Verbundprojekt E-Self

Das selbstfahrende Elektrofahrzeug im Fahrzeugwerk

BMWK-Förderprogramm:

Digitalisierung der Fahrzeughersteller und Zuliefererindustrie

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Kurzbericht

01.01.2022 – 30.06.2024

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Förderkennzeichen (Aktenzeichen):

13IK007C

1 Aufgabenstellung

Das Forschungsprojekt E-SELF untersucht die Möglichkeiten, die sich durch den Einsatz des vollautomatisierten Fahrens (SAE Level 4) in der Produktion von Elektro-Serienfahrzeugen ergeben. Die Ausgangsbasis für das Vorhaben bildete ein bestehender Prozessfluss, welcher von der End-of-Line ausgeht und bis zur Verladung der fertiggestellten E-Fahrzeuge verläuft. In Abbildung 1 ist ein Schaubild des Kölner Ford-Standortes gezeigt, in welchem die einzelnen Bereiche der Fahrzeugmontage sowie die geplanten Einsatzbereiche des E-SELF-Systems gekennzeichnet sind.

Ab dem Punkt, an dem die Fahrzeuge im fahrbereiten Zustand die Fertigungslinie verlassen, ergeben sich die Möglichkeiten für die automatisierte Bewegung. Im herkömmlichen Ablauf werden die Fahrzeuge manuell weiterbefördert, um verschiedene dynamische Tests sowie Qualitätsprüfungen durchzuführen. Falls Nacharbeiten notwendig sind, werden die verschiedenen Reparaturbereiche angefahren. Diese Transportfahrten sind sehr ressourcenintensiv. Speziell im Hinblick auf die Produktion von Elektro-Fahrzeugen ergeben sich neue Herausforderungen. Die produzierten Fahrzeuge müssen mit einem ausreichenden Ladezustand der Hochvoltbatterie sowohl die Produktionsprozesse durchlaufen als auch für die Verladung zum Endkunden bereit gemacht werden. Speziell ungeplante Fahrtwege, wie für Reparaturen, sind zu untersuchen und die Nachladung der Fahrzeuge zu gewährleisten. Dies ist ein weiterer manueller Eingriff in den Ablauf. Dazu kommt eine möglichst effiziente Nutzung der vorhandenen (begrenzten) Ladeinfrastruktur in den Fahrzeugwerken.

Abbildung 1 Skizze des Kölner Fahrzeugwerkes von Ford inklusive physischer Einordnung des E-SELF Systems

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde,

Das Projekt E-SELF wird am Kölner Fertigungsstandort umgesetzt, an welchem zu Projektbeginn im Jahr 2022 der Ford Fiesta hergestellt wurde. Die TU Braunschweig und Projektpartner Kopernikus Automotive richteten die notwendigen Aktivitäten an den Gegebenheiten und den Prozessen im Werk aus. Ein Ziel bestand darin, das AVP-System (Automatisiertes Valet-Parken) unter Berücksichtigung der Sicherheitsstandards und Vorschriften in die vorhandene Produktionsumgebung zu integrieren.

Es sind seitens Ford keine Serienfahrzeuge verfügbar, die ohne Hardware- und Software-seitige Modifikationen mit dem zu entwickelnden AVP-System kommunizieren können sowie eine unmittelbare Ansteuerung der Fahrzeugaktoren ermöglichen. Deshalb wurden im Rahmen des Projekts spezielle Versuchsträger aufgebaut. Zudem wurde seitens der TU Braunschweig ein bestehender Versuchsträger eingesetzt sowie zusätzliche Modifikationen für Testzwecke vorgenommen.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Konzept des E-SELF-Systems für den Einsatz in Produktion und Logistik wurde mit den Projektpartnern zusammen detailliert ausgearbeitet. Anschließend wurde die Umsetzung in den definierten Teilbereichen realisiert. Nach der Identifikation der für die Untersuchung geeigneten Werksbereiche und relevanten Prozessabläufe erfolgte der Umbau der Testfahrzeuge und die Vorbereitung der Testumgebung. Ergänzend erfolgten seitens der TU Braunschweig Voruntersuchungen in weiteren Testumgebungen in Braunschweig, um eine zielgerichtete und effiziente Entwicklung zu bewerkstelligen. In den Voruntersuchungen wurden implementierte Algorithmen im Versuchsträger verifiziert und validiert. Im Anschluss wurden die Entwicklungen in die Versuchsumgebung der Ford-Werke transferiert und in verschiedenen Versuchsreihen evaluiert. Weiterhin stand seitens der TU Braunschweig das Thema der Energiebedarfsprognose im Fokus der Untersuchung. Nach Entwicklung des Prognose-Frameworks erfolgte die Evaluation unter Verwendung seitens Ford bereitgestellter Messdaten.

4 Wesentlichen Ergebnisse sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Im Rahmen von E-SELF wurden zentrale Fortschritte im Bereich automatisierter Fahrfunktionen und der Energiebedarfsprognose erzielt. Für die Energiebedarfsprognose wurden Fahrzeugparameter sowie Szenarien zur Energieverbrauchsabschätzung definiert und ein Lademanagementkonzept entwickelt, das die Anzahl benötigter Ladesäulen in Abhängigkeit von der Fahrzeugproduktion ermittelt. Die Energiebedarfsermittlung wurde in das Gesamtsystem erfolgreich integriert, zu einem autonomen E-Charging-System verknüpft und in der Demonstrationsumgebung erfolgreich getestet.

Im Bereich der Fahrzeugautomatisierung wurden verschiedene Algorithmen sowohl für den Innen- als auch Außenbereich entwickelt. Die Funktionen wurden unter Berücksichtigung der realen Werksumgebung implementiert, erfolgreich getestet sowie evaluiert. Dabei wurden Konzepte zur Eigenlokalisierung mittels natürlicher sowie künstlicher Landmarken auf Basis eines Seriensensors realisiert, die eine hohe Präzision und Robustheit in unterschiedlichen Umgebungen und Randbedingungen ermöglichen.

Zusätzlich wurden relevante Standards und gesetzliche Rahmenbedingungen für das automatisierte Fahren im öffentlichen Raum identifiziert, ein Sicherheitskonzept für diese Anwendungen abgeleitet und eine Zertifizierungsstrategie entwickelt. Die Ergebnisse des Projekts bilden eine wertvolle Grundlage für zukünftige Anwendungen automatisierter Fahrfunktionen und die Gestaltung energieeffizienter Fahrzeugprozesse.

Verbundprojekt E-Self

Das selbstfahrende Elektrofahrzeug im Fahrzeugwerk

BMWK-Förderprogramm:

Digitalisierung der Fahrzeughersteller und Zuliefererindustrie

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

01.01.2022 – 30.06.2024

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Förderkennzeichen (Aktenzeichen):

13IK007C

Inhaltsverzeichnis

1 Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse 3

1.1 AP2 – Konzeption Produktions-/Logistikkette und Evaluation der Use Cases 3

1.2 AP3 – Use Case 1: Produktions- und Fahrzeugsammelplatz inkl. Ladestation 7

1.3 AP4 – Use Case 2: E-Fahrzeugverladung, Logistik und Verladebetrieb 8

1.4 AP5 – Sicherheitssysteme und Zertifizierung 14

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 18

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit 18

4 Verwertbarkeit der Ergebnisse 19

4.1 Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse 19

4.2 Technische Verwertung der Ergebnisse 19

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 19

5 Relevante F&E-Ergebnisse von dritter Seite 20

6 Veröffentlichung der Ergebnisse 20

7 Literaturverzeichnis 21

1 Wichtigste wissenschaftlich-technische Ergebnisse

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten Ergebnisse gegliedert nach den jeweiligen Arbeitspaketen beschrieben. Die Technische Universität Braunschweig (TUBS) hat in allen Arbeitspaketen des Vorhabens mitgewirkt. Die Resultate der Verbreitung und Verwertung (AP6) werden gesondert in Kapitel 6 dargelegt.

1.1 AP2 – Konzeption Produktions-/Logistikkette und Evaluation der Use Cases

In Rahmen von AP2 erfolgte zunächst eine Ist-Analyse der manuellen Fahrzeugbewegungen entlang des Gesamtsystems der Produktion und Logistik. Diese Ist-Analyse stellt insbesondere für die Energiebedarfsprognose (vgl. AP4) eine zentrale Ausgangsbasis dar. Weiterhin erfolgte in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern eine Spezifikation der Anwendungsfälle und relevanter Anforderungen. Ausgehend davon wurden seitens der TUBS zu entwickelte Teilsysteme definiert und Konzepte zur Serienimplementierung abgeleitet. Die Evaluation der Entwicklungen auf Basis selbst definierter Testszenarien wird im Rahmen dieses Berichts in den zugehörigen Anwendungsfällen (AP3 und AP4) ausgeführt.

<u>Anforderungen entlang der Produktions- und Logistikkette (Energiebedarfsprognose)</u>

Der Energiebedarf eines Fahrzeugs lässt sich in drei wesentliche Bestandteile unterteilen: Energiebedarf in Folge der Fahrwiderstände, Energiebedarf für die Nebenverbraucher sowie Energiebedarf in Folge der Antriebsverluste. Der Energiebedarf in Folge der Fahrwiderstände wird durch das vorliegende Fahrprofil sowie die dazugehörigen Fahrzeugparameter bestimmt. Der Energiebedarf der Nebenverbraucher schließt alle Nebenverbraucher des Fahrzeugs mit ein. Dies sind einerseits Komfortfunktionen wie Sitzheizung oder Radio und Entertainment sowie anderseits sicherheits- und funktionsrelevante Komponenten wie Licht oder auch Sensorik und Aktuatorik. Der Energiebedarf in Folge der Antriebsverluste wird wesentlich durch den Antrieb und seine Auslegung bestimmt sowie das Fahrzeug mit den dazugehörigen Fahrzeugparametern und dem Fahrprofil. Zur Gewährleistung einer allgemeingültigen Anwendbarkeit für verschiedene Fahrzeuge nach End-of-Line (EoL) müssen entsprechend der Fahrzeuge und den zugehörigen Parametern, die Nebenverbraucher und die Fahrprofile berücksichtigt werden. Insbesondere bei den Fahrzeugen, deren Parametern und den Nebenverbrauchern sind fahrzeugspezifische Umsetzungen erforderlich.

Zunächst wurden zur Energieverbrauchsprognose Szenarien abgeleitet, die die Transportwege im Werk abbilden. Darüber hinaus wurde ein Flow-Chart der einzelnen Stationen nach End-of-Line inklusive der zu berücksichtigenden Einflüsse auf den Energieverbrauch erstellt, siehe Abbildung 1. Hierbei werden nach der EoL verschiedene Stationen durchlaufen. Angefangen mit der Spureinstellung, dem Rollentest sowie Licht- & ADAS-Test. Für die Spureinstellung sowie den Rollentest werden entsprechende Fahrprofile in der Energiebedarfsberechnung berücksichtigt, bei Licht- und ADAS-Test wird eine Standdauer hinzugezogen. Bei allen Stationen sind die Nebenverbräuche im Fahrzeug von der Bordnetzlast, dem Betrieb der einzelnen Aggregate sowie weiteren Verbrauchen insbesondere dem Licht und der Sensorik beim Licht- und ADAS-Test zu berücksichtigen.

Zur Energieschätzung wurden eingangs Abschätzungen getroffen, welche kontinuierlich über die Anwendungsfälle aktualisiert werden können und basierend auf Messdaten implementiert werden. Nach den drei Teststationen werden die Fahrzeuge über Förderbänder (Conveyer-Belts) über verschiedene Stationen bis in den Außenbereich transportiert, sowie verschiedenste Prüfungen an den Fahrzeugen durchgeführt. Zwischen den Förderbändern und auch zwischen den Stationen können, je nach Zustand des Fahrzeugs, Nachbearbeitungen in der Werkstatt durchgeführt werden. Hier sind insbesondere die Häufigkeiten und die damit zusammenhängenden Standzeiten relevant.

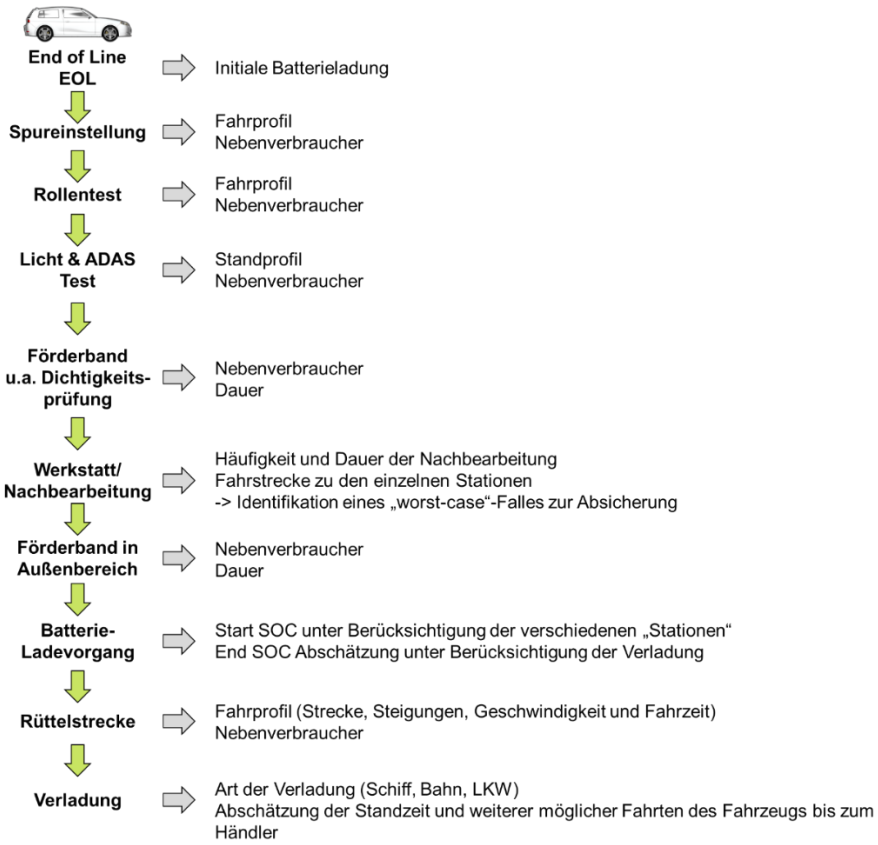

Abbildung 1: Flussdiagramm und Grundaufbau des Szenarios nach End-of-Line inklusive der Einflussfaktoren

Im Flussdiagram ist nach dem Förderband in den Außenbereich und der Fahrt auf der Rüttelstrecke (Squeek&Rattle, S&R) die Batterieladestation vorgesehen. Der Ladevorgang wird hierbei auf Basis der prognostizierten Energiebedarfe im gesamten Szenario durchgeführt. Nach dem Ladevorgang werden abschließende Tests mit dem Fahrzeug durchgeführt. Anschließend wird das Fahrzeug an das Verladegate zur Verladung auf eines von drei möglichen Transportmitteln gebracht. Hierbei werden die Fahrzeuge mittels Schiff, Bahn oder LKW aus dem Fahrzeugwerk zum Händler oder die Verkaufsregion zur Weiterverladung transportiert. Insbesondere bei den Verladungsarten haben die Standzeiten der Fahrzeuge sowie die Gesamtdauer des Transports bis zum Händler einen signifikanten Einfluss auf den Batterieladezustand aufgrund von Entladungsprozessen. Da bei Produktionsende bei EoL der Auslieferungsort des Fahrzeugs bekannt ist, kann mittels statistischer Analyse eine Abschätzung hinsichtlich der Standzeiten im Werk sowie bei dem Transport getroffen werden.

<u>Anforderungen entlang der Produktions- und Logistikkette (Fahrzeugautomatisierung)</u>

Die TUBS befasste sich im Kontext der Fahrzeugautomatisierung mit der Forschungsperspektive fahrzeugzentrierter Lösungen. Durch den Einsatz fahrzeuginterner Umfeldsensorik können langfristig Funktionsbestandteile der Infrastruktur ersetzt (vgl. AVP-Typ-1; automatisiertes Valet-Parken) bzw. mittelfristig Systemanforderungen der Infrastruktur durch Kombination von Fahrzeug- und Infrastrukturintelligenz reduziert werden (vgl. AVP-Typ-3). Im Rahmen des Projekts legte die TUBS besonderen Fokus auf das Funktionsmodul der Eigenlokalisierung, welches mittels fahrzeuginterner Umfeldsensorik bewerkstelligt werden sollte.

Für die Anforderungsermittlung der Eigenlokalisierung wurden im ersten Schritt auf Basis einer Literaturrecherche relevante Standards und Veröffentlichungen identifiziert. Basisanforderungen für den Entwicklungsprozess ergeben sich durch die Standards ISO

26262 (Funktionale Sicherheit) sowie ISO 21448 (Sicherheit der beabsichtigten Funktionalität). Weiterhin werden in ISO 23374 Anforderungen im Speziellen für den Anwendungsfall des Automatisierten Valet-Parkens definiert, welcher dem Valet-Driving in der Produktionsumgebung stark ähnelt. Für den AVP-Typen 2 (Intelligenz vollständig in Infrastruktur) wird in diesem Standard eine Positionsgenauigkeit von 15 cm definiert. Die erhöhten Genauigkeitsanforderungen im Vergleich zu einem Typ-1-System resultieren daraus, dass die gesamte Lokalisierungs- und Perzeptionsaufgabe funktional der Infrastruktur zugeordnet ist. Für die Richtungsgenauigkeit wird unabhängig von der Systemausprägung ein Wert von 5 Grad vorgegeben. Für die Endposition des Fahrzeuges, welches sich in einem Parkplatz befindet, werden relative Abstände zu den Parkplatzmarkierungen definiert. Hierbei sei auf ISO 20900 verwiesen. Dieser Standard beschreibt die Anforderungen an teilautomatisierte Parksysteme gemäß SAE-Level 2.

Im zweiten Schritt erfolgte die Herleitung spezifischer Anforderungen an das Lokalisierungssystem. Ausgehend von der Fachliteratur wurde ein Konzept aufgegriffen, welches sogenannte Schutzniveaus definiert. Diese beschreiben für einen bestimmten Zeitpunkt die Schätzung des Systems über seinen maximal möglichen Positionsfehler in allen Richtungen. Die maximal zulässigen Schutzstufen, die für einen sicheren Betrieb zu spezifizieren sind, werden als Alarmgrenzen bezeichnet. Die Alarmgrenzen sind entsprechend des Anwendungsfalls zu definieren und ermöglichen die Ableitung von Anforderungen an die Lokalisierung, insbesondere in Form der Positionsgenauigkeit und Integrität.

Basierend auf diesem Konzept wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher unter Berücksichtigung der Fahrzeugmaße, Fahrgassenbreiten und Kurvenradien Anforderungen an die Lokalisierungsgüte in Form von lateralen und longitudinalen Genauigkeiten definiert. Ausgehend davon lassen sich Anforderungen für die Orientierungsgenauigkeit sowie Aktualisierungsrate treffen. Für den Bereich der End-of-Line wurden die Anforderungen durch die geometrischen Restriktionen hergeleitet. Dazu zählen unter anderem die Breite der Einfahrt in die Testboxen, die Breite der Conveyor-Fläche sowie die Ausfahrt aus der Produktionshalle auf dem Conveyor-Belt.

Zur Überprüfung der Anforderungen wurden geeignete Metriken identifiziert. Im Fokus steht die Erfassung der Integrität sowie Genauigkeit des Systems. Als Basis-Metrik eignet sich das ATE (Absolut Trajectory Error). Nachgelagert kann ausgehend davon die Genauigkeit am 95sten Perzentil gemessen werden. Die Integrität kann je nach Sicherheitsanforderung bspw. durch Einhaltung einer Standardabweichung von 5,73 σ überprüft werden. Um eine nachvollziehbare Übersicht über die Genauigkeit und Integrität des Systems zu erhalten, eignet sich das Stanford-Diagramm, welches sich zu einer Referenzdarstellungstechnik im SBAS-Bereich (Satellite-based Augmentation System) entwickelt hat.

<u>Konzepte zur Serienimplementierung</u>

Als maßgeblich für das Konzept der Serienimplementierung wurde im Rahmen der Untersuchungen die Wahl der Sensortechnologie eingestuft. Eine besonders hohe Leistungsfähigkeit wird in der Regel durch Lidar-Systeme erreicht, welche jedoch im Vergleich zu weiteren Technologien wie Radar und Monokamera hohe Hardwarekosten aufweisen und daher im aktuellen Volumen-Segment nicht eingesetzt werden. Aus diesem Grund wurde für die Entwicklung der Lokalisierungssysteme der Fokus auf kosteneffiziente visuelle Methoden mittels Monokamera gelegt. Dabei wurden zwei Ansätze konzipiert:

1. Lokalisierung mittels Monokamera und natürlicher Landmarken
2. Lokalisierung mittels Monokamera und künstlicher Landmarken

Durch die Entwicklung und Untersuchung von Verfahren mit divergierenden Wirkprinzipien können jeweilige Stärken und Schwächen systematisch identifiziert werden, wodurch gezielte Optimierungen und neue Konzepte für zukünftige Entwicklungen abgeleitet werden können. Die Ausgangsbasis im ersten Ansatz bildet der open-source Algorithmus ORB-SLAM (Oriented FAST and rotated BRIEF – Simultaneous Localization and Mapping), der im Zuge der Arbeiten für den Anwendungsfall modifiziert und erweitert wurde. Die Idee ist dabei im

Kamerabild 2D-Merkmale aus der vorliegenden Umgebung zu extrahieren und in einer 3D-Repräsentation abzuspeichern. „Natürlich“ bedeutet in diesem Kontext, dass keine zusätzlichen Installationen von visuellen Infrastrukturelementen für den Zweck der Lokalisierung vorgenommen werden. Die Grundlage für die Merkmalsbildung im Kamerabild bilden alle charakteristischen Merkmale wie z. B. Eckpunkte von Wänden oder Kontrastunterschiede an Objekten.

Im zweiten Ansatz werden sogenannte künstliche Landmarken eingesetzt, welche speziell für die Lokalisierung in der Infrastruktur installiert werden. Im Rahmen der Untersuchungen werden Landmarken des Typs Aruco verwendet (vgl. Abbildung 2). Vorteilhaft beim Einsatz künstlicher Landmarken ist, dass durch das Wissen der Markerdimension und –pose im Raum eine exakte Tiefenschätzung und Skalierung der 3D-Welt implizit möglich ist. Die Fahrzeuglage kann durch Assoziation zwischen 2D-Pixelbild und 3D-Welt ermittelt werden.

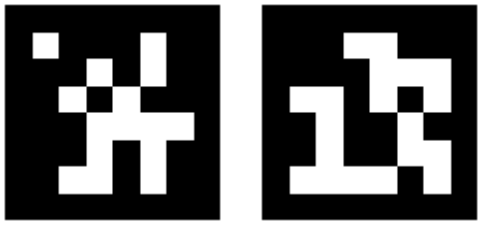

Abbildung 2: Beispiel künstlicher Landmarken – Aruco Marker

Eine nähere Ausführung der Algorithmen erfolgt in den nachgelagerten Arbeitspaketen, in welchen die Implementierung vorgenommen wurde. Im fachlichen Austausch zwischen den Projektpartnern wurde entschieden, dass der zweite Ansatz (künstliche Landmarken) im Außenbereich (Use Case 2) umgesetzt und realisiert werden sollte. Vorteilhaft zeigt sich, dass die für den Algorithmus verwendeten Merkmale (künstliche Landmarken) weniger störanfällig gegenüber variierenden Randbedingungen im Vergleich zu natürlichen Merkmalen sind. So verändert sich bspw. die Vegetation in der Außenumgebung kontinuierlich mit der Zeit. Das weitere Vorgehen und die Resultate werden daher in AP4 (Use Case 2) weiter ausgeführt. Für den Indoor-Bereich (AP3 – Use Case 1) wurde dementsprechend der erste Ansatz (natürliche Landmarken) weiterverfolgt, implementiert und evaluiert.

<u>Ableitung von Testszenarien für Fahrzeugautomatisierung</u>

Für die Evaluation der Lokalisierungskonzepte wurden spezifische Einflussfaktoren auf die jeweiligen Verfahren identifiziert und im Rahmen von Realversuchen untersucht. Das Vorgehen und die Resultate werden in AP3 und AP4 näher ausgeführt.

Im Rahmen der Lokalisierung mittels natürlicher Landmarken wurden folgende Einflussfaktoren bewertet:

- Variierende Lichtverhältnisse
- Variierende Umgebungsbelegung an unterschiedlichen Tagen, z.B. durch wechselnd, parkende Fahrzeuge
- Kamerakalibrierung (Intrinsik und Extrinsik)
- Fahrgeschwindigkeit

Im Rahmen der Lokalisierung mittels künstlicher Landmarken wurden folgende Einflüsse untersucht:

- Anzahl eingesetzter Marker (Einzel- vs. Doppelanordnung)
- Markeranordnung, im Speziellen die Orientierung um die y-Achse und der laterale Abstand zwischen der Doppelanordnung
- Genauigkeitseinfluss der Distanz zwischen Kamera und Marker
- Variierende Helligkeit des Lichts
- Kamerakalibrierung (Intrinsik und Extrinsik)
- Fahrgeschwindigkeit

1.2 AP3 – Use Case 1: Produktions- und Fahrzeugsammelplatz inkl. Ladestation

Das Ziel von AP3 war die Entwicklung der Automatisierungsfunktionen zur Bewältigung der autonomen Fahrten ausgehend von der End of Line zur Ladestation. Im Rahmen dessen erfolgte seitens der TUBS im ersten Schritt die initiale Entwicklung sowie Erprobung der Automatisierungsfunktionen in mehreren Versuchsumgebungen in Braunschweig sowie in der Simulation unter Berücksichtigung der in AP2 abgeleiteten Anforderungen. Im Anschluss wurden die entwickelten Algorithmen auf die Werksumgebung transferiert, weiterentwickelt und in verschiedenen Realversuchen evaluiert.

Für die Entwicklung des Ansatzes mittels natürlicher Landmarken fanden zunächst Voruntersuchungen am Standort des Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) in zwei Indoor-Umgebungen (NFF-Technikum, Forschungsparkhaus) statt. Anschließend wurde das System vor Ort in den Ford-Werken Köln implementiert und evaluiert. Abbildung 3 zeigt Einblicke in die Versuchsumgebung.

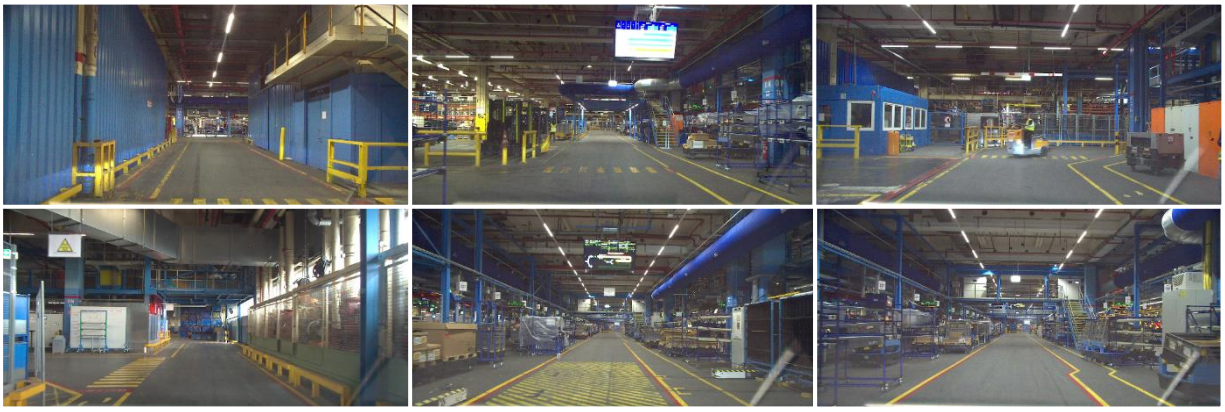

Abbildung 3: Versuchsumgebung in den Ford-Werken Köln

Das Konzept sieht vor, dass zunächst Referenzfahrten durchgeführt werden, in welchen die Umgebung mittels Lidar-Sensorik hochgenau erfasst und eine digitale Karte der Umgebung erstellt wird. Unter Verwendung der Referenzdaten und des Kamera-Videostreams wird anschließend eine hochgenaue 3D-Merkmalskarte aus den natürlichen Bildmerkmalen generiert. Die Merkmale werden hierbei durch sogenannte ORB-Features (Oriented FAST and Rotated BRIEF) beschrieben. Bei dem Verfahren werden Merkmale mittels der FAST-Methodik generiert und auf Basis von BRIEF durch einen Deskriptor beschrieben. Der Deskriptor kodiert den lokalen Bildbereich des Merkmals in einer kompakten, numerischen Darstellung durch sogenannte binäre Intensitätstests. Analog zu einem Fingerabdruck dient der Deskriptor dazu die Merkmale eindeutig zu charakterisieren, wiederzufinden und zu unterscheiden. Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte Szene in der Ford-Umgebung mit im Kamerabild detektierten Merkmalen (grün).

Abbildung 4: Beispielhafte Szene mit detektierten Merkmalen im Kamerabild

Tabelle 1 stellt Ergebnisse aus der Realerprobung in den drei repräsentativen Indoor-Umgebungen dar. Es zeigt sich, dass die Lokalisierungsgenauigkeit im Durchschnitt zwischen 0,6 und 6,7 cm liegt, mit einer maximalen Abweichung zwischen 2,8 und 12,2 cm. Damit weist der fahrzeugzentrierte Ansatz trotz kostengünstiger Sensorik ein hohes Potenzial für den zukünftigen Einsatz auf. Wechselnde Umgebungsobjekte in der Produktion können jedoch auch im Innenbereich zu Einschränkungen der Robustheit und zu einer Verringerung der Genauigkeit führen. Versuche legen nahe, dass eine möglichst häufige Aktualisierung der Merkmalskarte eine Lösung darstellen kann. Im Falle wechselnder Lichtbedingungen, die in Indoor-Umgebungen bspw. durch eine halboffene Bauweise oder variierende Lichteinstrahlung durch Fenster resultieren können, stellt die Beeinflussung des binären Deskriptorvektors einen maßgeblichen Einfluss dar. Die zentrale Erkenntnis der Untersuchungen ist, dass eine Bereithaltung mehrerer Merkmalskarten, welche unterschiedliche Lichtbedingungen speichern sowie die bedarfsgerechte Auswahl in Abhängigkeit der aktuellen Bedingungen einen signifikanten Einfluss auf die Robustheit des Verfahrens darstellen. Weiterhin konnte durch Fusion verschiedener Karten eine maßgebliche Steigerung der Robustheit erreicht werden, da in diesem Fall identische Merkmale durch eine Vielzahl von Deskriptoren unterschiedlicher Lichtverhältnisse beschrieben werden. Außerdem ist eine zusätzliche KI-basierte Klassifikation der Merkmale nach bestimmten Kategorien denkbar, um eine ausschließliche Verwendung von Infrastrukturmerkmalen und damit eine Steigerung der Robustheit zu ermöglichen.

Tabelle 1: Resultate aus der Realerprobung. Jede Zelle enthält den durchschnittlichen (mean) und maximalen Fehler (max) für den jeweiligen Testlauf [mean | max] in Zentimeter

Testlauf	Umgebung			
	End of line		***Technikum***	***Parkhaus***
	Geradeaus	***inkl. Kurven***		
1	1.0 | 5.7	2.1 | 6.4	1.6 | 6.3	3.4 | 8.1
2	0.6 | 2.8	2.9 | 6.4	2.1 | 5.6	3.1 | 8.3
3	0.7 | 3.1	6.7 | 11.5	2.1 | 6.0	2.8 | 7.9
4	0.7 | 2.9	3.5 | 12.2	2.0 | 5.9	3.3 | 8.9

1.3 AP4 – Use Case 2: E-Fahrzeugverladung, Logistik und Verladebetrieb

Das Ziel von AP4 war die Entwicklung einer Energiebedarfsermittlung als Teil des Lademanagements sowie der Automatisierungsfunktionen zur Bewältigung der autonomen Fahrten ausgehend von der Ladestation bis zum logistischen Verladeort. Die Funktionalitäten wurden zunächst auf Basis von Messdaten bzw. Vorversuchen in Braunschweig entwickelt und im Anschluss auf die reale Demonstrationsumgebung portiert.

Energiebedarfsermittlung / SOC orientierte Ladestrategie

Ziel des TAP 4.1 ist die Erstellung der Energieverbrauchsprognose. Prinzipiell lässt sich der Verlauf in zwei Bereiche unterteilen. Zur Ermittlung der Energiebedarfe wird ein rechnergestütztes Schätzwerkzeug aufgebaut, dessen Konzept in Abbildung 5 dargestellt ist.

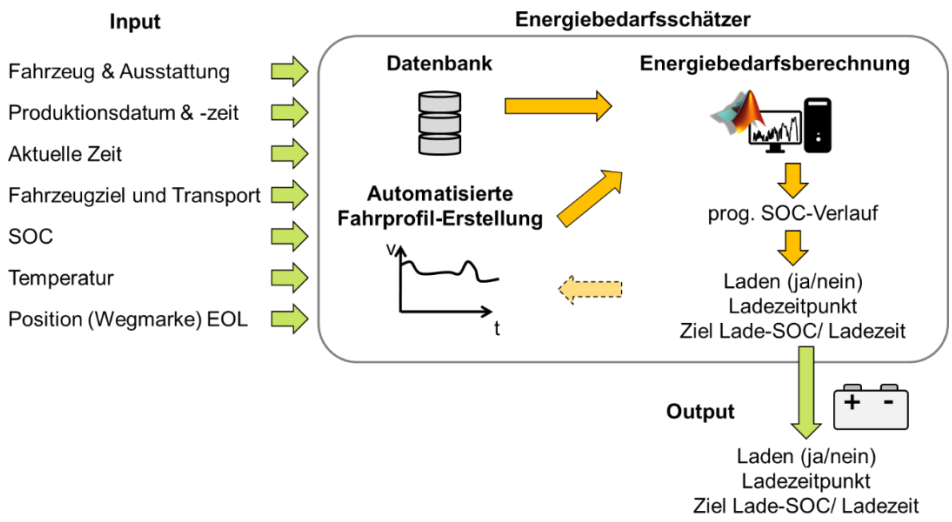

Abbildung 5: Konzept Energiebedarfsberechnung mit erforderlichem Dateninput sowie deren Schnittstellen

Für die Abschätzung der Energiebedarfe sind verschiedene Eingangsgrößen seitens des Produktionssystems erforderlich. Dies betrifft zum einen das Fahrzeug mit den dazugehörigen Ausstattungen. Darüber hinaus sind die derzeitigen Statusinformationen wie Produktionszeiten, der aktuelle SOC, die Temperatur und eine Wegmarke im Transportweg relevant. Basierend auf den Eingängen wird mittels der automatisierten Fahrprofil-Erstellung das für die Schätzung relevante Fahrprofil unter Verwendung der aktuellen Fahrzeugposition erstellt. Anschließend erfolgt eine Energiebedarfsberechnung, die auf dem zuvor erstellten Profil basiert. Im ersten Schritt wurde eine vereinfachte, auf konstanten Wirkungsgraden basierende Energiebedarfsschätzung aufgebaut. Diese wurde im Projektjahr 2023 entsprechend weiterentwickelt. Im Wesentlichen wurde die Modellgüte erhöht, indem ein detailliertes Fahrzeug und Antriebsstrangmodell erstellt wurde. Der Modellaufbau ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Berechnung der Energiebedarfe basiert auf einem Zyklusprofil. Anschließend werden mittels der Fahrzeugparameter die Fahrwiderstandsbedarfe sowie die resultierenden Drehmomente und Drehzahlen auf Radebene berechnet. Das Drehmoment und die Drehzahl am Rad dienen als Eingang für die Antriebsberechnung in der alle Drehmomente und Drehzahlen der Antriebsaggregate sowie die daraus resultierenden Leistungsbedarfe berechnet werden. Diese Leistung muss vom Bordnetz zur Verfügung gestellt werden, neben den Nebenverbraucherbedarfen, die situationsadaptiv im Zyklus und Prüfprofil der Fahrzeuge hinterlegt sind. Abschließend wird der resultierende Bedarf aus dem Energiespeicher, in dem Fall der Batterie ermittelt.

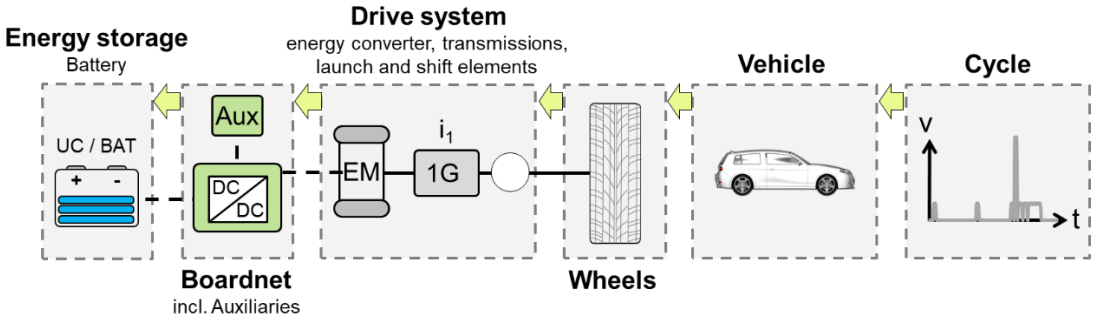

Abbildung 6: Vereinfachtes Antriebsstrangsimulationsmodell

Die Wirkungsgrade in dem Rückwärtssimulationsmodell sind mit entsprechenden Kennlinien (Getriebe, Batterie & Leistungselektronik) sowie Kennfeldern für den Elektromotor hinterlegt und ermöglichen eine detailliertere Energiebedarfsermittlung. Weiterhin wurde das Modell um eine Modellierung des Ladevorgangs, einem simplifizierten thermischen Modell sowie einem Umgebungstemperaturmodell, siehe Abbildung 7 ergänzt. Für das Umgebungstemperaturmodell wurden Mittelwerte aus den Wetterdaten der letzten drei Jahre zu Grunde gelegt. Die hinterlegten Temperaturkurven wurden entsprechend für jeden Monat

ermittelt, um unterschiedliche Analysen der Jahreszeiten zu ermöglichen und um eine genauere Energiebedarfsschätzung zu ermöglichen. Zur Absicherung der Modellierung und der Energiebedarfsberechnung wurden einerseits Messdaten aus dem Feld sowie andererseits Messdaten bei unterschiedlichen Temperaturen verwendet, welche am Klimarollenprüfstand am NFF eingefahren wurden.

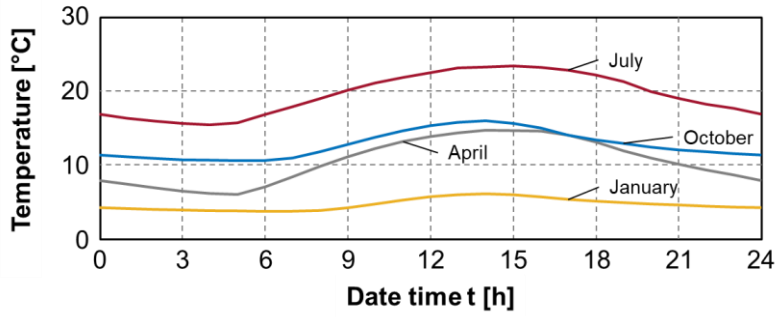

Abbildung 7: Hinterlegte Temperaturkurven in Abhängigkeit des Monats für Köln

Das detailliertere Energiebedarfsmodell wurde im weiteren Projektverlauf für verschiedene Analysen hinsichtlich des Energiebedarfs in der Produktion angewendet. Hierbei stehen unter anderem der Einfluss des Ladens, Einfluss von verschiedenen Fahrzeugen sowie der Einfluss des Transportmittels im Fokus. Die Abbildung 8 stellt den Energieverbrauch von zwei Mach-E Varianten in Abhängigkeit des Transportsystems dar. Wird der Mach-E Standard Range mit dem Zug statt mit dem LKW zum Händler transportiert, verlängern sich die Szenariozeit und die Entfernung. Dadurch erhöht sich der Energiebedarf um 14 %. Der Anteil des Energieaufwands beträgt 45 % im Fahrbetrieb und 55 % im Stillstand. Wird das Fahrzeug per Schiff transportiert, verlängert sich das Szenario noch weiter. Dies führt zu einem zusätzlichen Energiebedarf von 105 % im Vergleich zum Transport mit dem Lkw, bei dem 15 % während der Fahrt und 85 % im Stillstand verbraucht werden. Aufgrund der im Vergleich zur Zunahme der zurückgelegten Strecke relativ stärkeren Zunahme der Stillstandszeiten resultiert der größte Teil des zusätzlichen Verbrauchs aus der Selbstentladung der Hochspannungsbatterie. Der relative Anstieg des Energiebedarfs des Mach-E Extended Range ist etwas größer als bei der Variante Standard Range. Hier steigt der Energiebedarf um 14 % für den Transport per Bahn und um 110 % für den Transport per Schiff.

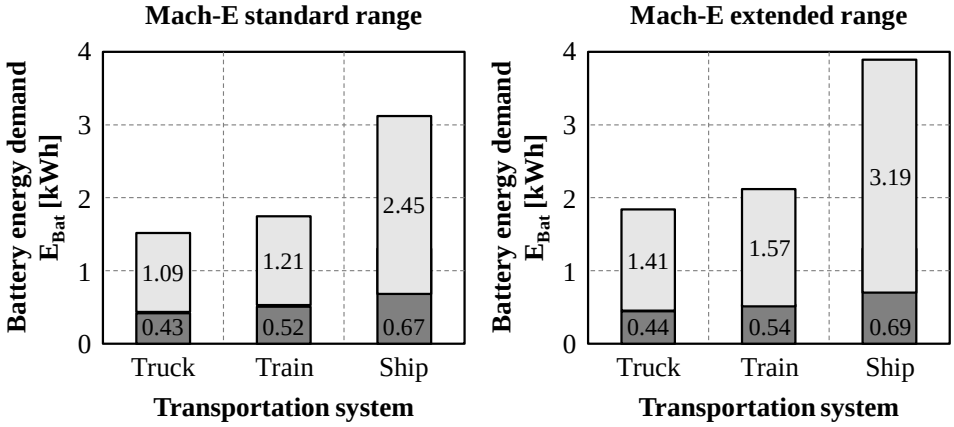

Abbildung 8: Fahrzeugenergiebedarf für ein Mach-E in Abhängigkeit des Transportsystems

Zusätzlich wird für beide Mach-E Varianten eine Untersuchung durchgeführt, um den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit des automatisierten Fahrsystems zu quantifizieren. Alle anderen Geschwindigkeiten, z. B. bei den Rollversuchen, werden gleich gehalten, ebenso wie die Fahrstrecken. Daher wurden verschiedene Fahrprofile mit unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten verwendet. In Abbildung 9 sind die resultierenden Energiebedarfe für den Mach-E mit Standardreichweite und erweiterter Reichweite dargestellt. Als Basiswert dient eine Geschwindigkeit von 6 km/h. Bei einer Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit auf 3 km/h steigt der Energiebedarf des Fahrzeugs um 10,5 %. Dieser Anstieg findet ausschließlich während der Fahrt statt und ist auf zwei Faktoren zurückzuführen. Erstens ist das Fahrzeug

länger unterwegs, um die gleiche Strecke zurückzulegen, was zu einem höheren Energieverbrauch durch die konstante Bordstromversorgung über einen längeren Zeitraum führt. Zweitens ist der Wirkungsgrad des Antriebs bei niedrigeren Geschwindigkeiten nicht so optimal, so dass während der gesamten Fahrt mehr Energie benötigt wird. Beim Mach-E mit erweiterter Reichweite sind diese Effekte mit einem relativen Mehrbedarf von 8,6 % etwas weniger stark ausgeprägt. Eine Verdoppelung der Fahrgeschwindigkeit auf 12 km/h reduziert dagegen den Energiebedarf bei der Mach-E-Standardreihe um 3,3 %, was sich nur während der Fahrt auswirkt. Der Unterschied bei der erweiterten Reichweite des Mach-E ist mit einer Einsparung von 2,7 % im Vergleich zur Standardreichweite ebenfalls relativ gering.

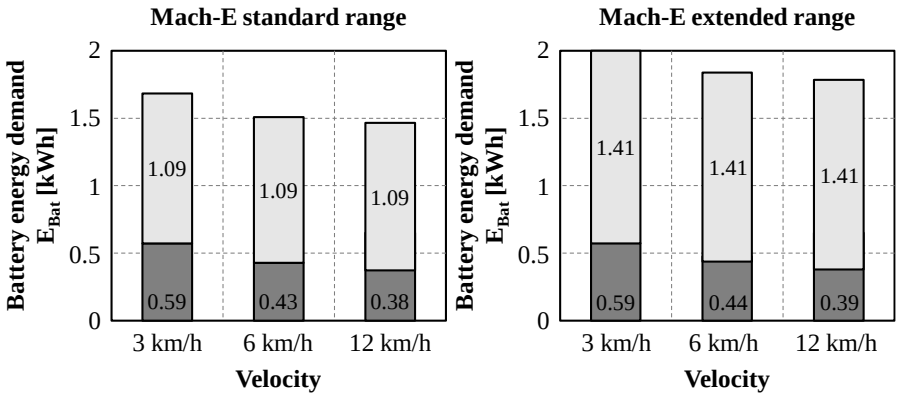

Abbildung 9: Energiebedarf des Fahrzeugs für die Mach-E Standardreichweite und die erweiterte Reichweite in Abhängigkeit von der ADP-Fahrgeschwindigkeit, unterteilt in Fahrbetrieb (dunkelgrau) und Stillstand (hellgrau)

Obwohl dieser Einfluss vergleichsweise gering ist, sind aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht höhere Geschwindigkeiten vorteilhaft, um den Antriebsenergiebedarf zu reduzieren. Dies muss in die Gesamtauslegung des Systems integriert werden und auch über die angewandte Funktion realisiert werden. Die Energiebedarfsberechnung wurde abschließend mit dem automatisierten System verknüpft.

Entwicklung, Implementierung und Evaluation der Eigenlokalisierung mittels künstlicher Landmarken

Wie zuvor dargelegt, wurde für den zweiten Anwendungsfall der Lokalisierungsansatz mittels künstlicher Landmarken weiterverfolgt. Grundlage des Ansatzes bilden Aruco-Marker, deren Positionen mit zugehöriger ID in einer digitalen Karte hinterlegt werden. Jeder installierte Marker weist eine einzigartige ID und ein einzigartiges Erscheinungsbild auf. Voraussetzung ist, dass mittels der Monokamera des Egofahrzeugs ein Bild aufzeichnet wird, in welchem mindestens eine Landmarke vollständig erfasst wird. Die Schritte des Algorithmus werden nachfolgend beschrieben und sind in Abbildung 10 zusammengefasst.

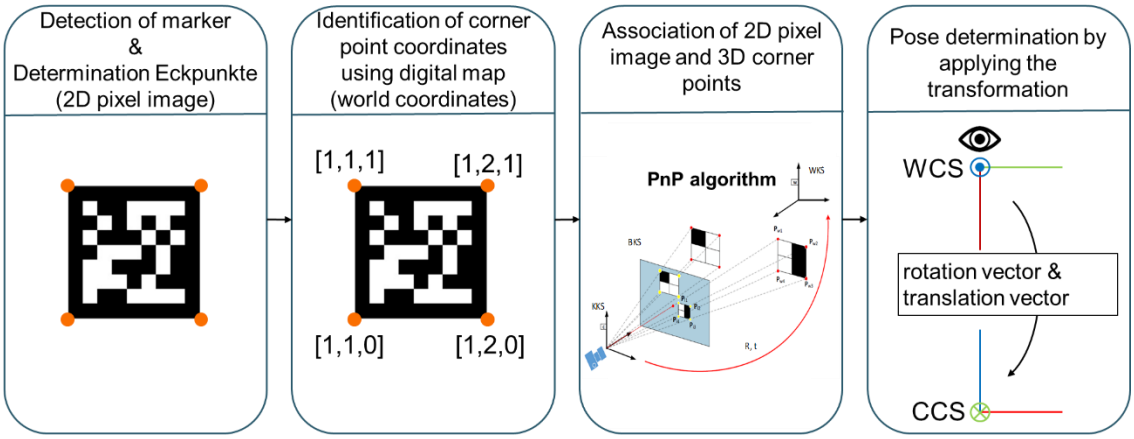

Abbildung 10: Prozessschritte des Lokalisierungsalgorithmus mittels künstlicher Landmarken

Im ersten Schritt erfolgt die Detektion des Markers im Bild. Wird ein Marker erkannt, wird die zugehörige ID ausgegeben sowie die 2D-Pixelkoordinaten der Eckpunkte des Markers bestimmt. Im zweiten Schritt werden diese Eckpunktkoordinaten im Weltkoordinatensystem identifiziert, indem die hinterlegte ID mit der zuvor erstellten digitalen Karte abgeglichen wird. Ausgehend von dem Wissen der Pixelkoordinaten im 2D-Bild und den 3D-Weltkoordinaten wird mit Hilfe des so genannten Perspektive-n-Punkt-Algorithmus, die Pose der Kamera in Bezug zur Landmarke bestimmt. Resultat ist dabei die Translation und Rotation des Ursprungs des Weltkoordinatensystems zum Kamerakoordinatensystem. Im letzten Schritt werden die ermittelten Translations- und Rotationsvektoren verwendet, um die Kameraposition im Weltkoordinatensystem zu berechnen. Da die Landmarken nur in bestimmten Abständen in der Infrastruktur installiert sind und die Detektion je nach Entfernung und Lichtverhältnissen eingeschränkt sein kann, werden die Ergebnisse mit einer relativen Positionsschätzung auf Basis von fahrzeuginternen Sensoren fusioniert. Aufgrund der nichtlinearen Zusammenhänge im Bewegungsmodell wird ein Unscented-Kalman-Filter eingesetzt.

Um die Qualität der Lokalisierung zu erhöhen, wurden in Vorversuchen Einflussfaktoren identifiziert und systematisch analysiert. Das Vorgehen sah einen statischen Versuchsaufbau vor, in welchem unter kontrollierten Umgebungsbedingungen im Technikum des NFF einzelne Einflussfaktoren schrittweise bewertet wurden. Die untersuchten Einflussfaktoren waren die Anzahl der Landmarken im Bild, die Umgebungshelligkeit, die Drehung der Marker in der Infrastruktur, der Abstand zwischen den Markern und die Fahrgeschwindigkeit. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen exemplarisch Resultate für die variierte Markeranzahl sowie die Markerdrehung um die y-Achse (Nicken).

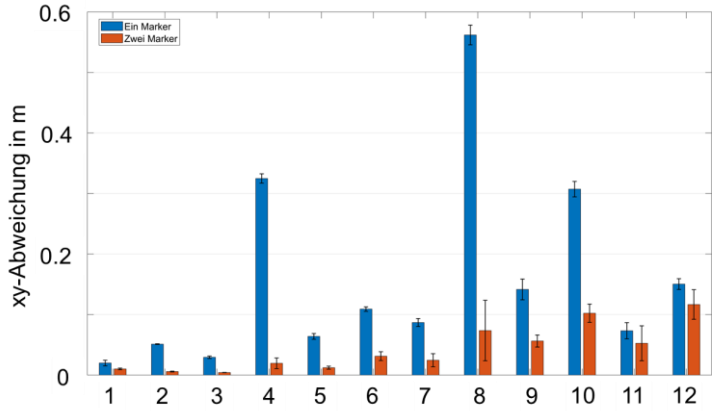

Abbildung 11: Einfluss der Markerdrehung auf die Lokalisierungsgenauigkeit

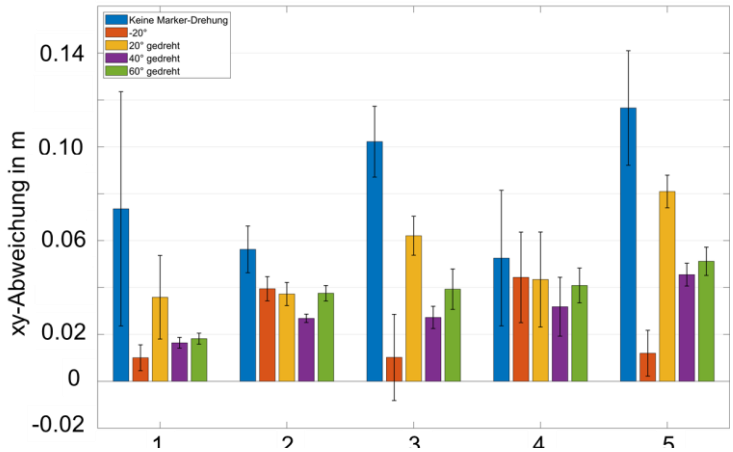

Abbildung 12: Einfluss der Markeranzahl auf die Lokalisierungsgenauigkeit

Weiterhin wurden Optimierungen im Algorithmus untersucht und implementiert. Dazu zählt zum einen die zusätzliche Verwendung weiterer Punkte im Marker. Die Idee ist hierbei die Eckpunkte der einzelnen Zellen innerhalb des Markers zu nutzen, um eine höhere Anzahl an Lösungspunkten in dem PnP-Algorithmus zu berücksichtigen. Zum anderen wurden verschiedene Algorithmen der Eckpunkt- sowie Kantenerkennung untersucht und ein eigenes

Verfahren implementiert, mit dem Ziel eine präzisiere Bestimmung der vier Eckpunkte des Markers zu erhalten. Da es sich bei dem Kamerabild um eine Graustufendarstellung handelt, ist die Identifikation der Eckpunkte nicht binär möglich, sodass Optimierungsansätze aus der Literatur untersucht wurden.

Als Einsatzszenario wurde im Austausch mit dem Konsortium die Wegstrecke im Außenbereich von dem Gate Release zur Zugverladung vorgesehen (siehe Abbildung 13).

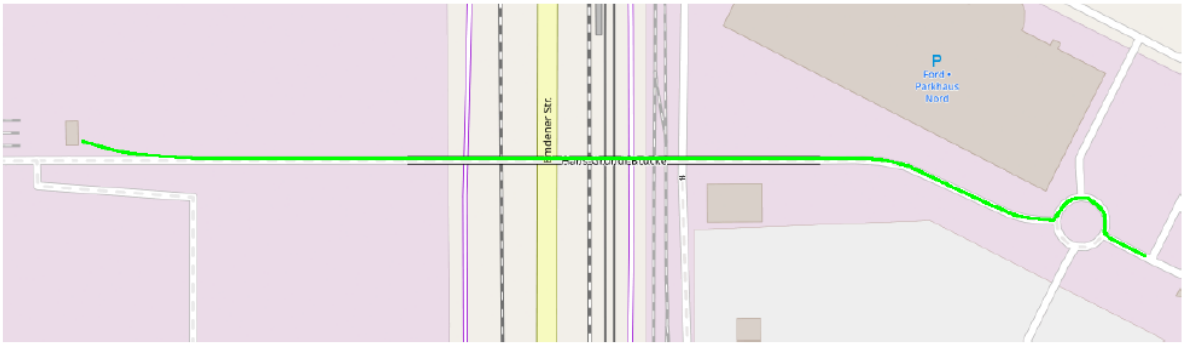

Abbildung 13: Untersuche Wegstrecke (grün) für Evaluation des Systems

Diese Wegstrecke weist eine hohe Distanz auf, weshalb eine Ausrüstung mit einem AVP-Typ-2-System kostenintensiv ist. Zur Bewertung des final implementierten Systems wurde die Wegstrecke temporär mit künstlichen Landmarken ausgerüstet. Dabei wurden die Landmarken hochgenau in Position und Orientierung mittels georeferenzierter Luftbilder, Lasermessgerät und Präzisionskompass in einer digitalen Karte referenziert. Abbildung 14 zeigt die Installation exemplarisch entlang des Versuchsbereichs.

Abbildung 14: Installationen der künstlichen Landmarken entlang der Versuchsumgebung

Die Resultate der Untersuchung sind in Abbildung 15 dargelegt. Hierbei wird der Positionsfehler (blau) entlang der Wegstrecke inkl. Zuordnung zu den jeweiligen Landmarkenpaaren (rot) aufgezeigt. Es ist ersichtlich, dass sich für einen großen Anteil der Fahrt sehr hohe Genauigkeiten von unter 10 cm sowie unter 20 cm ergeben. Temporär existieren jedoch hohe Abweichungen von bis zu 80 cm. Diese Fehleinflüsse werden primär auf eine inkorrekte Referenzierung der Landmarken-Posen zurückgeführt. Zudem resultieren Störeinflüsse durch die Bewegungsunschärfe im Kamerabild aufgrund der Fahrzeugbewegung und Streckeneinflüssen (Vertikaldynamik). Diese Einflüsse können perspektivisch durch Fusion mit internen Sensoren zur Fahrzeugzustandsmessung reduziert werden.

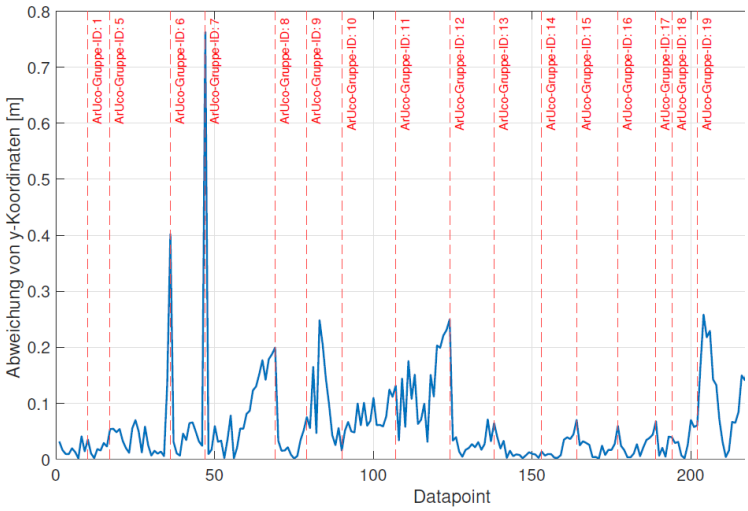

Abbildung 15: Resultate aus der Realerprobung

1.4 AP5 – Sicherheitssysteme und Zertifizierung

Das Ziel von AP 5 ist die Durchführung von Sicherheitsanalysen der entwickelten Funktionalitäten aus AP3 und AP4 nach den relevanten Normen und Standards sowie die Ableitung eines Sicherheitskonzepts und der Testszenarien. Damit baut AP5 auf AP2, AP3 und AP4 auf. Die nachfolgenden Inhalte gliedern sich in die folgenden Abschnitte. Zunächst werden die allgemeinen Sicherheitsanforderungen aus gesetzlichen und herstellerinternen Vorgaben erläutert. Anschließend werden die Sicherheitsanalysen für das AVP-1-System im Ford-Compound-Bereich vorgestellt, gefolgt von einer Einführung in den szenarienbasierten Testansatz für den Sicherheitsnachweis im öffentlichen Straßenverkehr.

<u>Sicherheitsanforderungen aus gesetzlichen und herstellerinternen Vorgaben</u>

Für Automatisierungssysteme gelten Anforderungen aus dem Produkthaftungsgesetz. Der Hersteller haftet für eventuelle Schäden, sofern das Produkt nicht nach der notwendigen Sicherheit konstruiert ist. Die notwendige Sicherheit ist eingehalten, sofern der Hersteller beispielsweise nachweisen kann, nach dem Stand der Technik entwickelt zu haben. Der Stand der Technik ist oftmals in Standards beschrieben [1]. Für den Betrieb eines automatisierten Systems im öffentlichen Straßenverkehr leiten sich weiterhin Anforderungen aus den geltenden Gesetzen auf internationaler, europäischer oder nationaler Ebene ab.

Folgende Standards spielen für den Nachweis der Einhaltung des Stands der Technik eine bedeutende Rolle

- Die ISO 26262 für funktionale Sicherheit
- Die ISO 21448 für die Sicherheit der beabsichtigten Funktionalität (Safety of the Intended Function, SOTIF)
- Die ISO 23374 für Systemspezifikationen und Testprozeduren für Automated Valet Parking Systems (AVPS)
- Die ISO 3450x-Reihe zum szenarienbasierten Testen
- Die ISO 12768 für Systemspezifikationen und Testprozeduren von Automated Valet Driving Systems (AVDS). Die ISO 12768 erweitert die ISO 23374 auf Betriebsbereiche (engl. Operational Design Domain, ODD) außerhalb von Parkflächen. Die ISO 12768 ist jedoch zurzeit in Entwicklung

Weiterhin sind folgende gesetzliche Vorgaben für den Betrieb von automatisierten Funktionen im Straßenverkehr von Bedeutung:

- Das Gesetz zum autonomen Fahren und die dazugehörige Verordnung (Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung, AFGBV), gültig seit Juni 2021 bzw. Juli 2022, auf nationaler Ebene
- Die allgemeine Sicherheitsverordnung (EU) 2019/2144 und Durchführungsverordnung (EU) 2022/1426, gültig seit 2022, auf europäischer Ebene

Sicherheitsanalysen für ein AVP-Typ1-System innerhalb des Ford-Werkes

Für die Sicherheitsanalysen des Systems auf dem Betriebsgelände von Ford wurden die Anforderungen anhand der ISO 26262 abgeleitet, wonach folgende Arbeitsschritte durchzuführen sind. Zunächst ist das betrachtete System (Item Definition) sowie der Betriebsbereich (ODD Definition) zu beschreiben. Anschließend ist eine Gefahren- und Risikoanalyse (engl. Hazard Analysis and Risk Assessment, HARA) durchzuführen, auf Basis derer Sicherheitsziele und ein Sicherheitskonzept abgeleitet werden.

Item und ODD Definition

Als Item wird ein AVP-Typ-1-System aus AP3 und AP4 definiert. Zur Beschreibung der ODD wurde sich an den Anforderungen der ISO 34503: *Specification for operational design domain* sowie der PAS 1883:2020 *Operational Design Domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS) – Specification* der British Standards Institution orientiert.

Im Projektkontext wird sich auf den Anwendungsfall der Fahrt vom Ausgang der Produktionshalle bis zum Parkplatz der Verladung bzw. den Verladerampen konzentriert. Die folgende Abbildung stellt die ODD für das betrachtete AVP-Typ1-System grafisch dar. Auf der Strecke sind Geschwindigkeiten bis 30 km/h zulässig, im Parkbereich soll mit Schrittgeschwindigkeit gefahren werden.

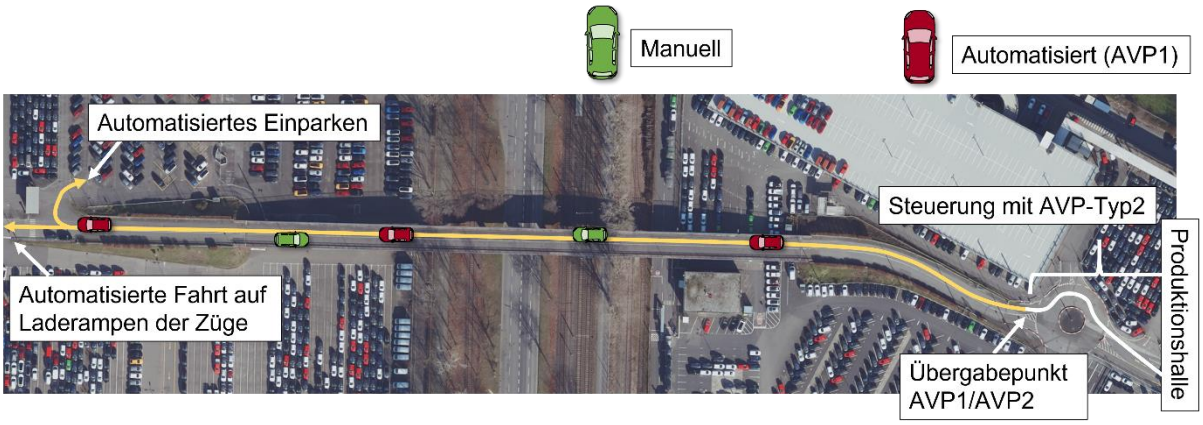

Abbildung 16: ODD des AVP-Typ1-Systems auf dem Ford-Werksgelände

Verletzliche Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer, Wildtiere) sind auf diesem Abschnitt nicht zulässig und werden daher bei den Sicherheitsanalysen nicht betrachtet. Ein Verletzungsrisiko ergibt sich dennoch mit Fahrzeugen, die auf diesem Abschnitt manuell gefahren werden können. Die automatisierten Fahrten sollten möglichst unter allen Umgebungsbedingungen stattfinden finden, um den höchsten wirtschaftlichen Nutzer der Technologie zu erzielen.

Hazard Analysis and Risk Assessment (HARA)

Für die definierte ODD und das Item wurde eine HARA nach den Vorgaben der ISO 26262 durchgeführt. Es wurden folgenden Funktionen des Items betrachtet: Lenken (korrekte Querführung des Fahrzeugs), Bremsen und Beschleunigen (korrekte Längsführung des Fahrzeugs), sowie Kommunikation (Mission Start: Start der Übernahme der Fahrzeugsteuerung durch das AVP-1-System und Mission Finishing: Beenden der Übernahme der Fahrzeugsteuerung durch das AVP-1 System). Im nächsten Schritt wurden die auftretenden Situationen in der ODD beschrieben und je Funktion geprüft, ob eine Fehlfunktion in der Situation einen sicherheitskritischen Einfluss hat. Für die dargelegten

Funktionen wurden die Fehlerfälle nach den etablierten Leitgriffen „Not active/no function“, „Value too high“, „Value too low“, „Value inverted“, „Delayed Function“ betrachtet. Folglich konnten die relevanten Fehlerfälle reduziert werden.

In der nachfolgenden Tabelle sind einige Situationen exemplarisch aufgelistet, sowie für die Funktion Bremsen gezeigt, ob ein Fehlerfall relevant ist.

Tabelle 2: Exemplarische Situationen innerhalb der ODD und Bewertung, ob eine Fehlfunktion des "Bremsens" sicherheitsrelevant ist

ID	SV brakes						Situation Description
	Not active / no function	Value too high	Value too low	Value inverted	Delayed Function	Unintended	
SIT_AVDS1_001	No	No	No	No	No	No	The SV is at standstill in the start position after the roundabout and waits for a mission assignment. A manually driven vehicle is behind the SV.
SIT_AVDS1_002	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	The SV drives straight. A manually driven vehicle is in front of the SV.
SIT_AVDS1_003	No	Yes	No	No	No	Yes	The SV drives straight. A manually driven vehicle is behind the SV.
SIT_AVDS1_004	No	No	No	No	No	No	The SV drives straight. A manually driven vehicle is in the oncoming lane.
SIT_AVDS1_005	analogous to SIT_AVP1_002 - SIT_AVP1_004 as steering in low velocities does not affect the longitudinal movement. Curve is not narrow, so there is no occlusion						The SV drives through the left-hand bend. A manually driven vehicle is in front of the SV.
SIT_AVDS1_006							The SV drives through the left-hand bend. A manually driven vehicle is behind the SV.
SIT_AVDS1_007							The SV drives through the left-hand bend. A manually driven vehicle is in the oncoming lane.
SIT_AVDS1_008	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	The SV turns right to the parking zone. A manually driven vehicle is in front of the SV.

Im darauffolgenden Schritt ist je Kombination aus Situation und Fehlfunktion die Einstufung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit (engl. **E**xposure), Unfallschwere (engl. **S**everity) und Kontrollierbarkeit (**C**ontrollability) vorzunehmen und das ASIL-Level zu berechnen. Aus dem errechneten ASIL-Level ergeben sich empfohlene oder zulässige Fehlerausfallraten, die nachzuweisen sind. Aus den Risikoanalysen werden zudem Sicherheitsziele angeleitet, die entsprechend der vorherigen Einstufungen ebenfalls mit einem ASIL-Level versehen werden. So ergeben sich für das betrachtete System folgende exemplarische Sicherheitsziele inkl. ASIL-Level:

- Ein drohender Zusammenstoß mit einem entgegenkommenden Fahrzeug aufgrund des Verlassens der eigenen Fahrspur muss erkannt und verhindert werden: ASIL B
- Ein drohender Zusammenstoß mit einem vorausfahrenden Fahrzeug aufgrund einer ungewollten Beschleunigung muss erkannt und verhindert werden: ASIL D
- Ein drohender Zusammenstoß mit einem nachfolgenden Fahrzeug aufgrund einer ungewollten Bremsung muss erkannt und verhindert werden: ASIL A

Das entwickelte Sicherheitskonzept adressiert diese Sicherheitsziele und umfasst exemplarisch folgende Sicherheitsmechanismen:

- Der Fahrbereich wird über Geofencing definiert. Sobald dieser verlassen wird oder droht verlassen zu werden, wird automatisch die Geschwindigkeit reduziert und ein Lenkmoment zur Rückkehr zur eigenen Fahrspurmitte indiziert
- Fahrer für die manuellen Fahrten werden mit den Funktionalitäten und Systemgrenzen der automatisiert fahrenden Fahrzeuge unterwiesen. Auf der Route werden Schilder platziert, um auf den automatisierten Verkehr hinzuweisen
- Die maximale Beschleunigung, die Lenkwinkelgeschwindigkeit sowie die maximale Fahrgeschwindigkeit der Fahrzeugansteuerung werden regelbasiert limitiert, sodass selbst bei fehlerhaft berechneten Ausgaben die Auswirkungen minimiert werden können

- Zur Vermeidung von Notbremsungen auf Geisterobjekte muss ein Objekt für mindestens zehn aufeinanderfolgende Zeitschritte (bei 25 frames/s entspricht dies 0,4 s) erkannt worden sein, bevor eine Notbremsung ausgelöst wird

Das Testing und die Evaluation der AVP-Typ-1-Funktionalitäten wurden in Rahmen der Analysen in AP3 und AP4 durchgeführt.

Sicherheitsanalysen für ein AVP-Typ1-System im Bereich der Schiffsverladung (öffentlicher Straßenverkehr)

Im Gegensatz zu dem Use-Case der Zugverladung auf dem Betriebsgelände von Ford umfasst der Use-Case der Schiffsverladung eine Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr. Damit muss die Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben zum autonomen Fahren nachgewiesen werden. Im folgenden Abschnitt werden zunächst die konkreten Gesetze vorgestellt, gefolgt von einer Einführung in das szenarienbasierte Testen, das nun erforderlich wird. Abschließend werden exemplarisch Szenarien für den betrachteten Betriebsbereich vorgestellt.

Gesetz zum autonomen Fahren

Das Gesetz zum autonomen Fahren ermöglicht seit Juli 2021 den Regelbetrieb von Level-4-Systemen in Deutschland. Mit diesem Gesetz hat Deutschland international eine bedeutende Vorreiterrolle eingenommen. Mit dem Inkrafttreten der dazugehörigen Verordnung (Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-und-Betriebs-Verordnung, AFGBV) im Juli 2022 werden zudem erstmalig Vorgaben zur Zulassung von Level-4-Funktionen beschrieben. Beachtlich ist, dass im deutschen Gesetz explizit die Einhaltung der Standards ISO 26262, ISO 21448 sowie der ISO 22900 (Kommunikation im Fahrzeug) als Referenz für die Entwicklung nach dem Stand der Technik gefordert ist. Darüber hinaus wird an einigen Stellen auch auf die Anforderungen von geltenden UN-Regelungen (u.a. UN R155 zur Cybersicherheit oder UN R79 für Lenksysteme) verwiesen. Weitere Anforderungen gelten z.B. zur Datensicherheit nach der EU-Verordnung 2016/679 und damit der europäischen Datenschutzgrundverordnung (DSGVO).

Des Weiteren fordert die AFGBV die Einreichung eines dokumentierten Sicherheitskonzepts, in dem die durchgeführten Gefährdungsanalysen dargelegt sowie die identifizierten sicherheitskritischen Szenarien basierend auf den Analysen der ISO 21448 beschrieben sind. Die ISO 21448 adressiert Risiken, die aufgrund unzureichender Funktionalität oder in Interaktion mit dem menschlichen Fahrer entstehen, die bei den betrachteten Fehlfunktionen nach ISO 26262 nicht abgedeckt sind. [2]

Notwendigkeit des szenarienbasierten Testens und Einführung in die Methodik

Als weitere konkrete Vorgabe der AFGBV gilt, dass die Sicherheit des Systems anhand einer nachvollziehbaren und statistisch fundierten Wahl aus Szenarien und Testfällen nachzuweisen ist. Damit wird explizit der szenarienbasierte Testansatz gefordert. Ein System wird demnach als sicher betrachtet, wenn es eine festgelegte Menge an Szenarien und Testfällen erfolgreich bewältigt hat [3]. Methodisch wird zunächst die ODD anhand von funktionalen Szenarien beschrieben. In der logischen Szenariodefinition wird jedes funktionale Szenario durch Modellierungsparameter und deren Wertebereiche abstrahiert. Anschließend werden für jedes logische Szenario konkrete Parameterkombinationen, so genannte Testfälle, festgelegt, die dem zu testenden AD-Fahrzeug zur Bewertung seiner Sicherheit vorgelegt werden. [4–6]

Für den Anwendungsfall der Schiffsverladung ist zunächst in Abbildung 17 links die Strecke dargestellt. Auf dieser sollen Geschwindigkeiten bis 30 km/h gelten. Da es sich um einen öffentlichen Bereich handelt, sind verletzliche Verkehrsteilnehmer sowie nicht automatisierte Fahrzeuge präsent. Rechts sind ausgewählte Szenarien dargestellt, die im Betriebsbereich relevant sind. Für diese Szenarien werden im nächsten Schritt relevante Testfälle abgeleitet.

Abbildung 17: Strecke zur Schiffsverladung (links), ausgewählte relevante Szenarien innerhalb des Betriebsbereichs (rechts)

Insgesamt lässt sich abschließend festhalten, dass mit dem Gesetz zum autonomen Fahren oder der AFGBV zwar der gesetzliche Rahmen zur Zulassung geschaffen ist. Dennoch hat es bisher kein Fahrzeughersteller geschafft eine Zulassung für einen Regelbetrieb eines Level-4-Systems im Straßenverkehr zu erhalten. Folglich ist noch weitere Forschungsarbeit zum methodischen Nachweis der Sicherheit eines Fahrzeugs im Straßenverkehr notwendig.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nachfolgend sind wichtige Positionen des zahlungsmäßigen Verwendungsnachweises tabellarisch aufgelistet. Es ergaben sich in einzelnen Posten nur geringfügige Abweichungen gegenüber der ursprünglichen Planung, sodass insgesamt der Finanzplan eingehalten wurden

Positionsnummer	Positions-bezeichnung	Entstandene Ausgaben [€]	Geplante Ausgaben [€]
0812	Personalmittel Wiss. Mitarbeiter	530.038,21€	514.029,00€
0822	Sonst. Beschäft.-Entgelte	26.144,45€	27.735,00€
0843	Sonst. allg. Verwal-tungsausgaben	1.711,76€	5460,36€
0846	Dienstreisen	0,00 €	11.550,00€
0850	Gegenstände > 410 €	29.361,26€	27.638,34€
Summe:		587.255,68€	586.413,00€

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Innerhalb des Vorhabens hat – wie auch dem Kapitel 2 zu entnehmen ist – das Institut für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig Personalmittel für wissenschaftliches und sonstige Beschäftige verausgabt. Insgesamt wurden dabei auf Seiten des wissenschaftlichen Personals mit 87 PM geplant. Innerhalb des Projekts ergaben sich bzgl. der notwendigen Arbeitsaufwände nur geringfügige Abweichungen zur ursprünglichen Planung, weshalb lediglich geringe Anpassungen der Personalmittel notwendig waren.

Die wesentliche Mitarbeit der TUBS war dabei in den Arbeitspaketen AP2, AP3, AP4 und AP5 mit insgesamt 77 PM (wissenschaftliches Personal) verortet. Wie aus den in Kapitel 1 dargestellten Arbeiten und erzielten Ergebnissen deutlich wird, waren diese Mittel notwendig

um das ambitionierte Ziel – das selbstfahrende E-Fahrzeug in der Produktion und auf dem Werksgelände – zu erreichen.

Das Gesamtziel erforderte umfangreiche und vor allem vielfältige Arbeiten Seiten des wissenschaftlichen Personals. Diese reichten von Tätigkeiten des Projektmanagements über die Anforderungsanalyse und Recherche, konzeptionelle Arbeiten bis hin zu Hardware-nahen Arbeiten der Systemintegration und Vernetzung sowie Installationsaufgaben in der Infrastruktur. Arbeiten auf dem Gebiet der Fahrfunktionsentwicklung umfassten neben dem Algorithmendesign die Programmierung in verschiedenen Entwicklungsumgebungen (Simulation, RCP-Plattform, Robot Operating System und Simulink) sowie umfangreiche Realtestfahrten und die Auswertungen dieser Daten. Weiterhin wurde eine Simulationsumgebung zur Abschätzung der Energie- und Ladebedarfe entwickelt.

4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts E-Self hat die Technische Universität Braunschweig die erzielten Ergebnisse aus den Arbeitspaketen in allgemeingültige Erkenntnisse übertragen. Folgend sind die durchgeführten bzw. geplanten Verwertungen genauer beschrieben.

4.1 Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse

Als Hochschule verfolgt das Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig keine wirtschaftlichen Ziele bzw. Erfolge.

4.2 Technische Verwertung der Ergebnisse

Das Institut für Fahrzeugtechnik hat im Rahmen des Projektes ein Versuchsfahrzeug mit notwendiger Referenzsensorik für die Versuchsreihen erweitert und weitere bestehende Referenzsysteme eingesetzt. Damit wurden die bereits bestehenden Erfahrungen in der Evaluation autonomer Funktionen vertieft und erweitert. Auch die bestehenden Funktionalitäten von automatisierten Fahrfunktionen konnten innerhalb des Projekts umfangreich weiterentwickelt werden. Die neu entwickelten Funktionsbestandteile befähigen das Institut für Fahrzeugtechnik in Zukunft weitere Anwendungsfälle in Forschungsvorhaben zu adressieren und noch komplexere Algorithmen des automatisierten Fahrens zu entwickeln. Die im Rahmen von E-Self entwickelte Simulationsumgebung zur Energiebedarfsbestimmung wird in Folgevorhaben eingebracht und zur Betrachtung und Implementierung von Park&Charge-Funktionalitäten ertüchtigt. Die genannten Aspekte fließen aktuell in weiteren Forschungsvorhaben ein, wie dem vom BMBF geförderten Projekt RePro (16KISR015K), dem vom BMWK geförderten Projekt SUE (19A21047J) sowie dem EFRE-Projekt VEAL.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Im Kontext der wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit konnten durch das Projekt zentrale Erkenntnisse und eine vertiefte Expertise in der Zulassung und Zertifizierung autonomer Systeme, der Algorithmen-Entwicklung nach dem Stand der Forschung sowie der Energiebetrachtung beim Einsatz autonomer Systeme erlangt werden. Die Resultate des Projekts leisten daher einen Beitrag für die Lösung zukünftiger Forschungsfragen im Kontext der Etablierung autonomer Fahrsysteme. Eine Vielzahl einzelner Aspekte und entwickelter Module bietet darüber hinaus die Möglichkeit auch in anderen Umgebungen und Domänen wie dem AVP (automatisiertes Valet-Parken) oder auf gänzlich neuartige Versuchsträger („People Mover“, Level-5-Funktionalitäten) übertragen zu werden. Erkenntnisse aus den Entwicklungen fließen bereits in das vom BMBF geförderten Projekt RePro (16KISR015K), dem vom BMWK geförderten Projekt SUE (19A21047J) sowie dem EFRE-Projekt VEAL ein. Aufbauend auf dem Projekterfolg von E-Self wurde ein weiterer Projektantrag „Production2Road“ mit demselben Konsortium im Rahmen der BMWK-Förderausschreibung „Neue Fahrzeug und Systemtechnologien“ als Skizze eingereicht. Darüber hinaus werden die Erkenntnisse umfassend in mehrere Lehrveranstaltungen des Instituts für Fahrzeugtechnik

eingebracht (u.a. „Fahrerassistenzsysteme“, „Automatisiertes Fahren“ und „Maschinelles Lernen für das automatisierte Fahren“) und ergänzen dort einerseits bestehende Inhalte um neue Erkenntnisse, andererseits werden auch gänzlich neue Aspekte integriert. Zusätzlich wurden im Rahmen der Aktivitäten diverse Möglichkeiten für Studierende geschaffen, in diesen innovativen Themengebieten Abschlussarbeiten anzufertigen bzw. als Wissenschaftliche Hilfskraft zu partizipieren. Die Erkenntnisse bieten dabei weiterhin eine umfassende Grundlage für die Ausbildung von Doktoranden sowie die Anknüpfung zu zukünftigen Forschungsvorhaben, welche die Themenstellungen kontinuierlich weiterentwickeln und neue Felder erschließen.

5 Relevante F&E-Ergebnisse von dritter Seite

Es sind keine wichtigen aktuellen F&E-Ergebnisse Dritter im Verlauf der Projektlaufzeit identifiziert worden, die eine Anpassung des Projektplans erforderlich machten.

6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Seitens der Technischen Universität Braunschweig erfolgten mehrere Aktivitäten zur Verbreitung der Projektergebnisse. Insbesondere im Rahmen zweier Pressetermine am 05.04.2023 und 14.05.2024 wurden die Aktivitäten des Projektes der Öffentlichkeit (Fachpublikum sowie Presse) präsentiert. Zudem erfolgte die Verbreitung von Ergebnissen im Zuge wissenschaftlicher Veröffentlichungen auf internationalen Fachkonferenzen. Die textlichen Abhandlungen sind folgend aufgeführt:

- Kascha, Marcel. “Entwicklung einer Level-4-Funktion für das autonome Fahren“. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, eingereicht im Juli 2024.
- Kascha, Marcel; Xin, Kexu; Zou, Xingchi; Sturm, Axel; Henze, Roman; Heister, Laura und Oezberk, Sami. ”Monocular Camera Localization for Automated Driving“. In: 2023 IEEE 29th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). IEEE, 2023, S. 1–6. ISBN: 979-8-3503-2562-1. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/M2VIP58386.2023.10413439
- Sturm, A.; Kascha, M.; Mejri, M. A.; Henze, R.; Heister, L.; Mueck, A.: Automated Park and Charge: Energy demand calculation for production and public car parks. SAE Technical Paper 2024-01-2988, 2024, https://doi.org/10.4271/2024-01-2988.
- Sturm, A.; Kascha, M.; Mejri, M. A.; Henze, Jenzowsky, S.; Abel, S.; R.; Heister, L.; Mueck, A.: Automated Driving in Production (ADP): Concept, Implementation and further Potentials. 2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Jeju Island, Korea, Republic of, 2024, pp. 865-870, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/IV55156.2024.10588601.

Zudem sind weitere Veröffentlichungen geplant, die Erkenntnisse des E-Self-Projekts verwerten:

- Sturm, A. et. Al.: “A comprehensive study of automated park and charging in public car parks”

7 Literaturverzeichnis

[1] P. Seiniger and A. Weitzel, "Testverfahren für Verbraucherschutz und Gesetzgebung," in *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*, H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, and C. Singer, Eds.: Springer Vieweg Wiesbaden, 2015, pp. 167–182.

[2] P. Koopman, U. Ferrell, F. Fratrik, and M. Wagner, "A Safety Standard Approach for Fully Autonomous Vehicles," in *Computer Safety, Reliability, and Security: SAFECOMP 2019 Workshops, ASSURE, DECSoS, SASSUR, STRIVE, and WAISE, Turku, Finland, September 10, 2019, Proceedings*, A. Romanovsky, E. Troubitsyna, I. Gashi, E. Schoitsch, and F. Bitsch, Eds.: Springer Cham, Switzerland, 2019, pp. 326–332.

[3] H. Elrofai, J.-P. Paardekooper, E. de Gelder, S. Kalisvaart, and O. Op den Camp, *StreetWise: Scenario-Based Safety Validation of Connected and Automated Driving*. Whitepaper. [Online]. Available: https://www.tno.nl/en/focus-areas/traffic-transport/expertise-groups/research-on-integrated-vehicle-safety/scenario-based-safety-validation-for-connected-and-automated-driving/ (accessed: Sep. 17 2023).

[4] S. Thal, *International harmonisierte Testszenarien für das automatisierte Fahren,* 1st ed. Düren: Shaker, 2024.

[5] H. Hungar, "Scenario-Based Validation of Automated Driving Systems," in *Lecture Notes in Computer Science, Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Distributed Systems*, T. Margaria and B. Steffen, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 449–460.

[6] T. Menzel, G. Bagschik, and M. Maurer, "Scenarios for Development, Test and Validation of Automated Vehicles," *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Changshu, China*, pp. 1821–1827, 2018, doi: 10.1109/IVS.2018.8500406.