch den Nutzer stand das Fahrrad wieder für den autonomen Betrieb zur Verfügung.



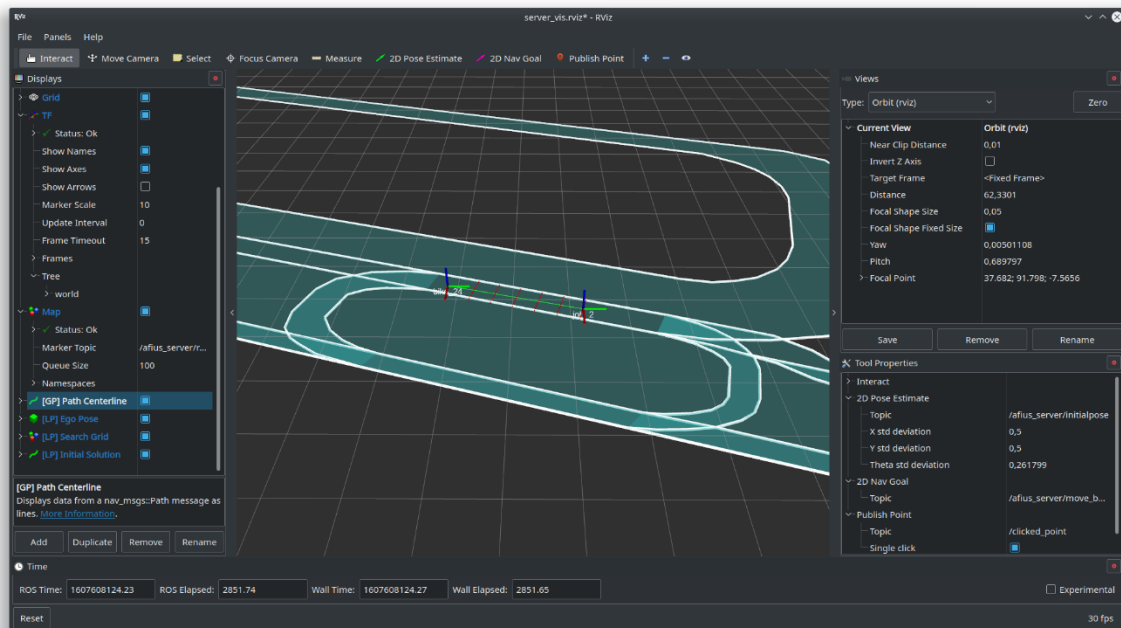


Abbildung 9: Entwicklungstool zur Überwachung des Probetriebs

Während des Probetriebs wurde im Rahmen einer mehrtägigen Messkampagne umfangreiches Datenmaterial aufgenommen. Dieses diente zum Feintuning der Objekterkennung und zur Verbesserung der Fahrzustandsbeobachtung. Des Weiteren konnten die Erfahrungen während des Betriebs genutzt werden, um Verbesserungen am Hard- und Softwarekonzept sowie am Kommunikations- und Sicherheitskonzept abzuleiten. Auf einen Probetrieb mit Probanden wurde zunächst verzichtet, da Betrieb und Überwachung des aktuellen Systems aufgrund des Sicherheitskonzeptes sehr arbeitsintensiv sind und zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Rückschlüsse auf die spätere Anwendung erlauben.

### TAP 10.2 Optimierung der HW/SW Funktionen

Während des Projektverlaufs und nach der Inbetriebnahme des Gesamtsystems wurde der Optimierungsbedarf an Hard- und Software identifiziert. Um Bauraum einzusparen wurde begonnen, das Prototypensteuergerät(22x16x10cm) durch einen gestapeltes Mini-PC-System(11x8x8cm) mit CAN-Schnittstelle zu ersetzen. Die Software des Prototypensteuergerätes wurde für die Schnittstellen des Mini-PC's angepasst und getestet. Dabei wurde festgestellt, dass das Einbinden und Nutzen der Mini-PC-Schnittstellen noch optimiert werden muss, um die gleiche Performance des Prototypensteuergerätes zu erreichen.

Um weiteren Bauraum einzusparen soll das in den Fahrversuchen genutzte differentielle GPS durch eine modellbasierte Regelung und einer Beobachterimplementierung ersetzt werden. Die nötigen Modellgleichungen wurden erstellt und in das Prototypensteuergerät einprogrammiert, um die nötige Rechenleistung zu ermitteln. Im nächsten Schritt muss dafür noch die Parametrierung des Beobachters mit Hilfe von Referenzmesstechnik erfolgen damit der Bauraum des differentiellen GPS vollständig eingespart werden kann.

Im Bereich der CAN Kommunikation wurden alle unnötigen Messages entfernt, um eine zeitinvariante Übertragung der wichtigen Sensordaten und Stellgrößen über das

Kommunikationsnetzwerk zu gewährleisten. Zusätzlich wurden die Übertragungsraten auf die notwendigen Frequenzen reduziert, um die Buslast weiter zu minimieren. Der Bus selbst wurde konzeptionell umgestaltet als Linienbusform mit Stichleitungen, um bei Ausfall einzelner Busteilnehmer weiterhin mit den verbleibenden Aktoren einen sicheren Stillstand erreichen zu können.

### TAP 10.3 Dokumentation der Projektergebnisse

Eine allgemeine Dokumentation der Projektergebnisse erfolgt mit diesem Bericht. Technische Detailergebnisse werden bei verschiedenen nationalen und internationalen Konferenzen und Fachzeitschriften veröffentlicht und befinden sich aktuell in Bearbeitung.

## 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 8: wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Pos.	Ausgaben/Finanzierung	Lt. ZWB/ÄB	IST
A)	Personalausgaben		
	Gehälter	347.091,00	<b>345.332,16</b>
	Entgelte	23.766,00	<b>23.754,41</b>
	<b>Summe A</b>	<b>370.857,00</b>	<b>369.076,57</b>
B)	Sächliche Verwaltungsausgaben	0,00	
	Vergabe von Aufträgen	6.194,00	5.718,98
	Verbrauchsmaterial	22.640,00	22.319,97
	Weitere Sachausgaben	0,00	
	Dienstreisen Inland	1.470,00	1.695,79
	Dienstreisen Ausland	1.750,00	
	<b>Summe B</b>	<b>32.054,00</b>	<b>29.734,74</b>
C)	Gegenstände / Investitionen über 410 €	12.807,00	12.806,04
D)	Gesamtausgaben des Vorhabens	415.718,00	411.627,35
E)	Übersicht über die Finanzierung		
	<b>Eigenmittel</b>	<b>0,00</b>	0,00
	<b>Zuwendung</b>	<b>415.718,00</b>	<b>411.627,35</b>
	<b>Zuwendung inkl. 20% Pauschale</b>	<b>498.900,91</b>	<b>493.940,82</b>
	<b>Förderquote</b>	100%	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 9: Verwertungskonzept des Antragstellers

	Verwertungsbereich	OVGU
1	Publikation der Ergebnisse	X
2	Darstellung des Projektes auf Fachmessen, Projektworkshops	
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	

### 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 fahradoffener 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>26</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>27</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>28</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 Fahrplänen und Abfahrtszeiten 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 wurden durch den Antragsteller auf wissenschaftlicher Seite primär durch die Kooperationspartner OVGU und IFF, über drei Kanäle veröffentlicht:

##### **1. Publikationen**

Die zentralen Ergebnisse werden und 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 Veröffentlichung von Forschungsdaten als Open Data befindet sich aktuell in der Prüfung durch die Projektpartner.

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

Die Veröffentlichung der entwickelten Softwarebibliotheken unter einer Open Source Lizenz befindet sich aktuell in der Prüfung durch die Projektpartner.

Ausgehend von der Idee der Antragssteller, dass die Bearbeitung des Vorhabens unmittelbaren Eingang in die Lehre finden sollte, wurde der wissenschaftliche Nachwuchs in Form von studentischen Mitarbeitern 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-Systems,
3. wurde das Konzept erfolgreich erprobt, so dass ein auf breiten Erfahrungsschatz im praktischen 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.

**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

Die Projekt- (Zwischen) Ergebnisse wurden auf mehreren Messen (z.B. 6. Aktionstag "Radverkehr in Sachsen-Anhalt" am 5. Mai 2019, ... ) vorgestellt.

Zusätzlich erfolgten folgende Veröffentlichungen bei internationalen Fachtagungen und Konferenzen:

- M. Seidel, S. Zug, **S. Schmidt**. “**Exploiting OpenStreetMap–Data for Outdoor Robotic Application**”, IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE 2019), 17.–18.06.2019, Ottawa, Canada
- Junge, Lars; Schmidt, Michael; Zug, Sebastian; **Schmidt, Stephan**: “**Development of a steering and braking system for automated cargo–bikes.**” In: X. Internationale Wissenschaftliche Konferenz Maschinenbau “Comec 2019”. Kuba.
- Junge, Lars; Schmidt, Michael; Schmidt, Stephan: “**Entwicklung eines Lenk– und Bremssystems für automatisierte Lastenräder.**” In: 14. Magdeburger Maschinenbau Tage. Magdeburg, 2019.
- Zug, Sebastian; **Schmidt, Stephan**; Assmann, Tom; Krause, Karen; Salzer, Sigrid; Seidel, Martin et al.: “**BikeSharing der 5. Generation. Szenarien und Herausforderungen für den Einsatz autonom agierender Fahrräder.**” In: Jorge Max Gomez (Hg.): BUIS–Tage 2018. Oldenburg, 2018.

Pandemiebedingt fanden im Jahr 2020 nur sehr wenige Internationale Konferenzen und Tagungen statt, so dass im Jahr 2020 keine Veröffentlichung durch die OVGU erfolgte.

Es gab folgende Veröffentlichungen:

- **Autonomes Lastenrad**, TV-Beitrag im ZDF Morgenmagazin: <https://www.zdf.de/nachrichten/zdf-morgenmagazin/autonomes-fahrrad-100.html>, 09.09.2019
- „**Magdeburger Industrieforscher beim Innovationstag Mittelstand**“ - “**Lastenräder auf drei Rädern**“, Beitrag im “Der Markt in Mitteldeutschland 4/19”, 25.04.2019
- „**Auto adé! Wie es auch ohne geht**“, TV-Beitrag in der Sendung “ZDF planete”, <https://www.zdf.de/dokumentation/planet-e/planet-e-auto-ad-100.html>, 14.04.2019
- „**Autonome Fahrräder, Mini-Busse - Diese Konzepte könnten das Auto aus der Stadt vertreiben**“, Online-Artikel bei ZDF.de, <https://www.zdf.de/nachrichten/heute/konzepte-gegen-verkehrschaos-autonomes-rad-planet-e-100.html>, 14.04.2019
- „**Eine Welt ohne Autos**“, TV-Beitrag im ARD, 15.11.2020

### **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> Li, L. ; Song, J. ; Kong, L. ; Huang, Q.: Vehicle velocity estimation for real-time dynamic stability control. In: *International Journal of Automotive Technology* 10 (2009), Nr. 6, S. 675–685
  - <sup>4</sup> Sebsadji, Yazid ; Glaser, Sébastien ; Mammer, Said ; Dakhlallah, Jamil: Road Slope and Vehicle Dynamics Estimation. In: *2008 American Control Conference*. Piscataway
  - <sup>5</sup> Sun, Fei ; Huang, Xuhui ; Rudolph, Joachim ; Lolenko, Kostyantyn: Vehicle state estimation for anti-lock control with nonlinear observer. In: *Control Engineering Practice* 43 (2015), S. 69–84.
  - <sup>6</sup> H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2011.
  - <sup>7</sup> Glennie, Craig. "Calibration and kinematic analysis of the Velodyne HDL-64E S2 Lidar sensor." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 78.4 (2012): 339-347.
  - <sup>8</sup> Marcel Grotzke, Toni Heidenreich, Sebastian Zug, *Belegungskartenbasierte Datenfusion zur Kreuzungserkennung*, AAET - Braunschweiger Symposium für Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Band 17, 2016, Verlag ITS Niedersachsen
  - <sup>9</sup> Spinello, L., Arras, K. O., Triebel, R., & Siegwart, R. (2010, July). A Layered Approach to People Detection in 3D Range Data. In *AAAI* (Vol. 10, pp. 1-1).
  - <sup>10</sup> E. Guizzo, „IEEE Spectrum,“ 18 10 2001. [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial-intelligence/how-google-self-driving-car-works>. [Zugriff am 08 08 2017].
  - <sup>11</sup> Google, „WAYMO,“ [Online]. Available: <https://waymo.com/tech/>. [Zugriff am 08 08 2017].
  - <sup>12</sup> Jung, Boyoon, and Gaurav S. Sukhatme. "Detecting moving objects using a single camera on a mobile robot in an outdoor environment." *International Conference on Intelligent Autonomous Systems*. 2004.
  - <sup>13</sup> Adams, Martin, Sen Zhang, and Lihua Xie. "Particle filter based outdoor robot localization using natural features extracted from laser scanners." *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*. Vol. 2. IEEE, 2004.
  - <sup>14</sup> Ward, Chris C., and Karl Iagnemma. "A dynamic-model-based wheel slip detector for mobile robots on outdoor terrain." *IEEE Transactions on Robotics* 24.4 (2008): 821-831.
  - <sup>15</sup> Panzieri, Stefano, Federica Pascucci, and Giovanni Ulivi. "An outdoor navigation system using GPS and inertial platform." *IEEE/ASME transactions on Mechatronics* 7.2 (2002): 134-142.
  - <sup>16</sup> Jäger, Georg, Tino Brade, and Sebastian Zug. "Using Failure Semantics to Maintain Safety for Dynamic Composed Systems." *ARCS 2016; 29th International Conference on Architecture of Computing Systems; Proceedings of. VDE*, 2016.
  - <sup>17</sup> Kurihata, Hiroyuki, et al. "Rainy weather recognition from in-vehicle camera images for driver assistance." *Intelligent Vehicles Symposium, 2005. Proceedings. IEEE*. IEEE, 2005.
  - <sup>18</sup> Dietrich, André, Sebastian Zug, and Jörg Kaiser. "Detecting external measurement disturbances based on statistical analysis for smart sensors." *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2010.
  - <sup>19</sup> Jäger, Georg, et al. "Assessing neural networks for sensor fault detection." *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*, 2014.
  - <sup>20</sup> Nguyen, Tran Tuan, et al. "Learning of lane information reliability for intelligent vehicles." *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), 2016 IEEE International Conference on*. IEEE, 2016.
  - <sup>21</sup> Seidel, Martin, and Sebastian Zug. "Context aware architecture for distributed robotics." *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2016 IEEE 21st International Conference on*. IEEE, 2016.
  - <sup>22</sup> LaValle and Stevem, "Rapidly-exploring Random Trees: A new tool for path planning," Technical report, Computer science department, Iowa state University, October 1998.
  - <sup>23</sup> E.W.Dijkstra, "A Note on Two Problems in Connexion with Graphs," *Numerische Mathematik* 1, 1959.
  - <sup>24</sup> C. Loeper, C. Brunken, G. Thomaidis, S. Lapoehn, P. Fouopi, H. Mesobach and F. Koester, "Automated Valet Parking as Part of an Integrated Travel Assistance," *Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, Netherlands, October 6-9, 2013.

<sup>25</sup> S.Schmidt, "Ein Optimales Steuerungs- und Regelungskonzept für autonome Elektrofahrzeuge," Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 2013

<sup>26</sup> Wettbewerb „Deutschlands schönster Park“

<sup>27</sup> Chong, Z. J., et al. "Autonomy for mobility on demand." Intelligent Autonomous Systems 12. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 671-682.

<sup>28</sup> Magazin für Autonome Autos, Autonome Systeme, Assistenzsysteme und Telemetrie, "Singapour: Autonome Fahrzeuge im Park", 23.10.2014