

# autoMoVe

## Dynamisch konfigurierbare Fahrzeugkonzepte für den nutzungsspezifischen autonomen Fahrbetrieb

Lars Everding | Louisa Krüger | Thomas Vietor |  
Torben Hegerhorst | Roman Henze | Christian Raulf

Der EFRE-Innovationsverbund autoMoVe beschäftigte sich mit der Entwicklung autonomer, dynamisch konfigurierbarer Fahrzeugkonzepte. Hierzu haben sich Wissenschaftler\*innen der TU Braunschweig, der TU Clausthal sowie der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften zusammengeschlossen. Während der Projektlaufzeit wurden Methoden und Werkzeuge für die domänenübergreifende Entwicklung innovativer Fahrzeugkonzepte sowie erste eigene Fahrzeugkonzeptvarianten erarbeitet und getestet.

### Einleitung und Motivation

In Deutschland werden Privatfahrzeuge täglich nur etwas mehr als eine Stunde genutzt (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2018). In der verbleibenden Zeit könnten hoch-modular und dynamisch anpassbar gestaltete Fahrzeuge logistische Aufgaben erfüllen und beispielsweise Lieferdienstfahrten übernehmen. Weitere Anwendungen sind das Car- oder Ridesharing, wodurch die zunehmende Verkehrsdichte, besonders in urbanen Lebensräumen, langfristig reduziert werden kann. Diese On-the-Road Modularisierungsstrategien werden bis heute allerdings noch unzureichend behandelt und sonst lediglich bei einzelnen Komponenten im Bereich der Produktion angewandt. Aktuell vorherrschende Trends für die Automobilindustrie wie die Elektrifizierung, das autonome Fahren oder auch die Vernetzung mit der Umwelt (vgl. z. B. CASE von Mercedes oder eassy von PWC) bestärken die Entwicklung von solch neuen und innovativen Fahrzeugen und könnten einen substanzuellen Wandel für die Industrie bedeuten.

Mit diesem Sachverhalt beschäftigte sich der EFRE-Innovationsverbund autoMoVe, bestehend aus Instituten der TU Braunschweig, der TU Clausthal und der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften. Das gesetzte Ziel bestand darin, ein autonomes, hochmodularisiertes sowie dynamisch konfigurierbares Fahrzeugkonzept zu entwickeln, welches den genannten Trends und Möglichkeiten in Zukunft gerecht werden kann. autoMoVe wurde als Digitalisierungs-

projekt im ZDIN Zukunftslabor Mobilität angemeldet. Die Laufzeit des Projekts belief sich auf drei Jahre und drei Monate (1. April 2019 bis 30. Juni 2022).

Aus dem domänenübergreifenden interdisziplinären Charakter ergeben sich Herausforderungen bei der Entwicklung solch komplexer Systeme: Komponenten (Soft- und Hardware) müssen bestimmten Sicherheitsstandards gerecht werden und dementsprechend möglichst früh auf Funktionalität und Fehleranfälligkeit geprüft werden. Hierzu bieten sich vor allem virtuelle Simulationsplattformen an. Zudem liegen Innovationszyklen von Soft- und Hardware teilweise stark auseinander, müssen jedoch stets aufeinander abgestimmt sein. Aufgrund der sich stetig verkürzenden Entwicklungszeiten für Produkte müssen die Bausteine des Systems anpassbar gestaltet werden. Vor allem wenn ein Fahrzeugkonzept im Betrieb konfigurierbar sein soll, ist ein modularer Ansatz sowohl für die Soft- als auch für die Hardware notwendig. Der Einfluss künstlicher Intelligenz auf das intelligente autonome Fahren stellt einen neuartigen Faktor in der zukünftigen Fahrzeugauslegung dar und ist ein Schlüssel bei der Realumsetzung angepasster Konzepte. Abbildung 1 veranschaulicht die Eigenschaften der Fahrzeugkonzepte, welche im Forschungsprojekt autoMoVe entwickelt werden sollen.

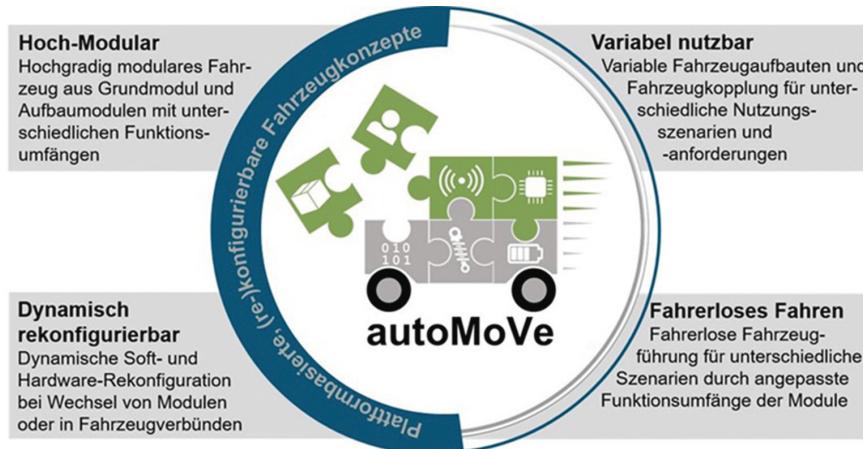


Abb. 1: Charakteristik der Fahrzeugkonzepte in autoMoVe (Eigene Darstellung).

## Die Projektbeteiligten

Um diesen Herausforderungen begegnen zu können, wurde ein Team aus vier Verbundpartnern mit sich ergänzenden Fachgebieten zusammengestellt. Dazu zählen das Institut für Konstruktionstechnik (IK) und das Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) der TU Braunschweig, das Institut for Software and Systems Engineering (ISSE) der TU Clausthal sowie das Institut für Mechatronik (IMec) mit der

Fachgruppe für Regelungstechnik & Fahrzeugmechatronik der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften.

Unterstützt wurden die Verbundpartner durch 14 weitere Kooperationspartner. Das IfF und das IK arbeiteten über Jahre hinweg mit Formherr Industriedesign, der Rapid Leichtbau GmbH oder auch der Automotive Agentur Niedersachsen zusammen und wurden von ITS Mobility bei der Veröffentlichung von Forschungsergebnissen unterstützt.

Das IMec erhielt durch die IAV GmbH Erfahrungen und Anforderungen aus der Praxis, die in Anwendungsfälle und die Fahrzeugarchitektur eingebunden wurden. Bei der Konzeption der elektronischen und informationstechnischen Schnitt- und Leitstelle setzte der Verbundpartner Lapp GmbH an, ergänzt durch die Arbeit der Pepperl + Fuchs Vertrieb Deutschland GmbH im Bereich der Sensorik. Die Wirtschafts- und Innovationsförderung der Stadt Salzgitter (WIS) hat das Ziel, zur Verbesserung der Grundlagen für die wirtschaftliche Entwicklung der Region beizutragen und zukunftsorientiert Arbeitsplätze zu erhalten. Dieses Netzwerk hat einen großen Mehrwert beim Aufbau eines Technologiebaukastens und der Kompetenzlandkarte beigetragen und erhielt im Gegenzug dafür eine nachhaltige Stärkung der Region. Darüber hinaus wurde auch das Netzwerk des VDI Braunschweiger Bezirksverein e. V. genutzt, um Ansprechpartner\*innen aus verschiedenen Bereichen der Wirtschaft zusammenzuführen und eine umfangreiche Basis an möglichen Szenarien aufzubauen. Bei der Szenarienbewertung und der Erarbeitung praxisnaher Modularisierungsstrategien wurde die Kompetenz der Sandmann Innovation GmbH eingebracht, welche auch bei der Erarbeitung individueller Lösungen im Rahmen des Informationsaustauschs hilfreich war. Da sie besonders im Bereich von HiL-Prüfständen eine große Expertise aufweist, hat sie bei der Realisierung ausgewählter Funktionsträger und Prüfstandversuche signifikant zur Validierung beigetragen.

Die Verbundpartner der ISSE waren zum einen die pdv-software GmbH, welche sich an verschiedenen Workshops zur Definition von Anwendungsszenarien aus dem regionalen Umfeld für dynamisch konfigurierbare autonome Fahrzeuge beteiligte, zum anderen die NORDSYS GmbH, welche sich besonders bei der Entwicklung von Use Cases und der Anforderungserhebung zur Realisierung der dynamisch konfigurierbaren autonomen Fahrzeuge einbrachte.

## Vorgehensweise im Projekt

Die Gesamtkoordination des EFRE-Innovationsverbundes autoMoVe erfolgte unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor, der nicht nur das IK leitet, sondern auch als Vorstandssprecher des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik (NFF) agiert.

## Arbeitspaket 1: Charakterisierung erforderlicher Technologien für den autonomen Fahrbetrieb und Erstellung einer Kompetenzlandkarte

Das erste Arbeitspaket (AP1) beschäftigte sich mit der Charakterisierung erforderlicher Technologien im autonomen Fahrbetrieb und der Erstellung einer regionalen Kompetenzlandkarte. Die Grundlage zu AP1 bildete eine umfassende Recherchearbeit. Bei dieser wurden in einem ersten Schritt sowohl eingesetzte Technologien als auch Forschungsansätze untersucht. Dabei wurden thematisch die Schwerpunkte »Elektronische Fahrzeugmanagementsysteme«, »Batterie- und Energiemanagement«, »Automatisierte Fahrzeugführung«, »Hard- und Software für autonomes Fahren«, »Rechtliche Grundlagen«, »Künstliche Intelligenz und Algorithmen«, »Car2X« sowie »Softwarearchitektur und Middleware« untersucht. Die Partner konnten hierbei die jeweiligen Expertisen aus den verschiedenen Forschungsbereichen effektiv einbringen und diskutierten die Ergebnisse anschließend gemeinsam intensiv im Konsortium. Aus der Zusammenarbeit von IMec und IfF konnten erforderliche Technologien, infrastrukturelle und weitere Rahmenbedingungen sowie mögliche Dienstleistungen für einen autonomen Fahrbetrieb abgeleitet werden. Anschließend wurden die gesammelten Ergebnisse charakterisiert und in einem Technologiebaukasten festgehalten. Innerhalb dieses Baukastens erfolgte die Einteilung auf unterschiedlichen Hierarchieebenen. Es wurden zudem potenziell passende Partner aus den Bereichen Fahrzeug- oder Technologiehersteller, Gesetzgebung, Forschungseinrichtungen und Entwicklungsunternehmen aus Niedersachsen identifiziert und in den Technologiebaukasten an geeigneter Stelle integriert. Im Anschluss daran wurde eine Datenbank zur Organisation der Thematik des automatisierten Fahrens in der Region Niedersachsen entwickelt. Diese diente wiederum als Grundlage, um eine sogenannte Kompetenzlandkarte zu erstellen.

Nach initialen Arbeiten durch das ISSE wurde in Kooperation mit dem IMec eine Software zur automatisierten Generierung einer interaktiven Kompetenzlandkarte auf einer OpenStreetMap entwickelt, welche die ausschließliche Darstellung der Daten beispielsweise um interaktive Filtermöglichkeiten erweitert. Sowohl der Technologiebaukasten als auch die Kompetenzlandkarte sollten helfen, den Status quo in Niedersachsen zum autonomen Fahren abzubilden und Lücken zu identifizieren, an denen sich Weiterentwicklungen anbieten. Diese Tools sind als »lebendig« anzusehen und bedürfen einer ständigen Überarbeitung bzw. Aktualisierung.

## **Arbeitspaket 2: Szenarioentwicklung und -bewertung autonom fahrender rekonfigurierbarer Fahrzeuge**

Das zweite Arbeitspaket (AP2) beschäftigte sich mit der Szenarioentwicklung und -bewertung autonom fahrender, rekonfigurierbarer Fahrzeuge. Dafür wurden zunächst domänenspezifische Begrifflichkeiten diskutiert und in einem gemeinsamen Glossar erfasst, um eine einheitliche Verständnisgrundlage zu schaffen. Ausgehend von den Recherchen in AP1 wurden Anwendungsfälle (Use Cases) und Zukunftsszenarien ermittelt, die das autonome Fahren mit einer Anpassbarkeit an unterschiedliche Bedarfe fokussierten. Soft- und Hardware müssen für diesen Zweck einer Rekonfiguration der autonomen Fahrfunktionen und den damit einhergehenden Funktionalitäten im Betrieb gerecht werden. Durch die Use Cases wurden Systemumgebungen als System of Interest (SoI) beschrieben sowie jeweils die infrastrukturellen, soziokulturellen, räumlichen und zeitlichen Randbedingungen dargestellt, unter denen die jeweiligen Stakeholder untereinander interagieren. Zur Beschreibung der Zukunftsszenarien wurde die Grundlage der Szenario-Technik in abgewandelter Form angewandt. Die Übertragung dieser Methode in die Bereiche des Model-Based Systems Engineering (modelbasiertes Vorgehen des Systems Engineering, MBSE) konnte im Rahmen der Veröffentlichung »An Approach to Complement Model-Based Vehicle Development by Implementing Future Scenarios« publiziert werden (Raulf et al. 2021a). Auch die verschiedenen Partner recherchierten noch tiefergehend zu dem Themenbereich des APs und tauschten sich bei einem Workshop 2019 am NFF diesbezüglich aus. In einem vom IK geleiteten Workshop wurden mithilfe der Methoden des Design Thinking und der Erstellung sogenannter Personas die zukünftigen Anwendungsfälle analysiert, identifiziert und weiterentwickelt.

Darüber hinaus wurden auch Studierende im Rahmen von Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten in das Projekt eingebunden und konnten so einerseits Einblicke in die Forschungspraxis erhalten und andererseits selbst Inhalte in das Projekt einbringen. So wurden mithilfe studentischer Arbeiten bestehende Fahrzeugkonzepte miteinander verglichen, um in einem ersten Schritt die Relevanz der Einsatzbereiche abzuleiten. In einem zweiten Schritt wurden die Stakeholder für derartige Fahrzeuge identifiziert und in Form von Persona-Steckbriefen dokumentiert. Für drei ausgewählte Personas wurde die typische Nutzung in Form von Userstories ausgearbeitet. Mithilfe dieser Erkenntnisse konnten die detaillierten Use Cases sowie Stakeholder-Anforderungen auch in der grafischen Modellierungssprache SysML des MBSE erfasst werden. Dabei stellten sich die Anwendungsfälle »Personenschuttle« und »Gütertransport KEP-Dienst« (KEP = Kurier-Express-Paket Dienst) als relevant heraus, was sich auch mit vergleichbaren Industrieprojekten der Konzeptrecherche, wie beispielsweise dem Rinspeed Snap oder dem Daimler Vision Urbanetic deckt (Raulf et al. 2021b). In einem wei-

teren Workshop 2020 wurden die Zukunftsszenarien und Anwendungsfälle weiter diskutiert und systematisch verfeinert. Eine mögliche Fahrzeugkonfiguration ist die Vision eines NFF-Shuttles, welches als autonomer Personentransporter fungiert. Nach eindeutigen Beschreibungen und festgelegten Bewertungskriterien konnten Priorisierungen durchgeführt werden. Anforderungen und Einschränkungen wurden im Zuge dieser Arbeiten ebenfalls ermittelt. Diese dienten als Ausgangspunkt für die nachfolgenden Arbeiten in AP3. In studentischen Arbeiten wurde noch der Anwendungsfall des NFF-Shuttles, welcher das NFF mit dem Hauptcampus der TU Braunschweig verbindet, detaillierter ausgearbeitet. Zudem wurde eine Methode entwickelt, die eine Harmonisierung verschiedenster Anwendungsfälle auf ein und derselben Plattform über einen 24-Stunden-Zyklus ermöglicht (Minol 2020).

### **Arbeitspaket 3: Fahrzeugkonzeption und Modularisierungsstrategien für das Gesamtfahrzeug**

Ausgehend von den Ergebnissen aus AP1 und AP2 wurden in AP3 die Fahrzeugkonzeption und die Modularisierungsstrategien für das Gesamtfahrzeug ausgearbeitet. Dabei wurden Anforderungspakete und Spezifikationen einzelner Fahrzeugkonfigurationen definiert. Das Gesamtfahrzeugsystem wurde im Sinne des Systems Engineering in einzelne Ebenen (Systems of Systems bis Komponentenebene) und Perspektiven (Anforderungen, Funktionen, Struktur) unterteilt. Des Weiteren wurden kundenrelevante Funktionen (z. B. ergonomische Anforderungen) sowie technische Funktionen (z. B. Fahrfunktionen) abgeleitet. Die ermittelten Funktionen wurden wiederum mit sinnvollen Sub-Systemen und Komponenten sowie Teillösungen einzelner Entwicklungsdomänen verknüpft. Damit konnte eine ganzheitliche Beschreibung des Fahrzeugkonzepts erreicht werden. Daraus ergab sich eine Modularisierungsstrategie, welche letztlich das Ziel verfolgte, ein Grundmodul (Fahrmodul) zu entwickeln, welches mit weiteren Aufbaumodulen zu einem Gesamtfahrzeug ertüchtigt werden kann. Diese Aufbaumodule sollten sich je nach Bedarf eines Anwendungsfalles dynamisch zur Laufzeit austauschen lassen. In zwei Workshops mit den Projektbeteiligten wurden am NFF die Systemarchitektur und die Systemmodellierung thematisiert. Schwerpunkte lagen auf der Ableitung von notwendigen Komponenten von Grundmodul und Aufbaumodulen. Außerdem wurde mit Hilfe von MBSE die allgemeine modellbasierte Beschreibung des Systems bearbeitet, um alle Anforderungen, Komponenten und deren Verbindungen und Beziehungen zueinander darzustellen. Das übergreifende Systemmodell in MBSE vereinte letztlich alle relevanten Informationen für die Konzeption und die Entwicklung sowie für die funktionsorientierte Modularisierungsplattform und dient als Ent-

wicklungsplattform für alle Projektbeteiligten (Şahin et al. 2021). Zur Entwicklung innovativer Fahrwerkskonzepte sind nach einer Recherche grundlegende Regeln für das Fahrwerk des angestrebten Fahrzeugkonzepts erarbeitet worden. Das Fahrwerkskonzept sollte die Möglichkeit einer Höhenverstellung umfassen, weshalb sich für die Anwendung eines Luftfahrwerkes entschieden wurde. Diese sind in der Lage, sich verändernde Zuladungen auszugleichen. Weiterhin wurde ein flach aufbauendes Fahrwerk mit Anwendung von Doppelquerlenker-Achsen gewählt, um auf Seiten des Packaging die Flexibilität zu steigern.

Bei der Entwicklung eines Gesamtfahrzeugkonzepts namens »NFF-Peoplemover« wurden verschiedene Benchmark-Analysen durchgeführt und ein Strukturkonzept aufgestellt, um einen Einsatz als Personenshuttle am NFF zu ermöglichen. Unter Berücksichtigung von bestehenden modularen Fahrzeugen und einer Untersuchung von idealen Laderaumgrößen für bestehende Transportbehälter (Standardeinheiten wie EURO-Palette etc.) wurden vier Fahrzeugvarianten entwickelt (Koch 2020, 2021).

Parallel dazu beschaffte das IfF eine autonome Fahrzeugplattform namens PLUTO, woraus sich veränderte Randbedingungen hinsichtlich des Gesamtfahrzeugaufbaus und -packages ergaben, wodurch der Lösungsraum stärker konvergierte. Die Gesamtabmessungen des Konzepts wurden geringfügig an die der PLUTO angepasst und ein kompatibles Wechselkonzept nach der Idee eines autonomen Grund- und Aufbaumoduls bestimmt.

#### **Arbeitspaket 4: Modulare Softwarearchitekturen und rekonfigurierbare Fahrzeugsysteme**

Das vierte Arbeitspaket (AP4) beschäftigte sich mit modularer Softwarearchitektur für rekonfigurierbare Fahrzeugsysteme. Aufgrund der Komplexität von automatisierten Fahrfunktionen und Fahrsystemen ist eine Strukturierung und Zergliederung in Teilsysteme notwendig. Zwischen den beteiligten Teilsystemen wird eine eindeutige Definition von Schnittstellen erreicht, welche die Entwicklung und das Testen dieser Systeme erleichtert und für den interdisziplinären Entwicklungsprozess im Verbundprojekt notwendig ist. Nach dem Top-Down-Verfahren ist zunächst die Informationsverteilung im elektronischen Fahrzeugmanagement ermittelt worden, wobei notwendige Funktionalitäten für das autonome und elektrische Fahren identifiziert wurden. Für die Ermittlung von Schnittstellen für intelligente Telfunktionen wurden Gespräche mit den beteiligten Partnern aus dem Projektverbund geführt. Die einzelnen Komponenten wurden letztlich in eine hierarchische Struktur eingeordnet. Das ISSE verantwortete die Entwicklung dieser Softwarearchitektur, welche zur Laufzeit rekonfigurierbar gestaltet worden ist und somit der Grundidee des Fahrzeugkonzeptes entspricht. Ebenfalls

beinhaltet diese Architektur die dynamisch anpassbare Middleware nach ISSE-eigenem Ansatz namens »DAiSI« sowie auch ROS2. Des Weiteren wurde der Einsatz des geplanten Sicherheitskonzeptes (Dependability Cage = Komponente, welche die Zuverlässigkeit/Stabilität prüft) für die Softwarekomponenten im autonomen Fahrbetrieb in der Architektur berücksichtigt. Der Dependability Cage ist notwendig, um auf nicht planbare Situationen im autonomen Fahrbetrieb reagieren und diese anschließend in Verbindung mit einem Kontrollzentrum (Kommandozentrale) computergesteuert lösen zu können. Für die Umsetzung der autonomen Fahrfunktionen wurde vom IfF, ausgehend von der PLUTO Plattform, eine modulare Funktionsarchitektur erarbeitet, in der alle funktionsrelevanten Aspekte eingegliedert werden können. Fahrzeug- und Sensorebene, Umfeldmodell, Bewegungsplanung sowie Regelung und Aktorik konnten hiermit adressiert werden. Zur Betrachtung der CAD-Schnittstellen wurde die Übergabe/Konvertierung der CAD-Daten aus dem Konstruktionsprogramm CATIA V5-6 sowie der Daten aus dem Designprogramm Rhinoceros, in die Virtual Reality Umgebung Unity als Testumgebung der ersten Konzeptideen überprüft.

### **Arbeitspaket 5: Virtuelle Entwicklungs- und Simulationsplattform**

Innerhalb des Projektverbundes wurden verschiedenste Entwicklungswerkzeuge und -umgebungen für die einzelnen Fachdisziplinen genutzt. Aus diesem Grund sollte in AP5 eine domänenübergreifende virtuelle Entwicklungs- und Simulationsplattform für alle Partner geschaffen werden. Im Einzelnen wurden Werkzeuge (Tools) wie MATLAB/Simulink, CATIA V5-6, Unity oder auch dSpace und CarMaker eingesetzt. Basierend auf der autonomen Plattform PLUTO wurde ein Simulationsmodell erzeugt und validiert, welches für die simulationsgestützte Entwicklung von automatisierten Fahrfunktionen genutzt werden kann. Weiterhin wurde die Realumgebung durch die Einbindung einer digitalen Karte – welche eine maßgebliche Informationsquelle des automatisierten Fahrsystems ist – in der Simulation abgebildet. Im November 2020 wurde dann vom ISSE die Simulationsplattform in einem Metamodell weiterentwickelt, sodass die domänenspezifischen Modelle reibungslos in diese Plattform integriert werden konnten. Danach konnten Simulationen durchgeführt werden, in denen die beteiligten Modelle untereinander kommunizieren. Damit wurde eine gemeinsame Basis geschaffen. Diese Modelle konnten anschließend in ein übergreifendes Systemmodell übertragen werden. Die Daten ließen sich daraufhin in den Closed-Loop-Fahrtsimulator der Ostfalia als Teil der virtuellen Entwicklungs- und Simulationsplattform implementieren, auf deren Basis wiederum autonome Fahrfunktionen unter Echtzeitbedingungen simuliert und abgesichert werden konnten. Die Simulationsplattform wurde begleitend zum Arbeitspaket

6 iterativ zur Validierung und Optimierung der Fahrzeugfunktionen eingesetzt und ist für die Realisierung von Funktionsträgern im Arbeitspaket 7 kompatibel zu weiteren Untersuchungen bzw. Tests. Die Qualität der Lösungen konnte dadurch stetig erhöht werden.

### **Arbeitspaket 6: Virtuelle Entwicklung eines modularen Fahrzeugkonzeptes für unterschiedliche Anwendungsfälle**

Konkret beschäftigt sich das Arbeitspaket 6 (AP6) mit der virtuellen Entwicklung eines modularen Fahrzeugkonzepts, dem NFF-Peoplemover, welches für unterschiedliche Anwendungsfälle zum Einsatz kommen kann (Abb. 2).



Abb. 2: Fahrzeugkonzept NFF-Peoplemover und Paketstation in VR-Darstellung (Eigene Darstellung).

Dabei wurden die zugehörigen Systeme für die autonomen Fahrfunktionen und auch Regelungen für Sicherheit und Fahrdynamik ausgearbeitet. Intelligente Fahrzeugfunktionen steuern das Batteriemanagement, das prädiktive Energie- management und die Betriebsstrategie, Schnittstellen zu Umwelt-, Navigations- und V2X-Dateien, intelligente Algorithmen oder auch das prädiktive elektronische Fahrzeugmanagement. Wichtig war an dieser Stelle, dass die Rekonfigurierbarkeit des Konzepts auf Soft- und Hardwareebene zu jeder Zeit realisierbar blieb. Das NFF-Peoplemover-Konzept konnte in CAD aufgebaut und in ein VR-System übernommen werden. Das an dem Anwendungsfall ausgerichtete Aufbaumodul wurde an die Pluto-Plattform als Grundmodul angepasst. Zusätzlich wurde ein weiteres Aufbaumodul für den Pakettransport als mobile Paketstation ausgearbeitet. Um notwendige Sicherheits- und Fahrdynamikregelfunktionen realisieren zu können, wurde ein Torque Vectoring-System im Grundmodul integriert. Durch simulative Untersuchungen am validierten Modell der Fahrplattform konnte dabei gezeigt werden, dass gewünschte Vorgaben mit diesem Konzept erreicht werden. Die zugehörigen Ergebnisse wurden in der ATZ 12/20 veröffentlicht (Raulf et al. 2020).

## Arbeitspaket 7: Realisierung ausgewählter Funktionsträger und Prüfstandsversuche zur Validierung

Arbeitspaket 7 (AP7) thematisiert die Realisierung von ausgewählten Funktionsträgern sowie Prüfstandsversuche zur Validierung der Ergebnisse aus dem Projekt. Dafür standen Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfstände wie der Closed-Loop-Fahrtsimulator der Ostfalia oder auch ein flexibel konfigurierbares HiL-System zur Verfügung, um Optimierungspotenziale der Funktionsträger wie beispielsweise intelligente Algorithmen zu identifizieren. Für die digitale Entwicklung des Gesamtfahrzeugkonzepts wurde die PLUTO-Plattform digital abgebildet. Konstruktionsseitig lagen für diesen Zweck umfangreiche CAD-Modelle durch den Hersteller der Plattform Hanseatische Fahrzeug Manufaktur (HFM) vor. Das fahrdynamische Fahrzeugverhalten im Hinblick auf die Aktorik-Reaktionen bei Ansteuerung durch ein Automatisierungssystem wurde ebenfalls modelliert. Dafür wurde die Simulationssoftware CarMaker der Firma IPG eingesetzt. Ziel war es, das Fahrzeugverhalten realitätsnah abzubilden, um eine möglichst realistische digitale Entwicklung der Fahrfunktionalitäten zu erlauben. Die PLUTO-Plattform wurde in dieser Zeit zum automatisierten Fahren ertüchtigt, sodass die entwickelten Funktionalitäten in Realität erprobt werden konnten. Als Schritt zwischen der simulationsgestützten Entwicklung (SiL) und der Realimplementierung (ViL) auf der Fahrplattform wurde zudem ein Echtzeitsystem für die Anwendung im Büro beschafft und in die Toolkette integriert (HiL). Um eine kosteneffiziente und frühzeitige virtuelle Validierung umzusetzen, wurden Teile der Plattform in abstrahiert physischer Form als Modelle aufgebaut und dann mit virtuellen Bildern und Virtual Reality Technologien (VR) überlagert. Für die Umsetzung der VR-Prüfstandversuche, die der Validierung der Innenraumkonzepte des Fahrzeugmoduls für den Personentransport dienten, erfolgte der Aufbau der erforderlichen Mixed Reality Infrastruktur in einem zugehörigen Labor am NFF. Die Ergebnisse der VR-Untersuchungen und einer eigens entwickelten Methode zu deren Erstellung wurden im Rahmen des 22. Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik veröffentlicht (Everding et al. 2022).

## Arbeitspakte 8 und 9: Durchführung von Fallstudien zur Erprobung des Gesamtsystems und Öffentlichkeitsarbeit

Fallstudien zur Untersuchung des entwickelten Gesamtsystems wurden in Arbeitspaket 8 (AP8) untersucht. Es wurden mithilfe von Proband\*innentests in einem Mixed Reality Testaufbau im VR-Labor des NFF Versuche zur Konzeptvalidierung durchgeführt. Ziel war es, das entwickelte Interieur-Konzept des NFF-Peoplemovers zu validieren, um darauf aufbauend weitere Optimierungen vornehmen zu können. Aus den Versuchen konnten wertvolle Erkenntnisse hin-

sichtlich der Vertrauensbildung der Insassen abgeleitet werden. Weiter wurden die intelligenten Fahrfunktionen anhand von Anwendungsszenarien aus AP2 in der entwickelten Simulationsplattform (AP5) getestet. Die Anwendungsszenarien richteten sich dabei an den Personen- und Gütertransport. Kritische Manöver wie Notbremsen, Ausweichen und Überholen wurden ebenfalls untersucht. Anhand der Ergebnisse der Simulationen konnten die Algorithmen nach definierten Kriterien bewertet werden. Die Fähigkeiten des Dependability Cage aus AP4 konnten mit Hilfe der Fahrzeugplattform PLUTO in der Realität demonstriert und anschließend bewertet werden. Zudem wurden die Softwarekomponenten in der virtuellen Simulationsplattform untersucht. Besonders das Szenario der Rekonfiguration einzelner Komponenten zur Laufzeit stand hier im Fokus. Die Algorithmen zur Pfadplanung (AP6) konnten ebenfalls erfolgreich getestet werden. Dies erfolgte sowohl auf der Hardware- (Software)-umgebung im Büro als auch auf dem Fahrzeug in der Realität. Als reale Testumgebung diente dabei der Campus Nord der TU Braunschweig. Die erarbeitete Mixed Reality Plattform konnte abschließend noch um eine zusätzliche Umweltsimulation erweitert werden. Darüber hinaus konnte das Konzept der mobilen Paketstation in die virtuelle Welt und die VR-Simulation implementiert werden. Das Ergebnis wurde den Teilnehmer\*innen des Abschlussevents am 30. Juni 2022 live aus der virtuellen Realität präsentiert.

Parallel zur Bearbeitung der vorgestellten Arbeitspakete erfolgten diverse nationale und internationale Publikationen und Tagungsteilnahmen im Rahmen des Innovationsverbunds.

## Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch den Innovationsverbund autoMoVe wichtige Methoden und Werkzeuge für die domänenübergreifende Entwicklung innovativer Fahrzeugkonzepte erarbeitet wurden. Die Identifikation der erforderlichen Technologien sowie die Verortung der entsprechenden regionalen Kompetenzen in Form eines Technologiebaukastens und einer Kompetenzlandkarte stellen initiale Ergebnisse der Aktivitäten dar. Dabei wurden im Speziellen die Kompetenzen der regionalen Zulieferer und Entwicklungsdienstleister aus Niedersachsen einbezogen. Damit stehen zukünftig zwei wertvolle Tools für die Entwicklung autonomer Fahrzeuge zur Verfügung.

Die Identifikation eines breiten Felds an Anwendungsfällen für den Einsatz dynamisch konfigurierbarer autonomer Fahrzeuge erfolgte im weiteren Verlauf des Projektes. Bei der Ausgestaltung konkreterer Aufbaumodule wurde der Fokus jedoch auf den Anwendungsfall des Personentransports (NFF-People-

mover) sowie den Gütertransport (Mobile Packstation) gelegt. Die domänenübergreifende Entwicklung stellte Entwickler\*innen vor diverse Herausforderungen. Innerhalb der einzelnen Bereiche kommen verschiedenste Modelle zum Einsatz, deren Verknüpfung untereinander sowie die konsistente Datenübergabe wesentliche Herausforderungen darstellten.

Die Wissensgrundlage bot ein MBSE-Systemmodell mit iterativem Charakter, um neue Einflussfaktoren jederzeit identifizieren und das Modell entsprechend aktualisieren zu können. Um eine bestmögliche Koppelung der domänen spezifischen Modelle mit diesem Systemmodell sicherzustellen, wurden in Abhängigkeit von der Entwicklungsaufgabe sinnvolle Schnittmengen ermittelt.

Aus den Erfahrungen im Verbund autoMove lassen sich Bedarfe zur Optimierung und Automatisierung von Validierungs-, Verifikations- und Zulassungsprozessen ableiten. Zur konkreten Umsetzung autonomer Fahrfunktionen im regulären Straßenverkehr bestehen nach wie vor umfassende Forschungsbedarfe. Ein möglicher Ansatz ist hierbei die weitergehende Verlagerung dieser Prozesse hin zu virtuellem Entwickeln und Testen.

## Literatur

- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV) (2018): Mobilität in Deutschland – MiD. Ergebnisbericht. Unter Mitarbeit von infas, DLR und IVT Research. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Bonn. Online verfügbar unter [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile). Zugegriffen: 12.10.2023.
- Everding, L.; Raulf, C.; Klapprott, M.; Vietor, T. (2022): User-Oriented Development of Autonomous Vehicles using Immersive Visualization Tools. In: Michael Bargende, Hans-Christian Reuss und Andreas Wagner (Hg.): 22. Internationales Stuttgarter Symposium. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Proceedings), S. 112–124.
- Koch, M. (2020): Entwicklung eines modularen und wechselbaren Fahrzeugaufbaus für den Personentransport. Masterarbeit. TU Braunschweig, Braunschweig. Institut für Konstruktionstechnik.
- Koch, M. (2021): Entwicklung eines modularen und wechselbaren Fahrzeugaufbaus für den Personentransport. Studienarbeit. TU Braunschweig, Braunschweig. Institut für Konstruktionstechnik.
- Minol, L.-M. (2020): Methodische Entwicklung eines Modells zur Harmonisierung von Anwendungen modular aufgebauter, autonom fahrender Mobilitätsträger. Masterarbeit. TU Braunschweig, Braunschweig. Institut für Konstruktionstechnik.
- Raulf, Christian; Pethe, Chris; Vietor, Thomas; Henze, Roman (2020): Dynamisch konfigurierbare Fahrzeugkonzepte für das autonome Fahren. In: ATZ Automobiltech Z 122 (12), S. 46–51. DOI: 10.1007/s35148-020-0353-z.

- Raulf, C.; Proff, M.; Huth, T.; Vietor, T. (2021a): An Approach to Complement Model-Based Vehicle Development by Implementing Future Scenarios. In: WEVJ 12 (3), Artikel 97. DOI: 10.3390/wevj12030097.
- Raulf, C.; Yarom, O. A.; Zhang, M.; Hegerhorst, T.; Şahin, T.; Vietor, T. et al. (2021b): auto-MoVe – Dynamisch konfigurierbare Fahrzeugkonzepte für den nutzungsspezifischen autonomen Fahrbetrieb. In: Heike Proff (Hg.): Making Connected Mobility Work. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 167–187.
- Şahin, T.; Raulf, C.; Kızgın, V.; Huth, T.; Vietor, T. (2021): A Cross-domain System Architecture Model of Dynamically Configurable Autonomous Vehicles. In: Michael Bargende, Hans-Christian Reuss und Andreas Wagner (Hg.): 21. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Proceedings), S. 13–31.



© Lars Everding | Louisa Krüger | Thomas Vietor | Torben Hegerhorst | Roman Henze | Christian Raulf