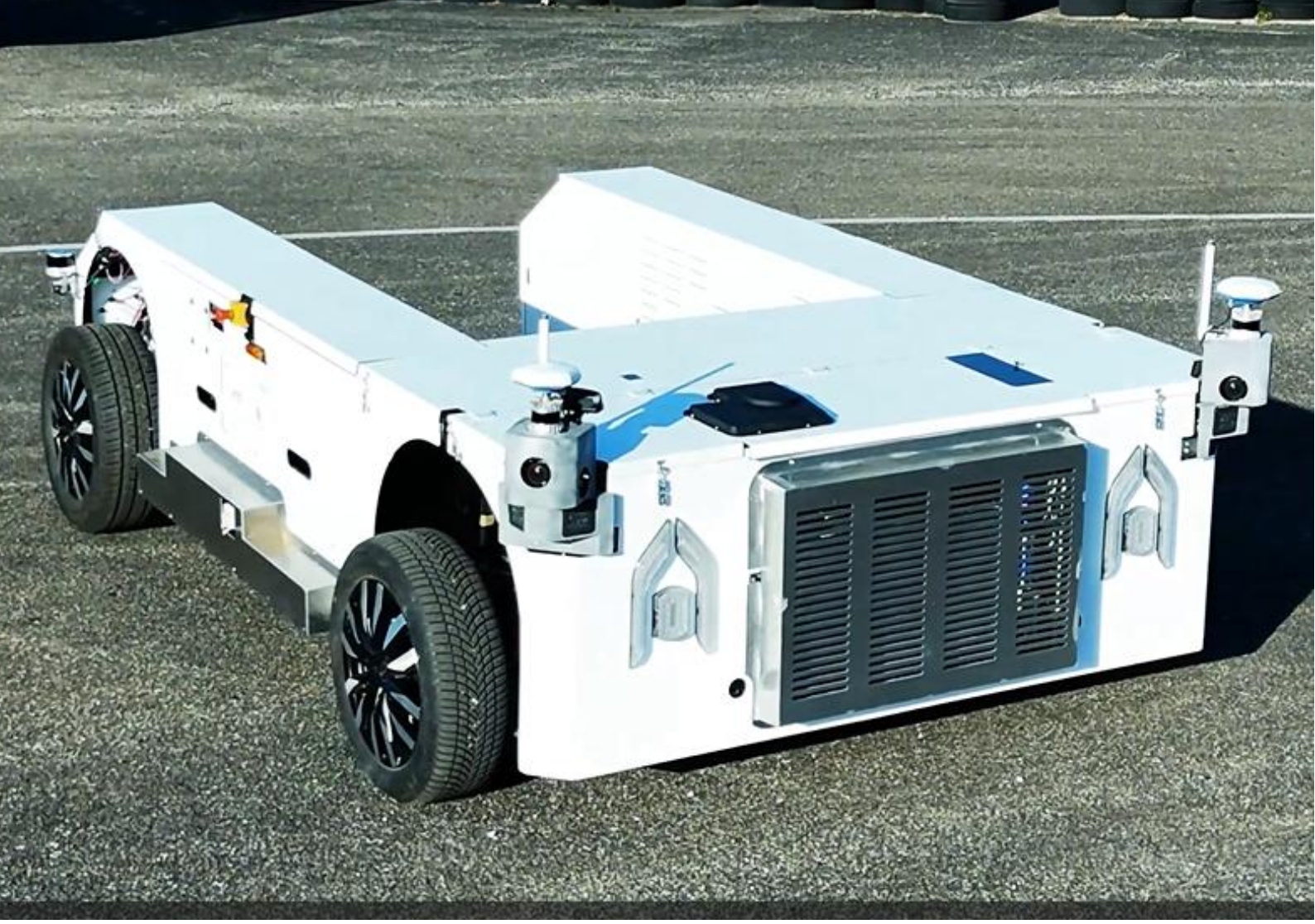


Abschlussbericht
U-Shift II

Gefördert von:

Baden-Württemberg
Ministerium für Wirtschaft,
Handwerk und Tourismus

Im Rahmen des:

strategiedialog
automobilwirtschaft BW

DLR Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

KIT Karlsruher Institut für Technologie

FKFS RESEARCH IN MOTION.

universität ulm

Projektförderung

Ministerium für Wirtschaft, Handwerk und Tourismus Baden-Württemberg

Theodor-Heuss-Str. 4
70174 Stuttgart

Förderzeitraum

31.03.2020 - 31.12.2024, kostenneutrale Verlängerung bis 30.06.2026

Berichtszeitraum

31.03.2020 – 30.06.2026

Projektpartner

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) (Koordinator)

Institut für Fahrzeugkonzepte (FK)

Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV)

Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)

Universität Ulm (UULM)

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik (MRM)

Autorinnen und Autoren

DLR: Mascha Brost, Marco Münster, Giovanni Piazza, Sven Reiland, Philipp Klein, Robert Hahn

FKFS: Jens Neubeck, Sören Fuchs, Thilo Kress, Kevin Huttinger, Michael Armbruster

KIT: Michael Frey (KIT-FAST), Fabian Weitz (KIT-FAST), Niklas Ostendorff (KIT-FAST)
David Kraus (KIT-ITIV), Veljko Vucinic (KIT-ITIV)

UULM: Michael Buchholz, Dominik Authaler, Oliver Schumann

Datum

16.09.2026

Kontakt

Tjark Siefkes tjark.siefkes@dlr.de

Marco Münster marco.muenster@dlr.de

Mascha Brost mascha.brost@dlr.de

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung 5
2. Einführung zum Konzept U-Shift 7
3. Das Projekt U-Shift II 8
4. Forschung- und Entwicklungsergebnisse 10
4.1. Systemauslegung (AP 1000) 10
4.1.1. AP 1100: Einsatzszenarien, Geschäftsmodelle 10
4.1.2. AP 1200: Anforderungsdefinition & Spezifikation 11
4.1.3. AP 1300: Gesamtfahrzeug – Packaging, Subsysteme 11
4.1.4. AP 1400: Funktionen Gesamtsystem 13
4.1.5. AP 1500: Koppelsystem 14
4.1.6. AP 1600 Safetymechanismen U-Shift II Konzept 14
4.2. Kapseltechnologien (AP 2000) 16
4.2.1. AP 2100: Anpassung Personenkapsel inkl. Thermischer Hochleistungsspeicher 16
4.2.2. AP 2200: Anpassung Güterkapsel (Potentiale Holzleichtbau) 18
4.3. Driveboard (AP 3000) 23
4.3.1. AP 3100 Gesamtstruktur Komponentenintegration und Karosserie 23
4.3.2. AP 3200: Fahrwerkssystem inkl. Lenkung und Hubmechanismus 24
4.3.3. AP 3300: Antriebssystem Motor, Umrichter, Bremse 27
4.3.4. AP 3400: Traktionsbatterie – System inkl. Batteriemanagementsystem (BMS) 29
4.3.5. AP 3500: Energie- und Thermomanagement, Kühlung 30
4.3.6. AP 3600: Grundfahrfunktion – Motion Control 33
4.3.7. AP 3700: Strukturelle Sicherheit 35
4.4. Elektrik/Elektronik (AP 4000) 37
4.4.1. AP 4100: E/E-Architektur 37
4.4.2. AP 4200: Service-orientierte Architektur (SOA) 38
4.4.3. AP 4300: Spezifische EE Safetymechanismen 40
4.4.4. AP 4400: Connectivity und Diagnose 42

4.5. Automatisierung (AP 5000) 44
4.5.1. AP 5100: Sensormodule 44
4.5.2. AP 5200: Automatisierte Normal-Fahrfunktion 46
4.5.3. AP 5300: Automatisierte Rangier-Fahrfunktion 47
4.6. Systemintegration und Testinfrastruktur (AP 6000) 52
4.6.1. AP 6100: Demonstrator – Ausbaustufe 1 52
4.6.2. AP 6200: Demonstrator - vollständige Ausbaustufe 53
4.6.3. AP 6300: Test-Betriebshof 53
4.7. Projektmanagement, Öffentlichkeit, Bürgerbeteiligung (AP 7000) 57
4.7.1. AP 7100: Projektmanagement 57
4.7.2. AP 7200: Öffentlichkeit / Bürgerdialog 57
4.7.3. AP 7300: Anschlussfähigkeit & Transferkonzepte 60
4.7.4. AP7400: Demo-Event 60
5. Literatur - Publikationen zu U-Shift II 62

1. Zusammenfassung

Automatisiertes Fahren bietet Chancen für die zukünftige Mobilität, indem beispielsweise auf einen zunehmenden Personalmangel im öffentlichen Verkehr und in der Logistik reagiert werden kann. Ein Fahrzeugkonzept, das beide genannten Sektoren adressiert, ist das U-Shift, welches durch einen modularen Ansatz mit austauschbaren Transportkapseln flexibel einsetzbar ist. Die hierfür notwendigen Technologien wurden im Projekt U-Shift II aufbauend auf den Vorgängerprojekten ModECaP und U-Shift I erforscht und weiterentwickelt.

Kern des Projekts U-Shift II war der Aufbau eines automatisierten U-Shift-Driveboard-Prototyps mit batterieelektrischem Antrieb mit Radnabenmotoren und ganzheitlichem Thermomanagement. Mit diesem Driveboard-Prototyp konnten zentrale Funktionen des U-Shift-Konzepts wie hochpräzises automatisiertes Rangieren und Wechseln unterschiedlicher Transportkapseln beforscht, weiterentwickelt und demonstriert werden.

Im Rahmen der Projektlaufzeit von März 2020 bis Juni 2026 erarbeitete das Projektteam eine Systemarchitektur inkl. Packaging, bei dem durch eine kompakte Anordnung alle benötigten Komponenten im eng begrenzten Bauraum des Driveboards untergebracht werden konnten. Die automatisierte mechanische, elektrische und informationstechnische Kopplung von Kapsel und Driveboard beim Kapselwechsel wurde mittels eines Konnektors realisiert, der einen Toleranzausgleich ermöglicht. Zur sicheren Befestigung der Kapseln auf dem Driveboard erfolgt nach dem Kopplungsvorgang eine automatisierte Verriegelung.

Die automatisierten Fahrfunktionen des U-Shift II Driveboards basieren auf adaptiver Perzeption und Planung in strukturierten und unstrukturierten Umgebungen wie beispielsweise Parkplätzen. Für die Umgebungserfassung wurde im Rahmen des Projekts ein modulares Sensorkonzept mit Kamera-, Lidar- und Radarsensoren entwickelt und umgesetzt, das eine sichere Rundumsicht für das fahrerlose automatisierte Fahren sowie die Kapselaufnahme bietet. Bedarfsgerecht kann zusätzlich Infrastruktursensorik oder in Kapseln verfügbare Sensorik eingebunden werden. Eine mehrstufige Sensordatenfusion berechnet aus den Sensordaten je ein objektbasiertes und ein Rasterkarten-basiertes Umgebungsmodell für die Planung. Die Datensynchronisierung für die Sensordatenfusion wird durch ein adaptives Buffering-Konzept zum systematischen Umgang mit Latenzen, insbesondere auch bei variierenden Sensorsetups durch Kapselsensorik oder variierenden Übertragungszeiten bei Funkstrecken, wie von der Infrastruktursensorik, ermöglicht. Eine Fusion von Lidardaten und Kameradetektionen unter Nutzung von sogenannten ChArUco-Boards (schachbrettartige Markierungen) erlaubt eine hochgenaue Kapselerkennung. Zusammen mit der hochgenauen Planung des Automatisierungssystems und Regelung der Grundfahrfunktionen wird damit eine Kapselanfahrt mit einer Genauigkeit < 2 cm realisiert.

Der Antrieb des Driveboards erfolgt mittels vier elektrischen Radnabenmotoren mit je 7 kW Nennleistung, also insgesamt 28 kW Nennleistung. Diese ermöglichen einen emissionsfreien und leisen Betrieb des U-Shift II. Zusätzlich können durch die radindividuelle Ansteuerung Freiheitsgrade für die Fahrdynamikregelung (z.B. Torque Vectoring) realisiert werden. Die Batterien sind verteilt auf Driveboard und Kapsel, wodurch die Kapsel getrennt vom Driveboard elektrisch geladen werden und extra Energie für die Fahrt bereitgestellt werden kann. Ein intelligentes Thermomanagement ermöglicht energieeffizientes Heizen und Kühlen der Batterie und vieler weiterer Komponenten.

Motion Control und Regelung werden mittels einer echtzeitfähigen Bewegungssteuerung umgesetzt, was eine präzise Trajektorienverfolgung ermöglicht. Der Ansatz basiert auf modellprädiktiver Regelung und berücksichtigt Systemdynamik, Aktuatorgrenzen sowie Nebenbedingungen explizit. Dadurch wird ein glattes, stabiles und gleichzeitig reaktionsschnelles Fahrverhalten erreicht. Die Fahrzeugzustandsschätzung ist eng mit der Regelung in einer modularen und skalierbaren Systemarchitektur integriert und läuft synchron auf einer zentralen Recheneinheit. Die kontinuierliche Bereitstellung konsistenter Zustandsgrößen verbessert die Robustheit gegenüber Sensorunsicherheiten und Modellabweichungen. Gleichzeitig ermöglicht die modulare Struktur eine flexible

Erweiterung, etwa durch komplexere Modelle oder zusätzliche Sensorik, und bietet hohe Transparenz sowie gute Diagnose- und Abstimmungsmöglichkeiten für unterschiedliche Anwendungen.

Die entwickelte adaptive E-/E-Architektur unterstützt dynamische Over-the-Air-Rekonfigurationen und ermöglicht eine flexible Einbindung von Sensorik und Fahrzeugfunktionen über verschiedene Kapselvarianten hinweg. Integraler Bestandteil der E/E-Gesamtarchitektur ist ein service-orientierter Ansatz. Fahrzeugfunktionen können über Driveboard und Kapsel hinweg servicebasiert bereitgestellt, zur Laufzeit orchestriert und variantengerecht konfiguriert werden. Dies ermöglicht den modularen Einsatz von Komponenten in einem modularen Gesamtsystem. Cloudbasiertes Monitoring und eine intelligente strukturierte Diagnosearchitektur bieten eine durchgängige Fahrzeug-Cloud-Kommunikation und ein kontinuierliches Systemmonitoring. Für prädiktive Diagnosefunktionen verfügt das Driveboard über eine erklärbare Anomalieerkennung mit dem Ziel, die Zuverlässigkeit und Sicherheit von Antriebssystemen automatisierter Elektrofahrzeuge zu verbessern. Zur experimentellen Validierung wurden Realdaten aus dem Fahrbetrieb erfasst und über die cloudbasierte Diagnoseinfrastruktur ausgewertet. Die prädiktive Diagnose konnte spezifische Batteriefehler bis zu 49 Sekunden im Voraus vorhersagen. Das Konzept der prädiktiven Diagnose ist speziell auf vernetzte automatisierte Elektrofahrzeuge, wie das U-Shift II, ausgerichtet.

Das neuartige Fahrwerk des U-Shift II Driveboards verfügt über ein integriertes Hubsystem zur Kapselaufnahme. Mit Hilfe der Hubfunktion fährt das Driveboard abgesenkt unter die Kapsel und hebt diese selbstständig an. Ein im Projekt entwickeltes Arretierungssystem sichert die angehobene Position während der Fahrt ab. Das Einrasten der Sicherungsbolzen wird über Sensoren überwacht. Zum Lenksystem entstand aus dem Projekt heraus ein Patent (DE102022113937B4).

Theoretische Arbeiten wie virtuelle Kapselkonzepte und Simulationen ergänzten die Forschung mit dem U-Shift II Driveboard-Prototyp im Projekt. Zudem wurde eine Vielzahl von möglichen Anwendungsfällen für das U-Shift Konzept erarbeitet. Diese reichen vom ÖPNV-Einsatz über Logistik bis hin zu mobilen Übernachtungsmöglichkeiten oder Anwendungen im Medizinbereich.

Ein Bürgerdialog ergänzte die technologische Forschung. In diesem Rahmen wurden mit Befragungen und Workshops Anforderungen unterschiedlicher Interessensgruppen erhoben und das Projektteam gab umfassende Einblicke in die Forschung.

Das Projekt wurde mit 10 Millionen Euro vom Ministerium für Wirtschaft, Handwerk und Tourismus Baden-Württemberg gefördert. Auf Grund von Herausforderungen wie der Coronapandemie, Lieferverzögerungen und Optierungsbedarf bei technischen Systemen war eine Laufzeitverlängerung des Projekts erforderlich. Im Rahmen dieser kostenneutralen Laufzeitverlängerung wurden alle vorgesehen Projektmeilensteine erreicht.

2. Einführung zum Konzept U-Shift

Das innovative Fahrzeugkonzept U-Shift besteht aus einem fahrerlosen, elektrischen, u-förmigen Fahrmodul, dem "Driveboard", und variablen Transportkapseln (Abbildung 1). Das U-Shift ist "on-the-road modular" - das bedeutet, der Wechsel von Kapseln funktioniert durch ein in das Driveboard integriertes Hubsystem auf der Straße ohne Bedienpersonal oder spezielle Infrastruktur. Dieses zentrale Merkmal des U-Shift unterscheidet das Konzept von anderen Ansätzen, denn der Kapselwechsel ist somit schnell, einfach und nicht an Stationen gebunden. Ob als On-demand-Shuttle, Hightech-Rufbus, als flexibles Verteilzentrum für Güter und Pakete oder als mobiles Verkaufsgeschäft – das futuristische Fahrzeugkonzept U-Shift bedient auf innovative Weise viele Anwendungsfälle in Mobilität und Logistik.

Abbildung 1: Modularer Ansatz des U-Shift Konzepts: flexible Kombination diverser Kapseln mit einem Driveboard (Bild: DLR, CC BY-ND)

Das Driveboard beinhaltet fast alle technischen Systeme, um fahrerlos und elektrisch unterwegs zu sein. Die Kapseln hingegen sind weniger komplex und somit kostengünstig. Anwender wie Busunternehmen, Paketzusteller, etc. könnten sich Driveboards in einem Sharingsystem teilen, um sie hoch auszulasten und effizient zu nutzen. Bei Fahrzeugen entfällt allgemein ein hoher Teil der Kosten, umweltbelastenden Materialien und Energie auf die Produktion des Antriebsstrangs. Durch die bei U-Shift umgesetzte Trennung von Transport- und Antriebseinheit kann letztere hoch ausgelastet werden. Die Technik veraltet somit nicht vor Ablauf ihrer Lebensdauer (bspw. Batterien). Es entsteht ein flexibles und nachhaltiges Mobilitätskonzept.

Hinter der Entwicklung des Fahrzeugkonzepts stehen mehrere Forschungseinrichtungen und Universitäten (Tabelle 1), die in mehreren Projekten das Konzept (weiter-)entwickelten [34, 51]. Den ersten fahrbaren, noch ferngesteuerten Prototyp hat das U-Shift-Team im September 2020 beim Jahrestreffen des Strategiedialogs Automobilwirtschaft Baden-Württemberg vorgestellt. Das Projekt U-Shift II führte die Entwicklung des Konzepts weiter.

3. Das Projekt U-Shift II

Im Fokus des Projekts U-Shift II, das von März 2020 bis Juni 2026 lief, standen die Entwicklung eines neuen U-Shift Driveboards zur Umsetzung und Erprobung von hochpräzisem Rangieren und Koppeln von Driveboard und Kapseln. Letztere sind zentrale Funktionen, um das modulare Konzept zu ermöglichen. Für die Forschung und Entwicklung dieser Themen wurde dazu im Projekt ein Prototyp des Driveboards aufgebaut, der über automatisierte Fahrfunktionen verfügt (Abbildung 2).

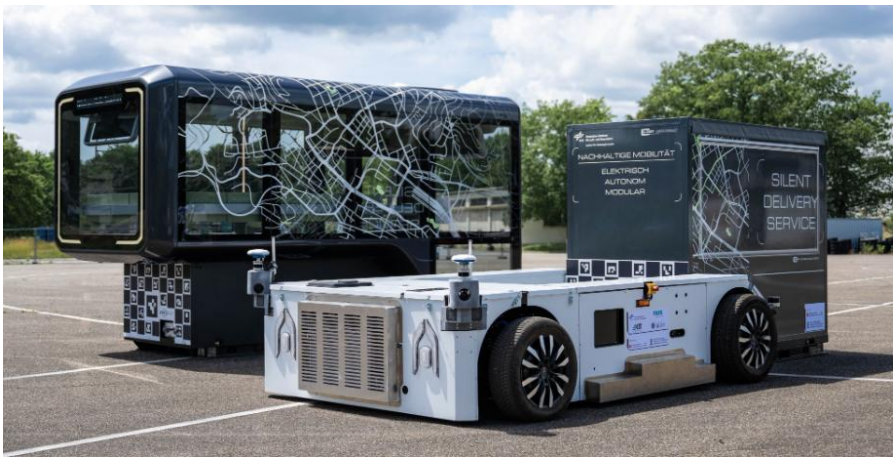


Abbildung 2: U-Shift II Driveboard mit angepassten Kapseln aus vorhergehenden Projekten (Bild: DLR)

Das zentrale Ziel des Projekts war es, das oben beschriebene innovative Konzept der „On-the-Road"-Fahrzeugmodularisierung funktional in einem abgesperrten Bereich zu demonstrieren und so einen Grundstein für eine Weiterentwicklung in Richtung Marktreife zu legen. Dies geschah durch den Aufbau des U-Shift II Driveboard-Prototyps und der zugehörigen Durchführung von umfangreichen Tests und Optimierungen des Gesamtsystems inkl. aller benötigten Komponenten und Subsysteme, sowie der Demonstration der technischen Machbarkeit. Ergänzend unterstützten theoretische Analysen und Simulationen die Technologieentwicklung. Zusätzlich lieferten Untersuchungen der Anforderungen verschiedener Interessensgruppen im Rahmen eines Bürgerdialogs Erkenntnisse für die zukünftige Weiterentwicklung des U-Shift Konzepts. Dies zielte auch darauf ab, im Automobilland Baden-Württemberg eine Plattform für neue Produkte und Geschäftsmodelle zu schaffen, die über evolutionäre Ansätze hinausgeht und damit die Transformation der Wirtschaft des Landes zu unterstützen. U-Shift II wurde mit 10 Mio. € vom Ministerium für Wirtschaft, Handwerk und Tourismus BW im Rahmen des Strategiedialog Automobilwirtschaft BW gefördert.

Im Projekt U-Shift II arbeitete ein interdisziplinär zusammengesetztes Konsortium eng zusammen. Die beteiligten Institutionen mit den jeweils zugehörigen Schwerpunkten sind in Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Projektkonsortium und Forschungsschwerpunkte im Projekt

Institution	Forschungsschwerpunkt in U-Shift II
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte	Projektleitung, Fahrzeugstruktur, Packaging, Anwendungsfälle, Nutzeranforderungen, Bürgerdialog
Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technik der Informationsverarbeitung (ITIV)	Elektrische und elektronische Komponenten (E/E-Architektur), Over-the-air-Rekonfigurationen, flexible Einbindung von Sensorik und Fahrzeugfunktionen
Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST)	Fahrwerk mit integriertem Hubsystem, Lenksystem
Universität Ulm, Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik (MRM)	Sensorkonzept für Fahrzeug und Infrastruktur, automatisierte Fahrfunktionen, automatisiertes präzises Rangieren
Forschungsinstitut für Kraftfahrtwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)	Antriebsstrang, Energie- und Thermomanagement, Steuerung und Überwachung aller zentralen Fahrzeugfunktionen, Motion Control

Im Projekt waren im Wesentlichen die in Tabelle 2 dargestellten Unternehmen durch Unteraufträge bzw. als Lieferanten beteiligt.

Tabelle 2: Übersicht zu im Projekt im Unterauftrag bzw. als Lieferant beteiligten Unternehmen

Firma	Standort	System/Komponenten	Beteiligt über
Schaeffler	Herzogenaurach	Motoren	FKFS
Akasol	Darmstadt	Batterie	FKFS
Akka	Rutesheim	Rahmen, Fahrwerk, Lenkung	DLR, KIT
Stäubli Pfäffikon	Weil am Rhein	Konnektor	DLR
Lapp	Stuttgart	Kabel	FKFS, KIT

Die Projektstruktur beinhaltete sieben Hauptarbeitspakete (siehe Abbildung 3).

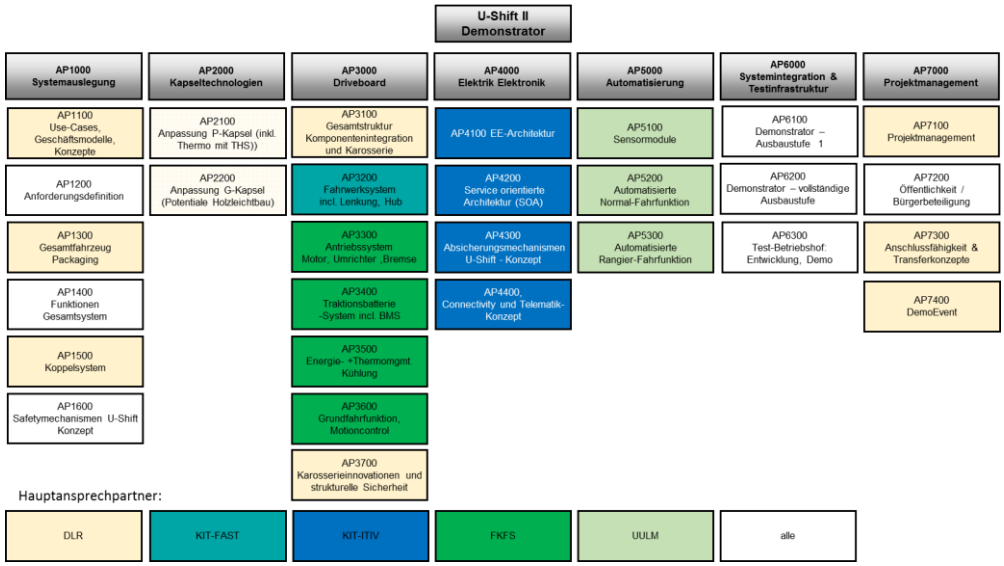


Abbildung 3: Projektstruktur

4. Forschung- und Entwicklungsergebnisse

Das Projekt U-Shift II gliedert sich in die in Abbildung 3 dargestellten sieben Hauptarbeitspakete Systemauslegung, Kapseltechnologien, Driveboard, Elektrik / Elektronik, Automatisierung und Systemintegration & Testinfrastruktur sowie Projektmanagement und Verwertung. Dieser Gliederung entsprechend werden in den nachfolgenden Kapiteln Details zu den jeweiligen Forschungsarbeiten erläutert.

4.1. Systemauslegung (AP 1000)

Das AP 1000 beinhaltet Arbeiten in den Themenfeldern Einsatzszenarien und Geschäftsmodelle, Anforderungsuntersuchungen und Festlegung von Systemspezifikationen, Konzeption des Gesamtfahrzeugs sowie des Koppelsystems zwischen Kapseln und Driveboard sowie Sicherheitsaspekte. Die Ergebnisse sind nachfolgend für die verschiedenen Arbeitspakete dargestellt.

4.1.1. AP 1100: Einsatzszenarien, Geschäftsmodelle

Die Analysen zu Einsatzszenarien basieren auf einer Vision des U-Shift Fahrzeugs. Dabei handelt es sich um ein in fiktives in Serie produziertes U-Shift im Jahr 2040. Darauf basierend wurde dessen Eignung in möglichen Einsatzbereichen analysiert, mögliche Anwendungsfälle identifiziert, sowie mögliche Geschäftsmodelle diskutiert. Detailanalysen u.a. zu Ressourceneinsparung und Kosteneffizienz ergänzten die Arbeiten.

Einsatzmöglichkeiten

Zur Ableitung von Einsatzszenarien wurden Wirtschaftszweige gemäß der Definition des Statistischen Bundesamts hinsichtlich der Eignung von U-Shift für diese analysiert. Die Bewertung der Eignung basiert auf qualitativen Überlegungen zu Transport- und Betriebsabläufen.

Darauf aufbauend wird ein schrittweiser Roll-Out in verschiedenen Betriebszwecken vorgeschlagen, von einer ersten Demonstration bis hin zur skalierten Implementation in großen Städten. Hierzu wurden ein Betrieb in einem Transitterminal, ein gebündelter Personen- und Gütertransport als Business Case eines fiktiven White Label Dienstleisters und als Vision die komplette Abdeckung von innerstädtischem Gütertransport mit U-Shift Fahrzeugen näher untersucht.

Für die ersten beiden Anwendungsfälle wurden detaillierte Einsatzanforderungen in Bezug auf die Lärmemissionen, die Rangiertoleranzen, die Zeitanforderungen und die Barrierefreiheit definiert. In einer Flächenanalyse wurde die Eignung verschiedener Lenkwinkel anhand von Schleppkurvensimulationen in realen Situationen aufgezeigt und ein Benchmark zum Flächenverbrauch durchgeführt. U-Shift weist je nach Zustand (Kombination von Driveboard und Kapsel oder Einzelmodule) eine geringere oder höhere Flächeneffizienz auf als vergleichbare Status-quo-Fahrzeuge auf.

Geschäftsmodelle und Rechtliche Aspekte

U-Shift eignet sich unter anderem für Dienstleistungsmodelle basierend auf Mobility-as-a-Service (MaaS) und Logistics-as-a-Service (LaaS). Anstatt jedes Fahrzeug zu besitzen, werden bei diesen Ansätzen die fahrbaren Plattformen von einer Flottenbetreiberin geteilt. Im Gegensatz dazu können Kapseln im Eigentum von Logistikunternehmen oder Städten bleiben, um deren spezifische Bedürfnisse (z. B. Kühlung, Sicherheit) zu erfüllen. Ein zentrales Element ist die Möglichkeit, leere Kapseln als mobile Energiespeicher (Vehicle-to-Grid) für das Stromnetz zu nutzen.

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Analysen zeigen, dass U-Shift im Vergleich zu konventionellen Lieferwagen (z. B. der Sprinter-Klasse) zwar höhere Anschaffungskosten verursacht (bedingt durch die modulareren und komplexeren Komponenten), dem jedoch Vorteile durch das modulare Konzept mit der Trennung von Antriebs- und Transporteinheiten gegenüberstehen. Durch diesen modularen Aufbau kann tagsüber eine Nutzung für Pakete und abends als Personentransporter erfolgen und die Antriebseinheit intensiv ausgelastet werden. Dies führt langfristig zu einer effizienteren Flächennutzung im städtischen Raum, geringeren Betriebskosten pro Transporteinheit und weniger Parkplatzbedarf [52].

4.1.2. AP 1200: Anforderungsdefinition & Spezifikation

Die grundlegenden Anforderungen an das Fahrzeugkonzept wurden zu Projektbeginn systematisch erfasst, strukturiert und in einem iterativen Prozess in Workshops und Besprechungen vom Projektkonsortium ergänzt und abgestimmt. Ziel war die Erstellung einer konsistenten Spezifikationsgrundlage für die weitere Entwicklung der U-Shift Fahrzeugplattform, der Kapseln für den Personen- und Gütertransport sowie der zugehörigen Infrastruktur. Hierzu wurden sämtliche technischen Anforderungen in einer zentralen Spezifikationsliste zusammengeführt. Diese Liste wurde während der Projektlaufzeit kontinuierlich gepflegt und erweitert. Sie umfasst alle wesentlichen Hauptmerkmale, Funktionen und Komponenten des Fahrzeugkonzepts. Die Anforderungen wurden in übergeordnete Kategorien zusammengefasst. Dazu zählen beispielsweise Nutzungsaspekte, Fahrleistung und Bremsen, Reichweite, Abmessungen, Radstand, Nutzlast sowie weitere fahrzeug- und systemrelevante Eigenschaften. Somit entstand eine strukturierte Dokumentation, die von allen Projektpartnern als gemeinsame Referenz genutzt werden konnte. Weiterhin konnten Schnittstellen zwischen den einzelnen Baugruppen frühzeitig berücksichtigt und technische Abhängigkeiten dokumentiert werden.

Die abgestimmte Spezifikationsliste diente während des Projekts als zentrale Grundlage für die Entwicklung des Driveboards. Gleichzeitig stellt sie eine umfassende Dokumentation der erarbeiteten Spezifikationen dar und kann eine wertvolle Basis für mögliche Folgeprojekte bilden.

4.1.3. AP 1300: Gesamtfahrzeug – Packaging, Subsysteme

Das Gesamtpackaging des Driveboards „U-Shift II" stellte eine besondere Herausforderung dar, die aus der U-Form des Fahrzeugs resultiert. Die primäre Herausforderung bestand darin, alle notwendigen Komponenten innerhalb des stark begrenzten Platzangebots in den beiden Schenkeln sowie im Vorderwagen unterzubringen. Das Packaging-Konzept zeichnet sich durch eine mehrstufige Verschachtelung der Bauteile im Vorderwagen aus, wobei der notwendige Zugang zu allen Systemen gewährleistet wird. Ein zentraler Aspekt bei der Auslegung war zudem die Berücksichtigung der vertikalen Bewegung des Fahrschemels während des Hubvorgangs.

Die Rahmenstruktur (Abbildung 4 links) basiert auf einem geschweißten Stahl-Profilrohrrahmen, der teilweise als Fachwerk ausgeführt ist. Um eine stabile Integration aller Systeme zu gewährleisten, wurden zahlreiche Halterungen und Montageplatten auf mehreren Ebenen integriert. Der Schutz gegen äußere Einflüsse wird durch eine Außenhaut aus Alu-Verbundplatten (Abbildung 4 rechts) sichergestellt, welche das gesamte Innengefüge umschließt.

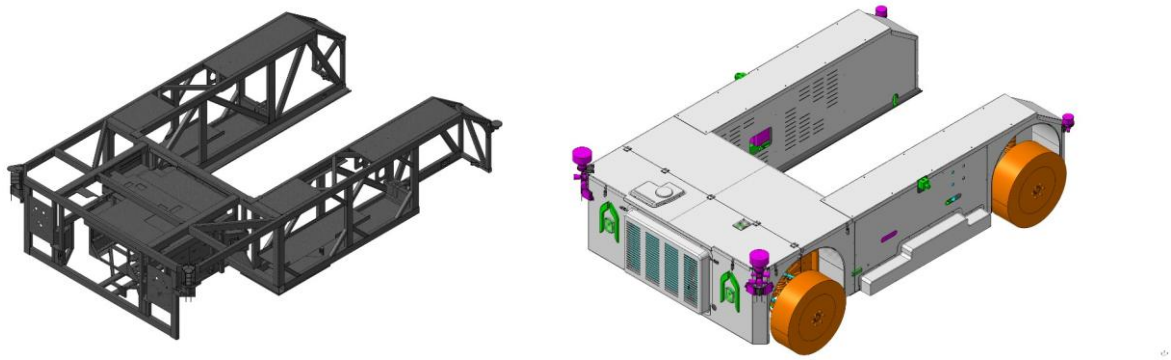


Abbildung 4: Rahmenstruktur Driveboard (links), Driveboard mit Außenhaut (rechts) (Bild: DLR, CC BY-ND)

Das Fahrwerk (Abbildung 5 orange) ist funktional in zwei Achsen gegliedert:

- Vorderachse: Diese ist als beweglicher Fahrschemel konzipiert. Über Seilzüge mit dem Rahmen verbunden, ermöglicht sie die Realisierung des Hubmechanismus. Beim Hub bewegt sich der gesamte Fahrschemel (inklusive Fahrwerk und Lenkung) vertikal um 200 mm im Vorderwagen.
- Hinterachse: Die Räder sind über eine Längsschwinge am Rahmen gelagert. Die Federung ist in x-Richtung auf einer Schiene verschiebbar montiert; die Hubbewegung wird hierbei durch das Verschieben der Federaufhängung mittels einer Schubkette erzeugt.

Jedes der vier Räder verfügt über einen In-Wheel-Motor.

Das Thermomanagement (Abbildung 5 blau) dient zur Kühlung der Motoren und Rechner der Automatisierung. Eine besondere Herausforderung stellte hierbei die flexible Verschlauchung für den Hub und die Lenkung der Vorderräder dar, wofür genügend Bauraum eingeplant wurde.

Die Automatisierung (Abbildung 5 pink) ist dezentral aufgebaut: Vier Rechner befinden sich in den Schenkeln, weitere Steuergeräte sowie zusätzliche Rechner sind auf der obersten Ebene im Vorderwagen positioniert.

An den vier Ecken des Driveboards sind Sensoren angebracht. Im Heckbereich finden sich jeweils ein 360°-Lidar und eine Kamera. Der vordere Sensoraufbau besteht pro Seite aus einem 360°-Lidar, drei Kameras und zwei Radaren. Zusätzlich ist vorne jeweils eine GPS-Antenne verbaut. Der gesamte Sensoraufbau ist so konstruiert, dass er als Einheit demontiert werden kann.

Die Batterien zur Energieversorgung (Abbildung 5 grün) sind in einem separaten Rahmen im Vorderwagen montiert. Weitere E/E-Komponenten wie Energieverteiler, DC-DC-Wandler, Motorsteuergeräte sowie die Beleuchtung vervollständigen das System. Die Verkabelung wurde teilweise in den Hohlprofilen des Rahmens geführt, um Platz zu sparen.

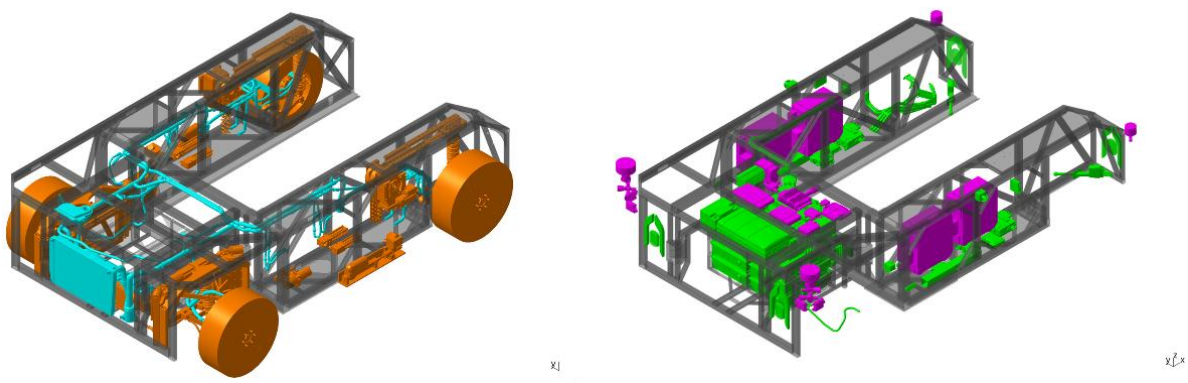


Abbildung 5: Fahrwerk (orange), Thermomanagement (blau), Automatisierung (pink), E/E und Energieversorgung (grün) (Bild: DLR, CC BY-ND)

Die Personenkapsel (Abbildung 6) bietet Platz für neun Sitzplätze, die der U-Form des Driveboards folgen und entsprechend angeordnet sind. Durch die erhöhte Sitzposition oberhalb des eigentlichen Driveboards musste der Boden angehoben werden. Dieser Freiraum wird genutzt, um Batterien und Steuergeräte unterhalb des Fußbodens zu integrieren. Im hinteren Überhang steht zusätzlicher Platz für die Beförderung eines Rollstuhls oder Kinderwagens zur Verfügung. Die Klimaanlage ist leicht in die Außenhaut versenkt über diesem Bereich integriert. Auf dem Dach befinden sich ergänzende GPS-Antennen sowie eine nach hinten gerichtete Kamera. Auch an den hinteren Ecken sind in gleicher Höhe wie beim Driveboard jeweils eine Kamera und ein 360°-Lidar installiert.

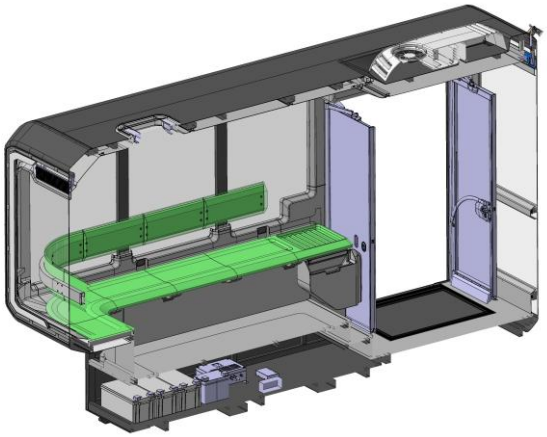


Abbildung 6. Schnittansicht Personenkapsel (Bild: DLR, CC BY-ND)

4.1.4. AP 1400: Funktionen Gesamtsystem

Die Funktionsarchitektur umfasst sowohl fahrzeugnahe Funktionen wie Ansteuerung, Fahrzeugzustandsschätzung und Trajektorienfolgeregelung als auch die übergeordneten Funktionen der Umfelderfassung und Bewegungsplanung. Die Zuordnung der Funktionen erfolgt dabei auf unterschiedliche Recheneinheiten und Steuergeräte. Während die Ansteuerung der Fahrzeugaktoren, die Fahrzeugzustandsschätzung und die Trajektorienfolgeregelung auf einem zentralen Steuergerät ausgeführt werden, sind Funktionen der Umfelderfassung und Bewegungsplanung auf weiteren Recheneinheiten verteilt. Die Kommunikation zwischen den Funktionskomponenten erfolgt über definierte Schnittstellen und ermöglicht damit eine modulare Integration der einzelnen Systembestandteile.

Die funktionalen Schnittstellen sind in enger Abstimmung zwischen den beteiligten Projektpartnern spezifiziert. Neben den grundlegenden Ein- und Ausgangssignalen umfasst die Schnittstellendefinition insbesondere Anforderungen hinsichtlich Datenformaten, Aktualisierungsraten, Synchronisation und Verfügbarkeit.

Die Umsetzung der einzelnen Funktionsumfänge erfolgte entsprechend ihrer fachlichen Zuordnung in den jeweiligen Arbeitspaketen. Die gewählte verteilte Funktions- und Steuergerätearchitektur ermöglichte dabei eine weitgehende Parallelisierung der Entwicklungs- und Integrationsarbeiten. Funktionen konnten unabhängig voneinander entwickelt und bereits vor der Verfügbarkeit des vollständigen Zielsystems in den jeweiligen Software- und Hardwareumgebungen vorab in Betrieb genommen werden. Die Integration in das Gesamtfahrzeug erfolgte über die definierten Schnittstellen und die übergeordnete Systemarchitektur.

Die entwickelte Funktionsarchitektur bildet damit die strukturelle Grundlage für die Integration der Fahrzeugfunktionen des U-Shift-II-Demonstrators. Die Kombination aus klar definierten Schnittstellen und verteilter Funktionsausführung ermöglicht eine modulare und erweiterbare Systemstruktur und unterstützte eine effiziente Integration der Einzelkomponenten zu einem konsistenten Gesamtsystem.

4.1.5. AP 1500: Koppelsystem

Das Koppelsystem des Driveboards U-Shift II dient als sichere, platzsparende und effiziente mechanische Verbindung zwischen dem Driveboard und den transportierten Kapseln. Aktive Komponenten/ Aktuatoren sind im Driveboard integriert, während die Kapseln ausschließlich passive Gegenstücke tragen. Dieses Konzept ermöglicht ein optimiertes Kosten-Nutzen-Verhältnis bei gleichzeitiger Flexibilität in der Kapselausstattung.

Die mechanische Verriegelung wird durch vier Linearaktuatoren (Abbildung 7 links) mit elektrisch angetriebenen zylinderförmigen Linearmotoren realisiert, die im unteren Bereich der Schenkel des Driveboards angeordnet sind. Diese Bauweise gewährleistet eine kompakte Integration und erlaubt zudem eine manuelle Entriegelung oder Demontage der Kapseln bei Bedarf. Eine präzise Zentrierung sowie eine sichere Verankerung der Kapseln in alle Richtungen werden durch einen Kraftschluss erreicht. Die entsprechenden Gegenstücke befinden sich in der schwerpunktgünstigen Bodenstruktur der Kapseln, was eine stabile Verbindung auch unter dynamischen Lastbedingungen sicherstellt.

Zusätzlich zur mechanischen Verbindung existiert eine elektrisch verfahrbare Multikopplung (Abbildung 7 rechts). Der aktive Teil dieser Einheit ist stirnseitig in der Innenseite des Driveboards positioniert, während das Gegenstück stirnseitig in der Kapsel montiert ist. Dieses System verbindet das Driveboard elektrisch mit den relevanten Automatisierungskomponenten und Bordnetzen der Kapsel. Die aktuelle Auslegung umfasst einen 70-Pin-Stecker sowie zwei Ethernet-Konnektoren zur Signal- und Energieübertragung. Das Design ist grundsätzlich modular aufgebaut, individuell konfigurierbar und kann zukünftig um weitere Funktionen oder Verbindungsarten erweitert werden.

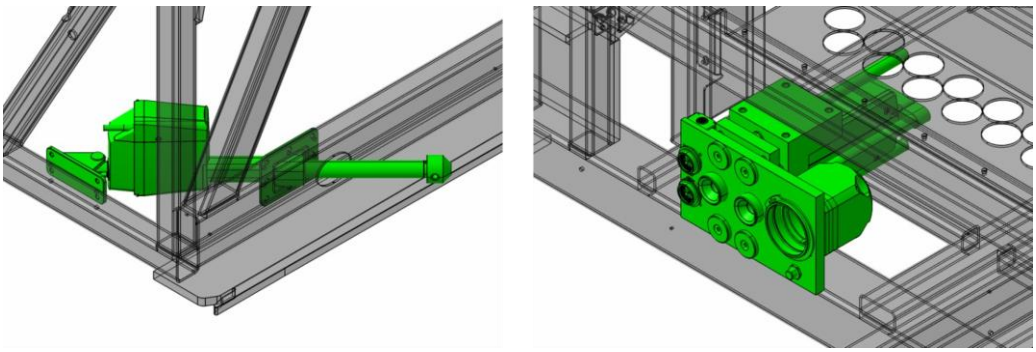


Abbildung 7: Mechanische Verriegelung (links) und elektrischer Konnektor (rechts) (Bild: DLR, CC BY-ND)

4.1.6. AP 1600 Safetymechanismen U-Shift II Konzept

Das im Projekt aufgebaute und verwendete U-Shift II Fahrzeug ist ein Prototyp mit vielen neuartigen Komponenten, die nicht auf dem Standard von Serienfahrzeugen sicherheitszertifiziert werden können. Um trotzdem einen sicheren Umgang mit dem Fahrzeug zu gewährleisten und potenzielle Gefahren für beteiligte Personen zu minimieren wurde ein Sicherheitskonzept erarbeitet.

Hierzu wurde zunächst eine Übersicht von Normen und Standards, die auf das U-Shift Fahrzeug zutreffen, erstellt. Da das Fahrzeug nicht im öffentlichen Straßenraum zugelassen und betrieben werden soll, müssen diese Normen nicht erfüllt werden, dienen jedoch als Basis für das Sicherheitskonzept.

Basierend auf der in der EU gültigen „ISO 26262 Road vehicles – Functional safety“ Norm wurde die Methode der hazard analysis and risk assesment (HARA) auf den Prototyp angewendet. Hierbei wurden insgesamt 52 Gefahren, die potenziell von dem Fahrzeug ausgehen könnten, identifiziert. Zusätzlich wurde ein Katalog von 35 Situationen, in denen sich der U-Shift Prototyp befinden könnte, erstellt. Anschließend wurde jede mögliche Kombination einer Situation und potenzieller

Gefahr nach der Häufigkeit des möglichen Eintretens (Exposure), der Kontrollierbarkeit im Falle eines Eintretens (Controlability) und der Schwere möglicher Personenschäden im Falle eines Eintretens (Severity) bewertet. Durch die Kombination dieser Faktoren ergibt sich ein Sicherheitslevel.

Im nächsten Schritt wurden dann Maßnahmen ermittelt, die den Eintritt der Gefahren und Situationen verhindern oder die Folgen dieser mittigeren. Es wurden sowohl technische, als auch organisatorische Maßnahmen beschlossen. Um eine ausreichende Abdeckung sicherzustellen wurden die Maßnahmen den entsprechenden Situationen-Gefahren Kombinationen zugeordnet und sichergestellt, dass jede Gefahr durch mehrere Maßnahmen abgedeckt ist. Bei Fällen mit besonderem Risiko (ASIL D) wurde jeweils geprüft, ob die Maßnahmen ausreichend sind.

Voraussetzung für die Arbeit am Fahrzeug im U-Shift II Projekt war eine Sicherheitsunterweisung, die über potenzielle Gefahren aufklärte und die beschlossenen Maßnahmen zusammenfasste. Die Teilnahme der projektbeteiligten Personen an der Sicherheitsunterweisung wurde jeweils dokumentiert.

4.2. Kapseltechnologien (AP 2000)

Das AP 2000 „Kapseltechnologien“ umfasst die Anpassung der Personenkapsel (AP 2100) sowie die Anpassung der Güterkapsel (AP 2200).

Dabei wurde bei der Anpassung der Personenkapsel in AP 2100 der Fokus auf das Thermomanagement für den öffentlichen Personenverkehr gelegt. Die benötigten Komponenten eines thermischen Hochleistungsspeichers wurden konzipiert, modelliert und dimensioniert.

Die Anpassungen der Güterkapsel in AP 2200 geschahen vor allem virtuell. Dabei konnten die Potentiale des Holzleichtbaus für eine Frischekapsel aufgezeigt werden. Zur Demonstration wurden Teilstrukturen, wie der Boden oder ein Seitenwand Ausschnitt, im Laufe des Projekts gefertigt, um einzelne technische Aspekte in Versuchen zu validieren.

4.2.1. AP 2100: Anpassung Personenkapsel inkl. Thermischer Hochleistungsspeicher

Gegenstand der Betrachtungen im AP 2100 war es, einen Thermischen Hochleistungsspeicher (THS) als mögliches Heizsystem für die Personenkapsel zu betrachten. Hierfür wurden zunächst die für den THS relevanten Anforderungen und Randbedingungen definiert. Anschließend erfolgte eine Grobauslegung auf Basis des zum Zeitpunkt der Betrachtungen vorliegenden Entwicklungsstandes der Technologie und der zugehörigen Auslegungswerkzeuge.

Als relevante Anforderungen und Randbedingungen zur Dimensionierung wurden das Betriebsszenario, die erforderliche maximale Heizleistung der Personenkapsel und die benötigte maximale Heizenergiemenge betrachtet. Mit Hilfe von Simulationstools wurde der thermische Leistungsbedarf der Personenkapsel abgeschätzt. Als Ergebnis ergab sich ein maximaler, kurzfristiger Leistungsbedarf von 10 kW. Die maximal benötigte Heizenergiemenge während einer Fahrperiode beträgt 25,5 kWh. Mit dem Betriebsszenario wird festgelegt, wann der Speicher entladen und wann er beladen werden kann. Das festgelegte Betriebsszenario ist in Abbildung 8 dargestellt.

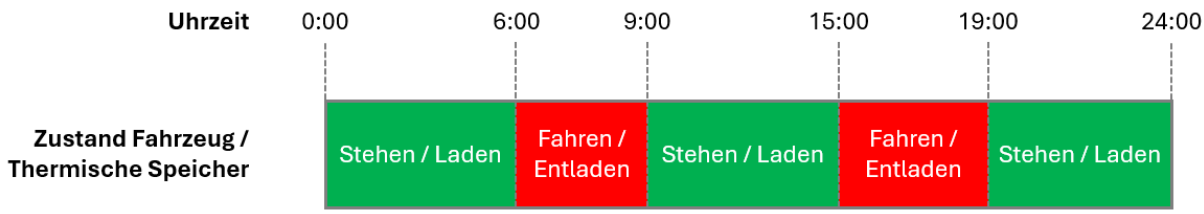


Abbildung 8: Zugrunde gelegtes Fahrszenario für die Auslegung des Thermischen Hochleistungsspeichers

Anhand von Abbildung 8 wird deutlich, dass die Personenkapsel im Szenario während zwei Zeiträumen pro Tag genutzt wird. Hierbei handelt es um Zeiträume zu typischen „Pendlerzeiten“. Die Zeiten wurden auf vormittags zwischen 6 Uhr und 9 Uhr und auf nachmittags zwischen 15 Uhr und 19 Uhr festgelegt. Zwischen diesen Fahrzeiträumen wird die Personenkapsel abgestellt und an eine Ladestation angeschlossen. Damit besteht während der Abstellung die Möglichkeit zum nachladen des Speichersystems. Ergänzend zur Entladeleistung und Speicherkapazität wurde die Beladeleistung auf 10 kW festgelegt. Durch die theoretische Überdimensionierung besteht während der Beladephasen die Möglichkeiten, auch variable Ladefenster, z.B. zum Bezug von Netzenergie zu Niedrigstrompreisen, zu nutzen.

Die Auslegung des THS erfolgte in mehreren Etappen. Hierdurch konnten während der Projektlaufzeit kontinuierlich Zwischenergebnisse ermittelt werden, hinsichtlich des Platzbedarfes und der zu erwartenden Masse des Speichersystems. Das genutzte und teilweise im Projekt weiterentwickelte Auslegungstool ist rudimentär in Abbildung 9 dargestellt.

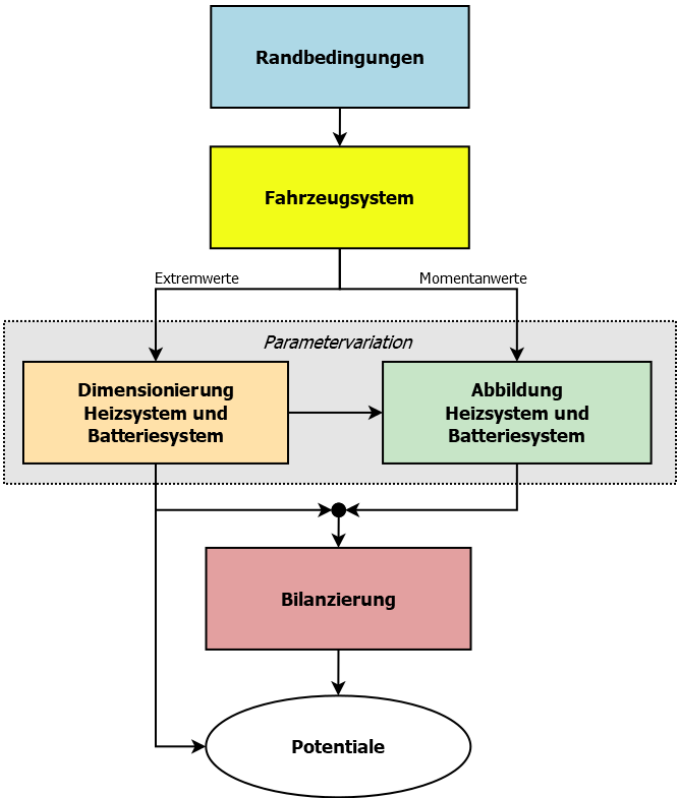


Abbildung 9: Schematische Darstellung des strukturellen Aufbaus des Auslegungstools und der Auslegungsmethodik

Grundlegend besteht das Auslegungstool aus fünf verschiedenen Grundbausteinen: Randbedingungen, Fahrzeugsystem, Dimensionierung Heizsystem und Batteriesystem, Abbildung Heizsystem und Batteriesystem und zuletzt Bilanzierung. Die Umsetzung des Tools erfolgt in der Modellsprache Dymola / Modelica.

Hinsichtlich der Integration des THS wurden im Projekt verschiedene Varianten diskutiert. Thermisch kann der Speicher entweder über ein Luftverteilsystem oder einen Wasserkreislauf in das Fahrzeug integriert werden. Strukturell besteht die Möglichkeit, den Speicher entweder zentral, also als einzelne Komponente platziert an einer Stelle, oder dezentral, also aufgeteilt in mehrere Komponenten verteilt im Fahrzeug einzubringen. Grundsätzlich ist der Wärmeaustrag an einen Wasserkreislauf als bevorzugtest System zu bewerten. Der Speicher kann hierdurch tiefer entladen werden, was die Energiedichte steigert. Außerdem kann die Wärme einfacher im Fahrzeug verteilt werden, wodurch eine zentrale Anordnung des Speichersystems begünstigt wird. Herausforderung ist jedoch die Entwicklung eines Verdampfersystems, welches gut geeignet zum steuerbaren Wärmeaustrag über den vollständigen Temperatur-Range des Speichersystems von ca. 100 °C bis 650 °C ist. Beim Wärmeaustrag an Luft ist eine zentrale Anordnung des Speichersystems nur bei kleineren Fahrzeuginnenräumen sinnvoll, wenn die Luftverteilung im Innenraum eine untergeordnete Rolle spielt. Aufgrund des zum Zeitpunkt des Projekts noch geringen Entwicklungsstandes eines Verdampfersystems zur Anbindung an einen Wasserkreislauf, wurde entschieden, die Betrachtungen mit einem Luftwärmeaustragssystem durchzuführen. Als Anordnung wurde aufgrund der eher geringen thermischen Speicherkapazität von 25,5 kWh eine zentrale Variante bevorzugt. Abbildung 10 zeigt schematisch die Einbindung eines Thermischen Hochleistungsspeichers mittels Luftwärmeübertrager.

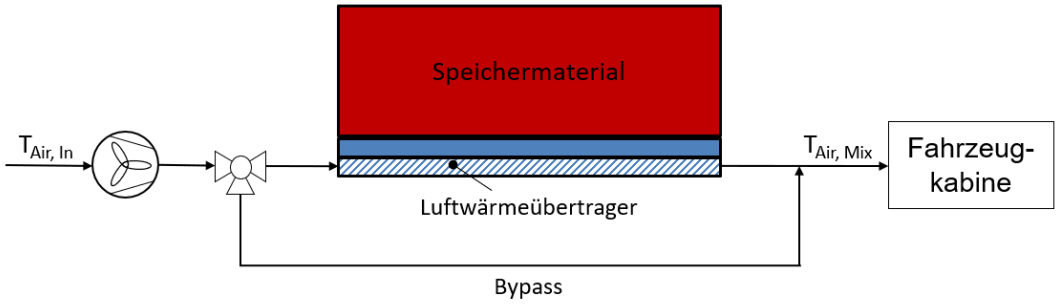


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Einbindung des Thermischen Hochleistungsspeichers in das Fahrzeugsystem auf Basis eines Luftwärmeübertragers

Das nach Entwicklungsstand im Projekt leichteste Speichersystem zur Bereitstellung einer Energiemenge von ca. 25,5 kWh, bei einer thermischen Austragsleistung von 10 kW und einer elektrischen Aufheizleistung von 10 kW, hat eine Masse von ca. 155,7 kg. Dies entspricht einer bei maximaler Leistung nutzbaren Energiedichte von ca. 165,5 Wh/kg. Bei geringeren Wärmeaustragsleistungen erhöht sich die Energiedichte entsprechend, dies wurde jedoch nicht berechnet. Das kleinste Speichersystem hat ein Volumen von ca. 103,8 l und besitzt damit eine nutzbare volumetrische Energiedichte von ca. 248,1 Wh/l. Auch hier kann sich die Energiedichte im Teillastbetrieb deutlich erhöhen. Die Gesamtabmessungen des Speichers betragen ca. 583 mm x 583 mm x 235 mm. Der konzeptionelle Aufbau und die Grundlegende Abmessungen des ausgelegten Speichersystems sind in Abbildung 11 abgelegt.

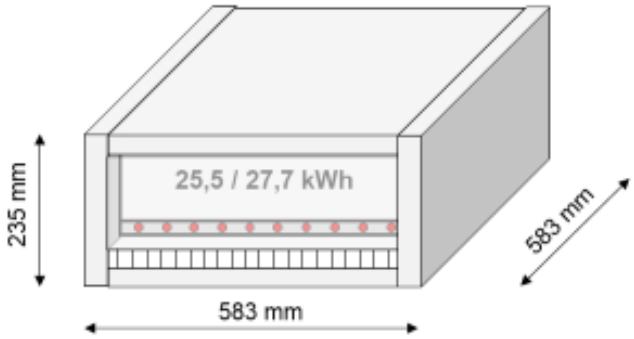


Abbildung 11: Konzeptionelle Abbildung und grundlegende Abmessungen des ausgelegten Thermischen Hochleistungsspeichers

4.2.2. AP 2200: Anpassung Güterkapsel (Potentiale Holzleichtbau)

Ziel des Arbeitspaketes war die virtuelle Entwicklung einer Kapsel für gekühlte Güter mit hohem Anteil an nachwachsenden Rohstoffen zur Steigerung der Nachhaltigkeit.

Anforderungen an die Güterkapsel ergaben sich aus dem Schnittstellendesign, dem Bauraum, den Abmessungen und der Beladung. Weitere Anforderungen ergaben sich aus der benötigten Isolationsleistung für eine Tiefkühlkapsel mit T_{innen} = -20 °C und einem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von 0,330 W/(m²*K) bzw. für eine Frischekapsel mit T_{innen} = +0 °C und U-Wert von 0,490 W/(m²*K). Auslegungsrelevantes Szenario war ein *Sommertag* mit $T_{außen}$ = 30 °C über 3 h mit einer vorkonditionierten Kapsel und einer Ladungslöschung innerhalb von 3 h.

Ein eigens entwickeltes Excel-Tool zur Berechnung des U-Werts der Kapsel zeigte früh, dass Bauraumrestriktionen an den Seitenwänden aufgrund der Schenkelbreite des Driveboards (maximale Stärke der Seitenwände von 50 mm) in Kombination mit der vergleichsweise etwas schlechteren Isolierwirkung von holzbasierten Dämmstoffen (holzbasierte Dämmstoffe: λ = 0,038 W/mK; PUR-

Schaum: λ = 0,028 W/mK) dazu führen, dass bei der Tiefkühlkapsel an den Seitenwänden unverhältnismäßig viel Wärme in die Kapsel eingetragen wird, welche durch verstärkte Isolation an anderer Stelle nicht ausgeglichen werden kann. Eine Tiefkühlkapsel war damit technisch nicht sinnvoll realisierbar. Eine Frischekapsel ließ sich hingegen gut realisieren.

Die Frischekapsel wurde mit Fokus auf den Einsatz holzbasierter Werkstoffe konzipiert und im CAD konstruiert. Dabei wurde der Aufbau modular gestaltet, so dass bei einer möglichen Produktion folgende Varianten innerhalb derselben Produktionslinie umsetzbar wären:

- Variante 1: Güterkapsel ohne zusätzliche Dämmung oder Kühlung,
- Variante 2: Frischekapsel mit Dämmung ohne aktive Kühlung,
- Variante 3a: Frischekapsel mit Dämmung und aktiver Kühlung,
- Variante 3b: Frischekapsel mit Dämmung, Thermohaube und aktiver Kühlung.

Variante 1 entspricht dabei einer einfachen Güterkapsel und stellt somit das Grundmodell aller weiteren Varianten dar. Dabei wird ein Grundrahmen auf eine holzbasierte Transportplattform montiert. Wandmodule sowie die Decke sind in Sandwichbauweise mit Hohlräumen im Inneren ausgeführt und werden an den Grundrahmen angebracht. Durch den Fokus auf Modulbauweise, Einsatz von Norm- und Gleichteilen soll eine schnelle und kostengünstige Produktion sichergestellt werden. Der Einsatz regenerativer Werkstoffe erhöht die Nachhaltigkeit wo immer möglich. Die Kapsel ist anwendungsnah auskonstruiert. Es befinden sich u.a. Transportsicherungen und Schrammschutzbleche im Inneren oder eine Box an der Außenseite der Stirnwand zum Transport von Spanngurten, Keilen, etc.

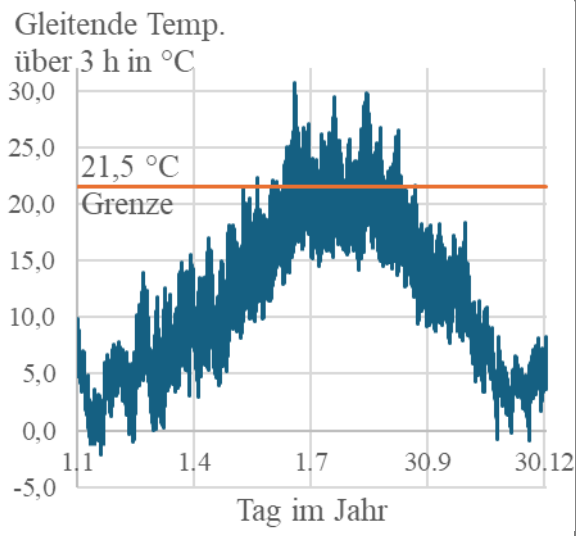
Variante 2 entspricht der ersten Ausbaustufe. Im Vergleich zu Variante 1 sind jedoch die Hohlräume im Aufbau durch einen holzbasierten Dämmstoff gefüllt. Die gedämmte Kapsel kann so den Temperaturunterschied zwischen Umgebung und Kapselinneren länger aufrechterhalten. Aufgrund des Verzichts auf ein Klimatisierungsmodul sind die Kosten vergleichsweise gering. Dafür kann aber weder aktiv gekühlt werden, noch der benötigte Temperaturbereich für eine Frischekapsel gehalten werden. Ein sinnvolles Einsatzgebiet wäre hier der Transport von ungekühlten aber dennoch temperaturempfindlichen Gütern, wie bspw. von Medikamenten oder Kosmetika.

Variante 3a ist gegenüber Variante 2 mit einem Klimatisierungsmodul ausgestattet. Dieses besteht aus Batteriemodulen, Kühlaggregat, Sensoren, Steuergerät sowie HMI mit Drucker. Die Dimensionierung erfolgte auf Basis der Anforderungen. Potentielle Komponenten wurden anschließend nach aktuellem Stand der Technik ausgewählt und stammen aus dem Bereichen Pedelec, Transportwesen sowie Schiffsnavigation. Gesamtkosten werden zu 7.500 € berechnet, wobei mit 5.400 € ein Großteil für die Klimasplitanlage benötigt werden.

Der U-Wert der gedämmten Kapsel beträgt lediglich 0,689 W/(m²*K). Die Kapsel ist damit schlechter isoliert als eine klassische Frischekapsel. Die Auswirkungen im Realbetrieb unter Berücksichtigung der Dauer bis zur Ladungslöschung von max. 3 h wären, dass eine maximale Außentemperatur von $T_{außen}$ = 21,5 °C nicht überschritten werden dürfte, um zu gewährleisten, dass die Innentemperatur T_{innen} = +0 °C konstant gehalten werden kann. Temperaturdaten vom Deutschen Wetterdienst am Beispiel der Wetterstation Stuttgart Schnarrenberg (SDO_ID = 4928) gemittelt über den 5-Jahreszeitraum vom 01.01.2021 bis zum 31.12.2025 zeigen, dass über einen 3 h Zeitraum gleitende Temperaturen von 21,5 °C oder mehr lediglich von Mai bis September erreicht werden (siehe Abbildung 12 links). In der Detailbetrachtung zeigt sich, dass in den letzten Jahren im Mai die Überschreitung der Temperatur von 21,5 °C nur 5-mal und nur an 2 Tagen erreicht werden (siehe Abbildung 12 rechts). Hier könnte durch geeignete Betriebsstrategie sichergestellt werden, dass Frischegüter mit der Variante 3a weiterhin ordnungsgemäß transportiert werden könnten. In den Monaten Juni bis September hingegen isoliert die Variante 3a nicht ausreichend gegenüber

den hohen Temperaturen. Aufgrund der globalen Klimaänderung ist tendenziell mit einer Erhöhung an warmen Tagen auch früher im Jahr zu rechnen. Die generelle Aussage, dass es Monate gibt, an denen Variante 3a ausreichend ist, bleibt dabei bestehen.

Durchschnittliche Temperaturdaten Stuttgart gleitender Wert über 3 h



Anzahl der Werte / Tage nach Monat

Monat	Anzahl Werte über 21,5 °C	Anzahl Tage über 21,5 °C
Januar	0	0
Februar	0	0
März	0	0
April	0	0
Mai	5	2
Juni	270	25
Juli	293	30
August	286	30
September	71	10
Oktober	0	0
November	0	0
Dezember	0	0

Abbildung 12: Temperaturdaten Stuttgart (links) und dessen Auswertung (rechts)

Vorteilig ist dabei, dass das Kapselgewicht mit 537,3 kg deutlich unter der Referenz von 601,6 kg liegt (-10,7 %). Dieser Vorteil kann dabei 8 von 12 Monaten im Jahr ausgenutzt werden und reduziert die zum Warentransport benötigte Energie.

Variante 3b ist gegenüber Variante 3a mit einer zusätzlichen Thermohaube ausgestattet. Diese besteht aus drei Modulen mit jeweils etwa 23 kg und können schnell und einfach an Variante 3a angebracht werden. Die Module sind aus einer biobasierten Kunststofffolie und mit Holzdämmwolle gefüttert. Zudem werden an den Türen 20 mm starke Dämmpaneele eingehängt. Zusammen wird so die thermische Isolationswirkung an den Türen, am Dach sowie an den oberen Bereichen der Seitenwänden derart erhöht, dass der gesamte U-Wert der Kapsel auf 0,490 W/(m²*K) sinkt – was auch dem Wert der Referenz entspricht. Damit können Frischegüter nun auch von Juni bis September ordnungsgemäß transportiert werden. Das Kapselgewicht übersteigt mit 609,9 kg leicht das Gewicht der Referenz (+1,4 %). Ebenfalls nachteilig ist die größere projizierte Fläche, die zu in einem größeren Luftwiderstand führt.

In Tabelle 3 werden die einzelnen Varianten, deren Gewichte, deren Anteil an nachwachsenden Werkstoffen (Gewicht Bauteile aus nachwachsenden Werkstoffen durch Gesamtgewicht ohne Berücksichtigung des Klimatisierungsmoduls) sowie der daraus abgeschätzte Global Warming Potential (GWP) der eingesetzten Werkstoffe gegenübergestellt. Die Werte einer nach Stand der Technik denkbaren Kapsel in klassischer Stahlrahmenbauweise mit GFK-PUR-GFK-Wände ist als Referenz aufgeführt.

Tabelle 3: Vergleich der Referenz mit Varianten V1, V2, V3a & V3b

Parameter	Referenz	V1	V2	V3a	V3b
Gesamtgewicht in kg	601,6	493,8	535,8	537,3	609,9
Anteil nachw. Rohstoffe in gew.-%	0,0	64,3	65,0	64,9	65,9
GWP-Werkstoffe in kg CO_2eq / kg	2712,9	1395,2	1520,8	1525,2	1628,3

In Abbildung 13 ist das finale Konzept der Variante 3b als Rendering zu sehen. Einige Baugruppen oder -teile sind zum besseren Verständnis benannt. Zudem wird dort Einblick ins Innere der Wände gewährt, um den holzbasierten Aufbau besser darzustellen. Zur besseren Visualisierung des restlichen Aufbaus wurde die Holzfaserdämmung ausgeblendet. Diese füllt alle Hohlräume in den Wänden aus.

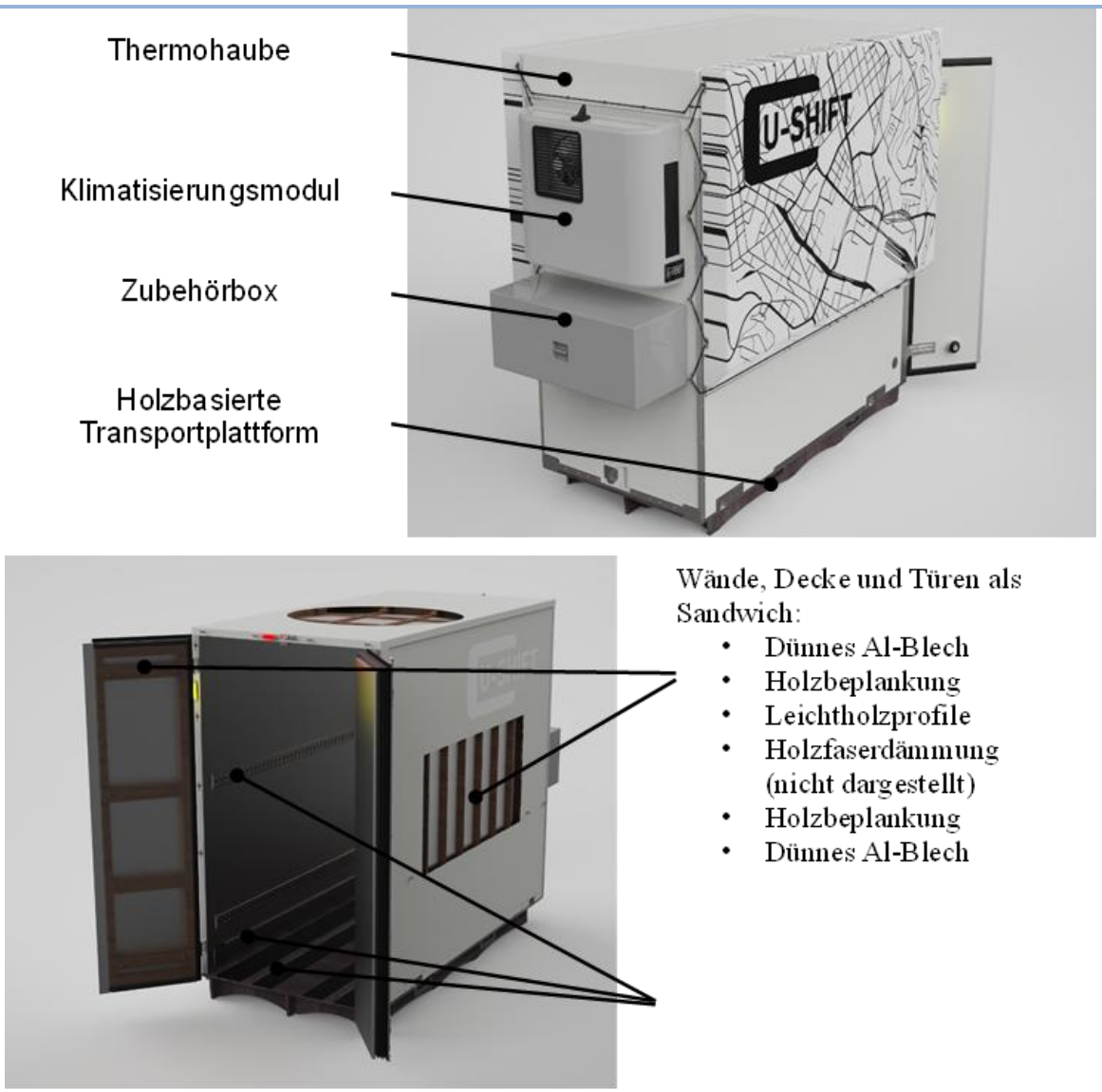


Abbildung 13: Frischekapsel Variante 3b mit Baugruppenbennenung (oben) sowie Ausschnitte zur Visulisierung der Details (unten) (Bild: DLR, CC BY-ND)

In Zusammenarbeit mit der Firma Ligenium GmbH wurde als tatsächlicher Demonstrator eine holzbasierte Transportplattform konzipiert, konstruiert, berechnet und im Anschluss von Ligenium gefertigt (siehe Abbildung 14). Diese dient als Mehrzweck-Bodenstruktur und kann unterschiedlichste Aufbauten aufnehmen. Beispiele hierfür sind neben der Frischekapsel auch generell geschlossene Kapselaufbauten, Hängeraufbauten, Pritschenaufbauten, etc.

Die Transportplattform ist selbstragend und nur an kritischen Stellen mit Metall hybridisiert Der Anteil an holzbasierten Werkstoffen liegt bei 73 Gewichtsprozent – was in etwa 95 Volumenprozent entsprechen. Die Plattform trägt dabei bis zu 3 EU-Paletten oder 1520 kg, was in Belastungsversuchen nachgewiesen werden konnte.

Abbildung 14: Holzbasierte Transportplattform mit Messe-Unterbau (Bild: DLR, CC BY-ND)

4.3. Driveboard (AP 3000)

Das AP 3000 „Driveboard“ umfasste die Entwicklung und Integration der wesentlichen Fahrzeugkomponenten und -systeme des U-Shift-II-Driveboards. Die Arbeiten reichten von der Gesamtstruktur und Fahrwerksintegration über Antrieb, Traktionsbatterie sowie Energie- und Thermomanagement bis hin zu den Grundfahrfunktionen und der strukturellen Sicherheit. Ziel war ein funktionsfähiges Driveboard welches die Anforderungen aus der Systemauslegung umsetzt und erfüllt.

4.3.1. AP 3100 Gesamtstruktur Komponentenintegration und Karosserie

Das Arbeitspaket AP 3100 umfasste die Konstruktion, Fertigung, Montage und finale Integration der Driveboard-Karosserie sowie deren Abstimmung mit allen wesentlichen Subsystemen des U-Shift II Fahrzeugs. Die Arbeiten bauten auf den im Vorprojekt definierten Packaging-Vorgaben und den iterativen Designschritten auf.

Abbildung 15: U-Shift II Rahmen Frontansicht (links) und Heckansicht (rechts) (Bild: DLR, CC BY-ND)

Die Karosseriestruktur des Driveboards wurde erfolgreich erstellt und stand somit für die Montage anderer Komponenten zur Verfügung. Im Laufe des Projekts wurden virtuelle Mock-ups mehrfach iteriert, um Bauräume für die größten Bauteile (E-Motoren, Energiespeicher, Fahrwerk, Hubmechanismus) optimal zu nutzen und mechanische Schnittstellen zur Kapsel präzise zu definieren. Die strukturelle Sicherheit wurde durch FEM-Simulationen validiert, wobei Lagerpunkte, Krafteinleitungen und Ersatzmassen für Großkomponenten wie die Traktionsbatterie berücksichtigt wurden.

Abbildung 16: Batterierahmen (links), Stellprobe Cargokapsel (rechts) (Bild: DLR, CC BY-ND)

Die physische Integration des Gesamtfahrzeugs erfolgte am KIT sowie am FKFS. In mehreren Iterationsphasen wurden wesentliche Komponenten aus den Arbeitspaketen Antriebssystem (AP 3300), Fahrwerk (AP 3200), Elektrik/Elektronik (AP 4000) und Automatisierung (AP 5000) in die Karosserie eingebaut. Dabei wurden Änderungen an einzelnen Komponenten, insbesondere am Fahrwerk, virtuell simuliert und am Demonstrator umgesetzt. Es zeigte sich, dass notwendige Anpassungen am Fahrwerk keine signifikanten Änderungen an der Karosseriestruktur erforderten,

da diese bereits robust ausgelegt war. Lediglich bei einer Anpassung der Vorderachse mussten Verstärkungsteile in die Rahmenstruktur integriert werden, was die strukturelle Integrität bestätigte.

Der letzte Schritt war die Integration einer einfachen Außenhaut zum Schutz vor Witterungseinflüssen und Verletzungen. Danach waren nur noch kleine, projektbegleitende Anpassungen an Karosserie und Außenhaut notwendig.

Die Komponentenintegration war damit erfolgreich abgeschlossen. Das Driveboard verfügt über eine stabile Karosseriestruktur, die alle definierten Subsysteme sicher aufnimmt und die erforderlichen mechanischen sowie elektrischen Schnittstellen für den Betrieb mit den verschiedenen Kapselvarianten (Personen- und Güterkapseln) bereitstellt. Die strukturelle Sicherheit wurde durch Tests und Simulationen bestätigt, wodurch das Fahrzeug betriebsbereit für die weiteren Systemtests und Demonstrationsszenarien ist.

4.3.2. AP 3200: Fahrwerkssystem inkl. Lenkung und Hubmechanismus

In Abbildung 16 ist der Fahrzeugrahmen mit allen Fahrwerkskomponenten zu sehen. Die einzelnen Systeme, Fahrschemel, Vorderachsradaufhängung, Lenkung, Hub sowie die Hinterachse werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

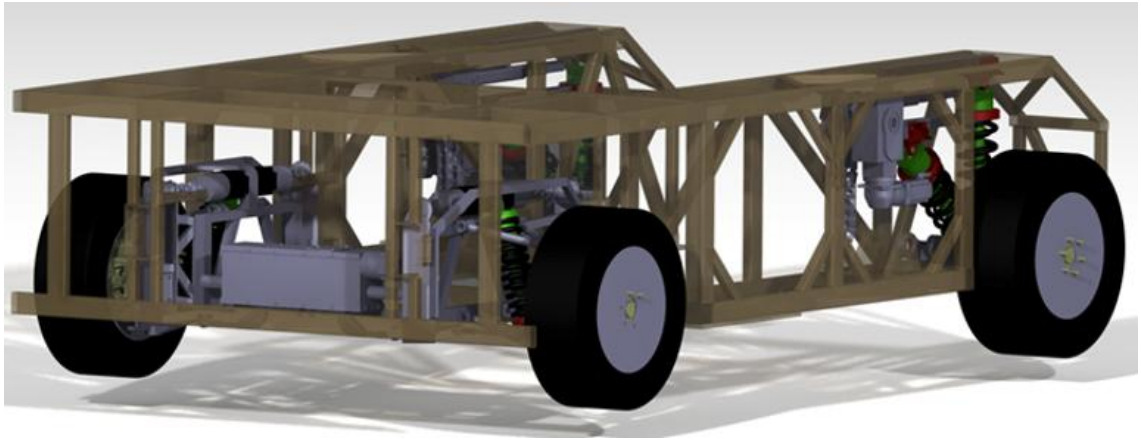


Abbildung 17: CAD-Modell vom Fahrzeugrahmen und der Fahrwerkskomponenten

Fahrschemel der Vorderachse

An der Vorderachse kommt ein Hilfsrahmen, der Fahrschemel, zum Einsatz und verbindet das Fahrwerk der Vorderachse inklusive des Lenkgetriebes mit dem Rahmen des Aufbaus. Beim Hubvorgang bewegt sich lediglich der Fahrzeugschemel relativ zum Rahmen, so dass die Querlenker nicht bewegt werden und sich die Fahrwerksgeometrie nicht verändert. Dadurch können Sturz- und Spurweitenänderungen weitestgehend vermieden werden. In Abbildung 18 ist der Fahrschemel dargestellt und die Konsolen für die Querlenker sowie das Federbein sind auf der rechten Seite erkennbar. Diese Konsolen übertragen alle Kräfte des Fahrwerks und sind entsprechend massiv ausgeführt. Die vier diagonal angeordneten Platten für die Montage der Hubaktoren sind links und rechts erkennbar.

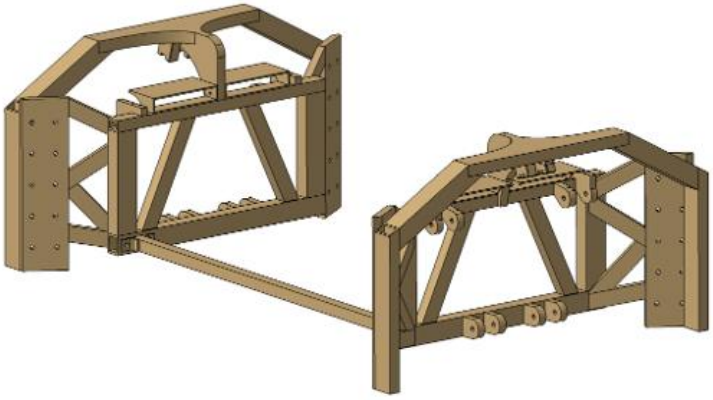


Abbildung 18: CAD-Modell des Fahrschemels

Radaufhängung der Vorderachse

Die Radaufhängung ist als Doppelquerlenker mit einem am unteren Querlenker montiertem Feder-Dämpfer-Bein ausgeführt. Das Doppel-Querlenker-Einzelradaufhängungskonzept vereint dabei geringe Komplexität mit sehr guten Radführungseigenschaften und ermöglicht große Lenkwinkel. Da der untere Querlenker somit auch die Vertikalkräfte des Fahrwerks überträgt, ist dieser im Vergleich zum oberen Querlenker massiver ausgeführt. Der Radträger führt im Gegensatz zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen nicht das Rad direkt, sondern den Radnabenmotor, weshalb Aussparungen für Strom-, Kühl-, und Bremsleitungen vorgesehen wurden.

Im Laufe des Projektes musste die Konstruktion der Radaufhängung aufgrund von veränderten Randbedingungen angepasst werden. Die neue Konstruktion, siehe Abbildung 19, wurde dabei auf Grundlage der gegenüber dem Design-Freeze erhöhten realen Massen und Lasten des Fahrzeugs ausgelegt. Die Querlenker und insbesondere der Radträger wurde robuster ausgeführt und es wurden Traggelenke und Spurstangenköpfe aus dem PKW/NFZ-Bereich verbaut. Weiterhin ist der obere Querlenker in der neuen Ausführung zweigeteilt, wodurch eine Längenänderung und somit die Einstellung des Sturzes möglich ist.

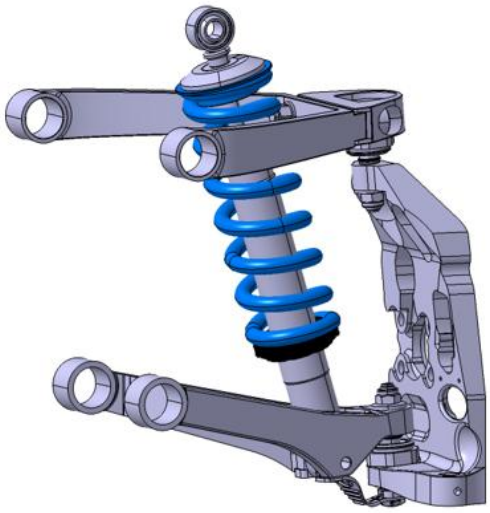


Abbildung 19: CAD-Modell der neuen Radaufhängung

Lenkgetriebe und -gestänge

Das im Projekt entwickelte Lenkgetriebe wird von einem Servomotor angetrieben und verfährt die Mittenabgriffe in Querrichtung. Im Inneren übertragen Zahnriemen das Drehmoment des Servomotors auf Kugelgewindetriebe, an dessen Spindelenden die Mittenabgriffe befestigt sind. Das Lenkgetriebe verfügt darüber hinaus noch über zwei elektrisch schaltbare Kupplungen und eine Zahnradstufe, wodurch auch die Drehrichtungsumkehr einer Spindel und damit ein gegensinniger Lenkeinschlag möglich ist. Da das Lenkgetriebe vor der Lenkachse untergebracht werden musste, werden Umlenkhebel zum Ausgleich des Längsversatz eingesetzt.

Im Laufe des Projektes wurden das Lenkgetriebe durch Austausch einzelner Komponenten optimiert und so die Steifigkeit des Systems erhöht und der Verschleiß reduziert. Weiterhin wurde im Zuge der Überarbeitung der Radaufhängung auch die Lenkgeometrie angepasst. Damit liegen die Komponenten des Lenkgestänges in einer Ebene und Störmomente sind reduziert.

Durch die asymmetrische Gestaltung des Umlenkhebels werden Kollisionen mit dem Fahrwerk verhindert. Weiterhin weist die neue Geometrie eine optimierte Lenkfehlerkurve auf. Das neue Lenkgestänge (siehe Abbildung 20), die angepasste Geometrie sowie die Spurstangenköpfe (radträgerseitiges Kugelgelenk) reduzieren dabei das Spiel in der Lenkung.

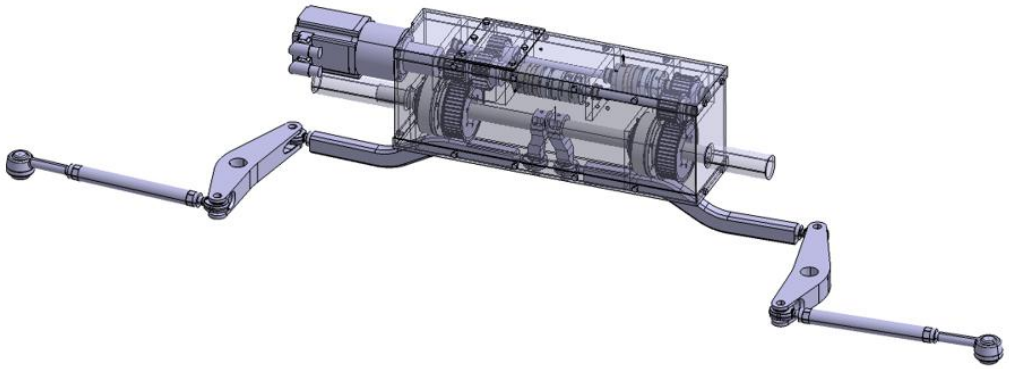


Abbildung 20: CAD-Modell des Lenkgetriebes und Lenkgestänge mit transparentem Gehäuse

Hubmechanismus der Vorderachse

Der Hubmechanismus der Vorderachse ist mittels vier Hubaktoren umgesetzt, die zwischen dem Fahrzeugrahmen und dem Fahrschemel platziert sind, siehe Abbildung 21. Die Komponenten des Aktors sind in zwei Teilsysteme aufgeteilt, welche sich jeweils ortsfest zum Fahrschemel und dem Fahrzeugrahmen verhalten. Durch die Relativbewegung zwischen diesen Teilsystemen wird die Hubbewegung realisiert. Das Führungsgehäuse wird zwischen der Profilschiene mit dem Fahrschemel verschraubt und trägt die Seilwinde sowie die Lagerung, in welche die Arretierungsbolzen einrasten. Auf dem Fahrschemel ist auch der Getriebeservomotor montiert, der die Seilwinde über ein Kardangelenk antreibt. Auf dem rahmenseitig verschraubtem Umlaufwagen befindet sich die Aufnahme für die Seilenden und der Arretierungsmechanismus, der parallel zur Profilschiene in einer eigenen Kammer des Führungsgehäuses verfahren wird.

Beim Hubprozess wird zuerst die Arretierung gelöst, indem die (Hub-) Seile angezogen werden, um die Arretierungsbolzen lastfrei zu stellen. Anschließend ziehen die Hubmagnete die Arretierungsbolzen mittels des Seilzugs aus dem Führungsgehäuse. Näherungssensoren kontrollieren dabei die Position der Bolzen und geben das Ablassen des Aufbaus frei, wenn alle Bolzen gelöst sind. Die Servomotoren der Seilwinde kontrollieren dabei die schwerkraftbedingte Abwärtsbewegung des Aufbaus, bis der Rahmen auf dem Fahrschemel aufliegt. Beim Anheben wird der Aufbau durch die Seilwinden angehoben, bis die federgelagerten Arretierungsbolzen einrasten.

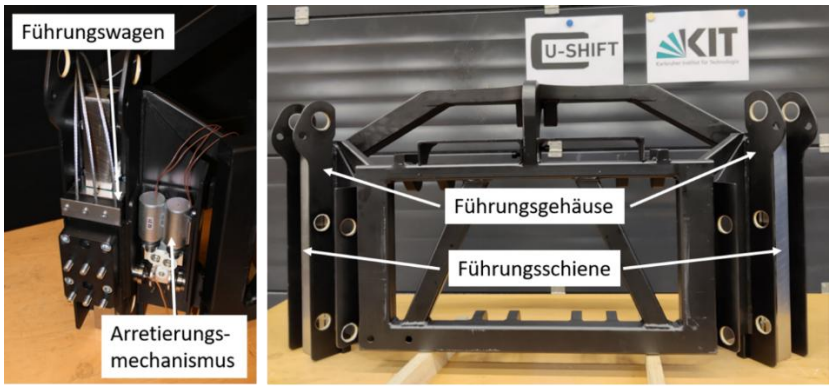


Abbildung 21: Detailansicht des Hubaktors (links) und vormontiert auf einer Fahrschemelhälfte (rechts)

Fahrwerk und Hubmechanismus der Hinterachse

Das Fahrwerk der Hinterachse befindet sich jeweils in den schmalen Schenkeln der Rahmenkonstruktion. Aufgrund des verfügbaren Bauraums wurde eine Längslenker-Konstruktion mit einem vertikal angeordneten Federbein und innenliegendem Dämpfer umgesetzt. Die Idee einer gelenkten Hinterachse musste aufgrund des zusätzlichen Platzbedarfs und den geringen nutzbaren Lenkwinkeln verworfen werden.

Der Hubmechanismus wurde mit Hilfe der rahmenseitigen Aufnahme des Federbeins realisiert. Die das Federbein tragende Konsole ist auf einem Umlaufwagen verschraubt und kann in Längsrichtung durch eine Schubkette verschoben werden. Diese drucksteife Kette erlaubt dabei sowohl Zug- als auch Schubbewegungen des Umlaufwagens, ohne dass die Kette dabei einknickt.

Diese Positionsänderung resultiert im Verkippen des Federbeins und damit dem Absenken und Anheben des Aufbaus. In Abbildung 22 ist die Hinterachse mit vertikal ausgerichtetem und verkipptem, Federbein dargestellt. Der Arretierungsmechanismus befindet sich zwischen Umlaufwagen und Federbeinkonsole und ist funktional identisch zu dem der Vorderachse.

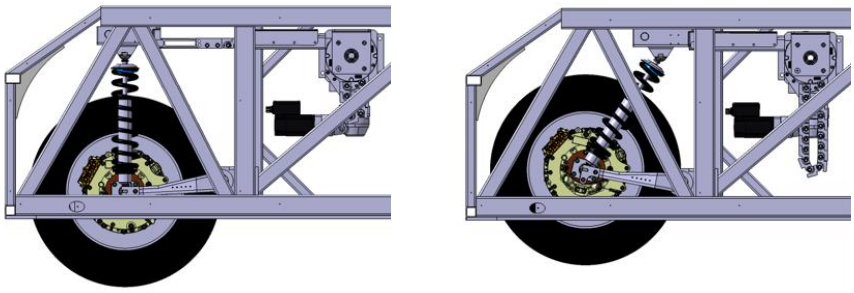


Abbildung 22: Fahrwerk der Hinterachse, mit vertikal ausgerichtetem und verkipptem Federbein

4.3.3. AP 3300: Antriebssystem Motor, Umrichter, Bremse

Das Arbeitspaket AP 3300 umfasste die Entwicklung, Integration und Inbetriebnahme des elektrischen Antriebssystems des Driveboards. Ziel war die Bereitstellung eines vollständig integrierten Antriebssystems einschließlich Radnabenmotoren, Leistungselektronik und Bremssystem als Grundlage für den manuellen und automatisierten Fahrzeugbetrieb. Neben der mechanischen Integration standen insbesondere die elektrische Einbindung, die Kommunikation mit der zentralen Fahrzeugsteuerung sowie die Validierung der Antriebskomponenten im Gesamtsystem im Fokus.

Ein Prüfstandsaufbau für Motor und Umrichter ermöglichte die Untersuchung verschiedener Eigenschaften des elektrischen Antriebssystems unter reproduzierbaren Bedingungen. Dabei wur-

den elektrische, mechanische und thermische Betriebsgrößen erfasst und für die spätere Systemparametrierung genutzt, beispielsweise zur Bestimmung von Wirkungsgradkennfeldern der elektrischen Maschinen. Die gewonnenen Mess- und Integrationsdaten bildeten eine wesentliche Grundlage für die Auslegung von Softwarefunktionen und reduzierten potenzielle Integrationsrisiken bereits vor der Implementierung im Gesamtfahrzeug. Insbesondere flossen die ermittelten Antriebsdaten in die Parametrierung des Energie- und Thermomanagements sowie der fahrdynamischen Regelungsfunktionen ein. Durch die vorgelagerte Erprobung unter kontrollierten Bedingungen können die Systemintegration und die Inbetriebnahme im Gesamtfahrzeug effizient umgesetzt werden. Abbildung 23 zeigt den verwendeten Prüfstandsaufbau.

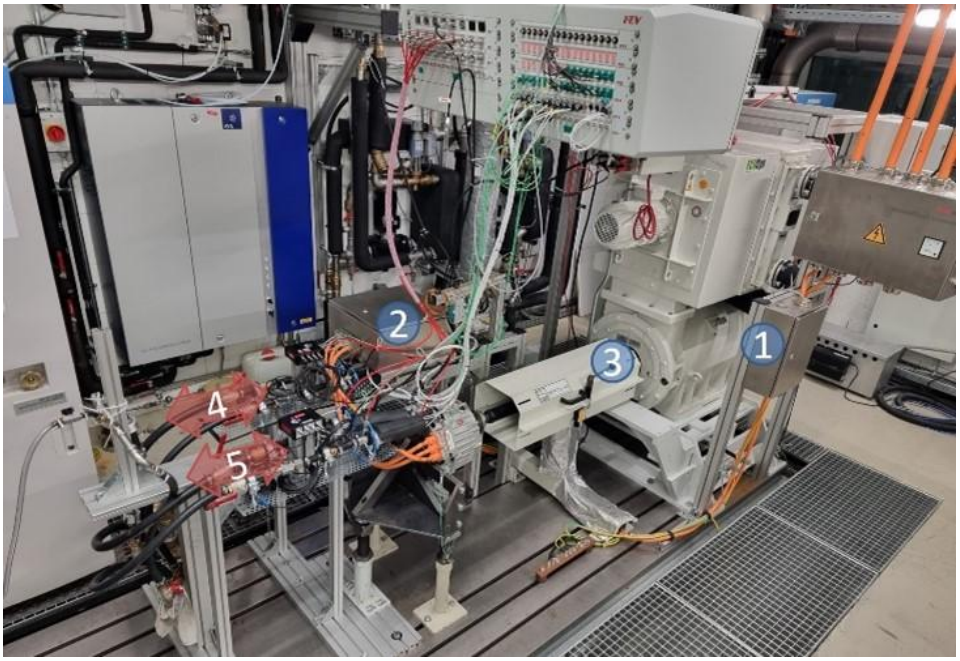


Abbildung 23: Prüfstandsaufbau mit Messstellen:
1: Spannung und Strom am Inverter Eingang,
2: Spannung und Strom am Inverter Ausgang / Motor Eingang,
3: Drehmoment und Drehzahl am Abtrieb des Radnabenmotors. Druck und Temperatur an 4 bzw. 5

Auf Basis der Voruntersuchungen erfolgte die Integration der Antriebskomponenten in das Driveboard. Die Radnabenantriebe mit den integrierten Bremssystemen sowie die zugehörigen Inverter wurden an den vorgesehenen Positionen an Vorder- und Hinterachse installiert. Ergänzend wurden die Hochvolt-, Niedervolt- und Kommunikationsleitungen vollständig in das Fahrzeug integriert. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Auslegung geeigneter Kabelführungen und Halterungen, um die Leitungen insbesondere im Bereich der Hubmechanik vor mechanischen Belastungen zu schützen und gleichzeitig eine wartungsfreundliche Systemintegration sicherzustellen. Abbildung **24** zeigt den Einbau der Motoren und Inverter im Driveboard.

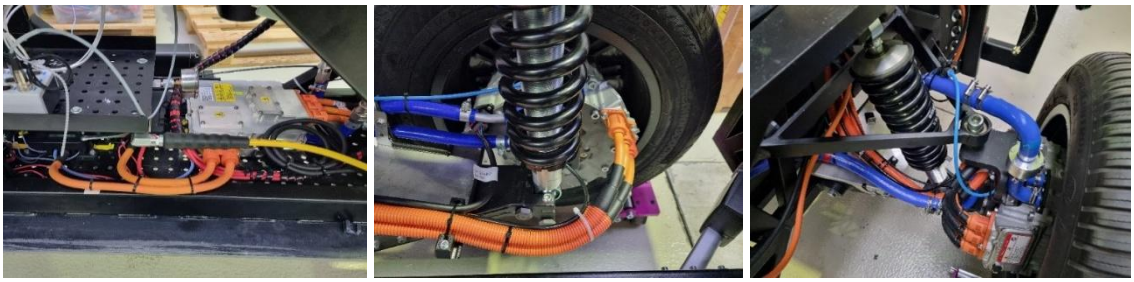


Abbildung 24: Einbau der Motoren (mitte, rechts) und Inverter (links) im Fahrzeug

Die Ansteuerung der Antriebssysteme erfolgt radindividuell über eine Schnittstelle zur Fahrzeugsteuerung und ermöglicht unterschiedliche Betriebsmodi sowie parametrierbare Dynamikvorgaben. Alle Antriebseinheiten sind individuell regelbar und stellen relevante Zustands- und Diagnosedaten bereit. Diese Informationen werden von der übergeordneten Fahrzeugsteuerung zur Betriebsüberwachung, Ansteuerung und Umsetzung von Sicherheitsfunktionen genutzt.

Das integrierte elektrische Antriebssystem erfüllt die Anforderungen des U-Shift-II-Demonstrators hinsichtlich Funktionalität, Schnittstellenfähigkeit und Betriebssicherheit. Es bildet damit eine wesentliche Grundlage für die automatisierten Fahrfunktionen sowie die Arbeiten zur Bewegungsregelung und Systemvalidierung im Gesamtfahrzeug.

4.3.4. AP 3400: Traktionsbatterie – System inkl. Batteriemanagementsystem (BMS)

Das Arbeitspaket AP 3400 umfasste die Integration des Traktionsbatteriesystems einschließlich Batteriemanagementsystem (BMS), Ladeinfrastruktur und Energieverteilung in das Driveboard des U-Shift-II-Demonstrators. Ziel war die Bereitstellung eines zuverlässigen Energiesystems, das einen sicheren Fahrzeugbetrieb ermöglicht, die Kommunikation mit der zentralen Fahrzeugsteuerung sicherstellt und die Grundlage für den automatisierten Betrieb bildet.

Abbildung **25** zeigt einen frühen Testaufbau wesentlicher Komponenten des Energiesystems. Dieser umfasste die 48-V-Batterie bestehend aus einzelnen Batteriemodulen, das zentrale BMS-Modul sowie das Ladegerät zur Versorgung und Ladung des Batteriesystems, welche so im späteren Driveboard zum Einsatz kommen. Die entwickelte Software zur Überwachung und Steuerung des Batteriemanagements sowie des Ladevorgangs verarbeitet die verfügbaren Sensorsignale der Komponenten und steuert darauf basierend Sicherheitsfunktionen sowie die Ladeparameter. Zusätzlich beinhaltet die Software die erforderlichen Initialisierungs- und Kommunikationsabläufe.

Abbildung 25: Mobiler Testaufbau des Batterieracks (1: Batteriemodule, 2: BMS Modul) und des Ladegeräts (3)

Ergänzend umfasst das Energiesystem einen fahrzeugspezifischen 48-V-Energieverteiler, der entsprechend der Anforderungen des Driveboards ausgelegt und zusätzlich mit Lüftern gekühlt ist.

Dabei berücksichtigt das Konzept sämtliche relevanten elektrischen Verbraucher sowie die erforderliche Absicherung der einzelnen Versorgungspfade. Die entwickelte Energieverteilung ermöglicht eine strukturierte Versorgung der Fahrzeugkomponenten und unterstützt gleichzeitig Wartbarkeit, Erweiterbarkeit und Betriebssicherheit des Gesamtsystems.

Die Integration des Batteriesystems in das Driveboard ist teilweise in Abbildung 26 dargestellt. Das Batterierack, der Energieverteiler sowie die Ladeinfrastruktur sind an den vorgesehenen Positionen im Fahrzeug integriert und elektrisch miteinander verbunden. Die einzelnen Komponenten bilden einen gemeinsamen Systemverbund und sind über definierte Schnittstellen mit der zentralen Fahrzeugsteuerung gekoppelt.

Abbildung 26: Einbau des Batterieracks (links), Energieverteilung und Absicherung 48 V (mittig), Ladestecker im Driveboard (rechts)

Das Batteriesystem stellt die Energieversorgung aller elektrischen Verbraucher sicher und bildet damit eine wesentliche Grundlage für den Betrieb des Demonstrators. Das Batteriemanagementsystem stellt kontinuierlich relevante Zustandsinformationen bereit, die von übergeordneten Fahrzeugfunktionen zur Überwachung und Absicherung des Betriebs genutzt werden. Dadurch werden sowohl ein sicherer Fahrzeugbetrieb als auch ein kontrollierter und zuverlässiger Ladeprozess ermöglicht.

Das integrierte Traktionsbatteriesystem mit Batteriemanagement, Ladefunktion und Energieverteilung erfüllt die Anforderungen des Driveboards hinsichtlich Funktionalität, Betriebssicherheit und Integrationsfähigkeit. Es bildet damit eine wesentliche Systemkomponente für den zuverlässigen Betrieb der Fahrzeugfunktionen während der Erprobung und Demonstration.

4.3.5. AP 3500: Energie- und Thermomanagement, Kühlung

Das Arbeitspaket AP 3500 umfasste die Entwicklung und Integration des Energie- und Thermomanagements für das Driveboard des U-Shift-II-Demonstrators. Ziel war die Auslegung eines zuverlässigen Kühlsystems, das die thermisch relevanten Fahrzeugkomponenten innerhalb der jeweils zulässigen Temperaturbereiche bei gleichzeitig hoher Betriebssicherheit betreibbar macht. Neben der mechanischen Systemauslegung standen insbesondere die Entwicklung der Regelungsstrategie sowie die vollständige Integration in die Fahrzeugsteuerung im Fokus.

Grundlage der Entwicklung bildeten Untersuchungen an einem Kühlsystemprüfstand sowie Erkenntnisse aus der mechanischen und thermischen Vermessung der Antriebskomponenten (Motor, Inverter) auf einem Prüfstand. Die daraus gewonnenen Ergebnisse flossen in die Auslegung des hydraulischen Kühlsystems ein. Eine parallel ausgeführte detaillierte 3D-Modellierung ermöglichte frühzeitige Untersuchungen hinsichtlich Leitungsführung, Komponentenpositionierung und Integration in das Gesamtfahrzeug. Bereits während der Auslegung wurden Strömungsverhältnisse und Druckverluste analysiert und zur Optimierung des Systems berücksichtigt. Abbildung **27** zeigt das CAD-Modell des Kühlsystems, welches die spätere Integration im Fahrzeug widerspiegelt.

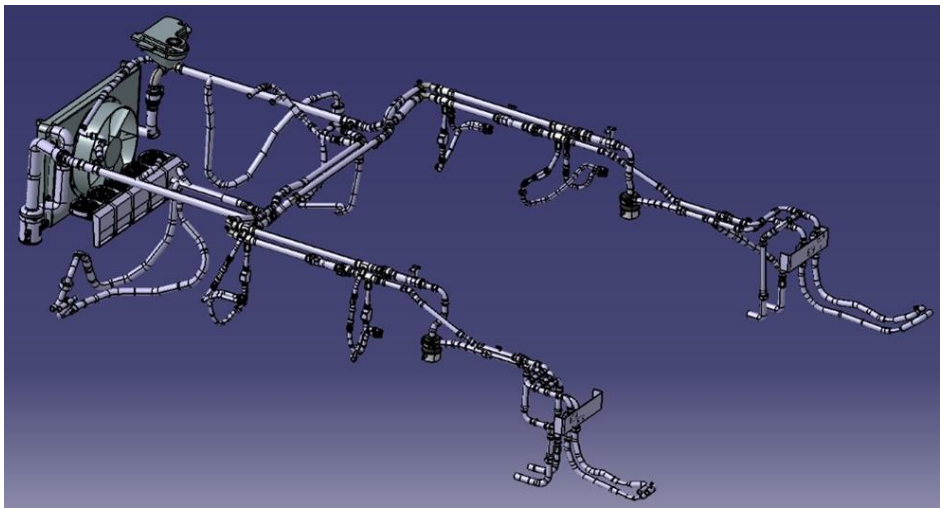


Abbildung 27: CAD-Modell Kühlsystem

Zur Sicherstellung des notwendigen Kühlmittelmassenstroms umfasst das Kühlsystem eine Hauptpumpe, zwei Zusatzpumpen sowie vier kleine Pumpen, die an jeweils aufgabenbezogen geeigneten Stellen innerhalb des Kühlkreislaufes angeordnet sind. Durch die Drehzahlregelung der Haupt- und Zusatzpumpen kann eine bedarfsgerechte und gleichmäßige Temperaturführung der Komponenten erreicht werden. Die hierfür erforderlichen elektrischen und steuerungstechnischen Schnittstellen sind an die zentrale Fahrzeugsteuerung angebunden. Die Regelungssoftware ist in der Software des zentralen Steuergerätes integriert.

Das hydraulische System besteht aus einer Kombination aus Edelstahlleitungen und flexiblen Schlauchverbindungen (in Abbildung 28 blau dargestellt) und umfasst sieben Pumpen, einen Kühler mit elektrischem Lüfter, sechs Messboxen zur Erfassung thermischer und hydraulischer Zustandsgrößen inkl. Aktoransteuerung, einen zentralen Ausgleichsbehälter sowie integrierte Entlüftungsmöglichkeiten und Filter zur Vereinfachung von Befüllung und Wartung. Abbildung 28 zeigt die Integration ausgewählter Komponenten des Kühlsystems im Fahrzeug.

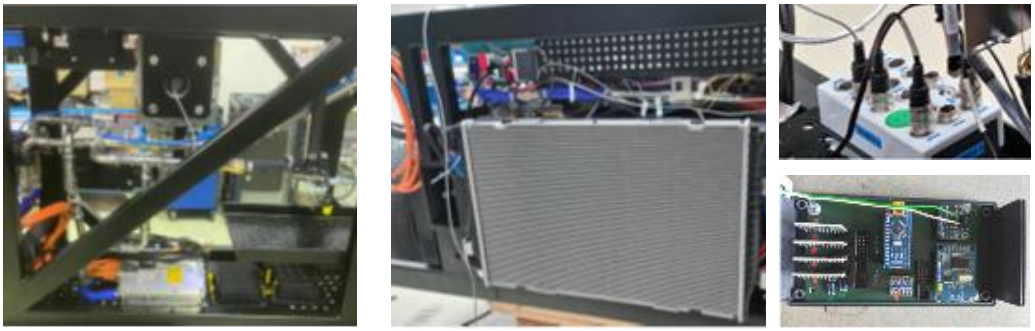


Abbildung 28: Links Kühlsystem Einbau im Schenkel mit sichtbarer Zusatzpumpe, Mitte Kühler mit Hauptpumpe, Rechts Messboxen sowie Innenleben.

Die Messboxen erfassen zentrale Systemgrößen wie Temperatur, Druck und Durchfluss, stellen diese der zentralen Fahrzeugsteuerung bereit und steuern die Pumpen an. Auf dieser Plattform erfolgt die Regelung des Kühlsystems. Basierend auf einem entwickelten Regelungsmodell werden die Sensordaten kontinuierlich verarbeitet und die angeschlossenen Aktoren bedarfsgerecht angesteuert. Dadurch wird die Temperatur der thermisch relevanten Fahrzeugkomponenten innerhalb der definierten Betriebsbereiche gehalten.

Im Rahmen umfangreicher Fahrzeugerprobungen wurde die Zuverlässigkeit des integrierten Energie- und Thermomanagements validiert. Das Gesamtsystem erreichte eine Betriebsdauer von deut-

lich über 50 Stunden ohne funktionale Ausfälle und erfüllt die Anforderungen hinsichtlich Temperaturregelung und Betriebssicherheit in vollem Umfang. Die entwickelte Regelungssoftware ist vollständig in die zentrale Fahrzeugsteuerung integriert und ermöglicht eine robuste thermische Regelung unter realen Betriebsbedingungen. Die Regelungssoftware kann am Hardware-in-the-Loop (HiL)-Prüfstand optimiert werden und dann auf das Fahrzeug übertragen werden.

Mit Abschluss des Arbeitspakets stand ein vollständig integriertes und validiertes Thermomanagementsystem zur Verfügung, welches die thermische Stabilität der relevanten Fahrzeugkomponenten sicherstellt. Das entwickelte System erfüllt die Anforderungen des U-Shift-II-Demonstrators hinsichtlich Funktionalität, Robustheit und Integration.

Der zweite Teil des Arbeitspakets AP 3500 umfasste die Entwicklung des Energiemanagements und der Betriebsstrategie für das Driveboard des U-Shift-II-Demonstrators. Ziel war die energieverbrauchsminimale Koordination der Antriebsstrangkomponenten durch den Aufbau eines elektrischen Simulationsmodells des Driveboards einschließlich der elektrischen Verbraucher sowie die Offline-Optimierung der Betriebsstrategie.

Grundlage der Entwicklung bildete ein detailliertes Simulationsmodell des elektrischen Antriebssystems. Die verwendeten Komponentenmodelle basieren auf den experimentellen Untersuchungen der angrenzenden Arbeitspakete.

Das Batteriemodell wurde anhand der in AP 3400 ermittelten Kennfelder aufgebaut und beschreibt unter anderem das Spannungsverhalten sowie den Ladezustand (State of Charge, SoC) der Batterie. Das Modell des Radnabenantriebs basiert auf den in AP 3300 experimentell ermittelten Kennfeldern der integrierten Antriebseinheit einschließlich des Getriebes. Die weiteren elektrischen Verbraucher und Steuergeräte wurden entsprechend den Ergebnissen des ersten Teils von AP 3500 in das Gesamtmodell integriert. Abbildung 29 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der Simulationsumgebung. Die Längsdynamiksimulationen werden auf Basis eines aus dem New York City Cycle (NYCC-LD) abgeleiteten Fahrzyklus durchgeführt.

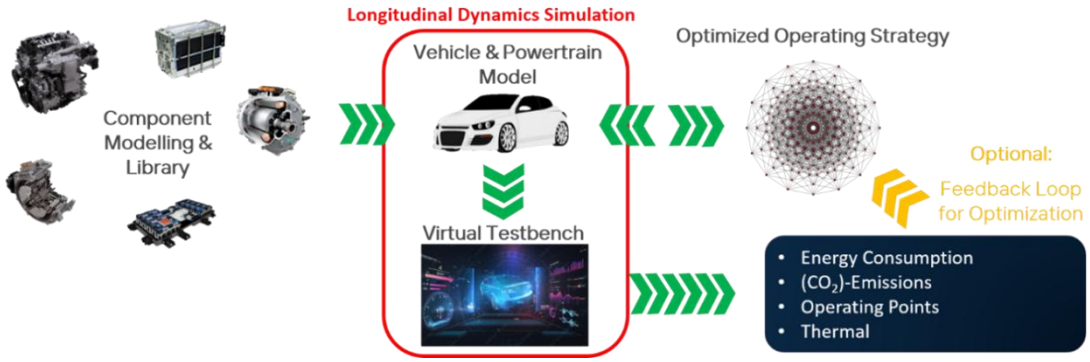


Abbildung 29: Aufbau der Längsdynamiksimulation und der Optimierung

Das Modell ermöglicht die Abbildung der Energieflüsse unter realitätsnahen Betriebsbedingungen und bildete die Grundlage für die Entwicklung und Optimierung der Betriebsstrategie.

Im Rahmen der Längsdynamiksimulation erfolgte die Offline-Optimierung der Betriebsstrategie. Dabei wurden die Betriebsgrenzen der einzelnen Komponenten, wie beispielsweise die Drehmoment- und Drehzahlgrenzen der elektrischen Maschine, die Grenzen der Batterie sowie die Traktionsgrenzen berücksichtigt. Für die Umsetzung der Betriebsstrategie wird ein auf der Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) basierender Optimierungsansatz verwendet. Die Parameter der Betriebsstrategie wurden offline optimiert, um für jeden Betriebspunkt eine energieoptimierte Leistungsverteilung zu bestimmen. Die entwickelte Betriebsstrategie ist vollständig in das Simulationsmodell integriert und ermöglicht die Bewertung des Energieverbrauchs entlang vorgegebener Fahrzyklen.

Mit Abschluss des Arbeitspakets stand ein vollständig integriertes Simulationsmodell des elektrischen Antriebssystems einschließlich der implementierten Betriebsstrategie zur Verfügung. Damit war die Grundlage für die Umsetzung des Energiemanagements und der resultierenden Betriebsstrategie im Driveboard geschaffen.

4.3.6. AP 3600: Grundfahrfunktion – Motion Control

Das Arbeitspaket AP 3600 umfasste die Entwicklung der Grundfahrfunktionen sowie der Motion-Control-Architektur für den U-Shift-II-Demonstrator. Ziel war die Bereitstellung einer echtzeitfähigen und modularen Fahrzeugsteuerung, welche die Grundfunktionen des Fahrzeugs mit einer hochgenauen Fahrzeugzustandsschätzung und Trajektorienfolgeregelung kombiniert. Dadurch werden sowohl der manuelle Fahrbetrieb als auch die automatisierte Durchführung hochpräziser Fahrmanöver, insbesondere für das An- und Abkoppeln der Fahrzeugkapseln, ermöglicht. Zur frühzeitigen Untersuchung und Validierung der Schnittstelle zwischen Trajektorienplanung und Regelung wurde zudem eine Kombination aus Software-in-the-Loop- (SiL) und HiL-Simulation eingesetzt [22].

Die Grundfahrfunktionen umfassen die Ansteuerung der Antriebe, der Bremsanlage, der Lenkung, des Hubsystems sowie weiterer Aktoren, die für den Kapselwechsel erforderlich sind. Die Steuerungsfunktionen sind auf dem zentralen Steuergerät implementiert und bilden die Basis für den Fahrzeugbetrieb. Neben der eigentlichen Aktoransteuerung umfasst die Software die Initialisierung der Fahrzeugkomponenten, definierte Bootabläufe sowie die Kommunikation zwischen den beteiligten Steuergeräten. Ergänzend sind Funktionen für das Batteriemanagement, die Lichtsteuerung sowie sicherheitsrelevante Mechanismen, darunter Not-Aus-, Not-Halt- und Fernübernahmefunktionen, integriert.

Grundlage der Fahrzeugautomatisierung bildet eine modulare Motion-Control-Architektur, welche die Fahrzeugzustandsschätzung und die Trajektorienfolgeregelung über klar definierte Schnittstellen miteinander verbindet. Beide Module werden synchron auf einer zentralen Echtzeitplattform ausgeführt und stellen die Verbindung zwischen der übergeordneten Bewegungsplanung und den unterlagerten Aktorregelungen her. Abbildung 30 zeigt die Gesamtarchitektur der Fahrzeugzustandsschätzung, Trajektorienfolgeregelung und Stellgrößenallokation.

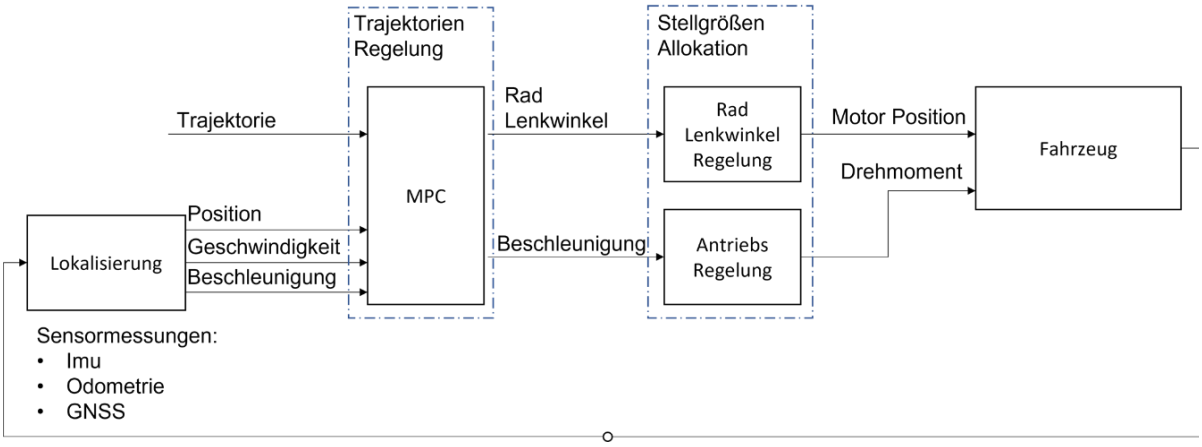


Abbildung 30: Übersicht der Motion Control Gesamtstruktur mit den entsprechenden Systemen

Ein wesentlicher Bestandteil der Motion Control ist die hochgenaue Fahrzeugzustandsschätzung. Hierzu kommt ein erweiterter Kalman-Filter (EKF) zum Einsatz, der Messdaten einer Inertialmesseinheit, eines RTK-fähigen GNSS-Systems sowie der Raddrehzahlsensoren fusioniert. Durch die Kombination der unterschiedlichen Sensordaten können Position, Geschwindigkeit und Fahrzeugorientierung auch bei temporär eingeschränkter GNSS-Verfügbarkeit robust und konsistent ge-

schätzt werden. Insbesondere im Niedriggeschwindigkeitsbereich, der für das Projekt von zentraler Bedeutung ist, stellt die Zustandsschätzung die für Planung und Regelung erforderlichen Fahrzeugzustände mit hoher Genauigkeit bereit. Abbildung 31 zeigt Ergebnisse der Lokalisierung bei eingeschränkter GNSS-Verfügbarkeit.

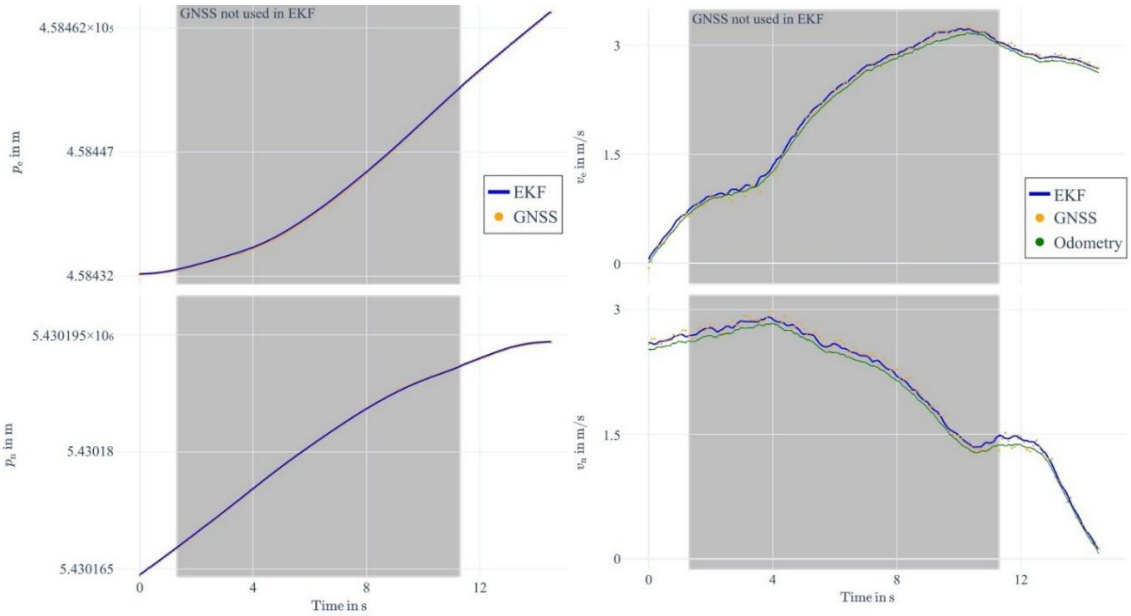


Abbildung 31: Messergebnisse des EKF bei eingeschränkter Verfügbarkeit von Sensorik für Position (links) und Geschwindigkeiten (rechts)

Für die Trajektorienfolgeregelung erfolgte eine Untersuchung verschiedener Regelungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für die Anforderungen des Fahrzeugs. Auf Grundlage dieser Analyse wird eine nichtlineare modellprädiktive Regelung (NMPC) als zentrales Regelungsverfahren eingesetzt und kontinuierlich weiterentwickelt. Die Regelung berücksichtigt Fahrzeug- und Aktuatorgrenzen explizit innerhalb der Optimierung und berechnet Stellgrößen für die Rad-Lenkwinkeländerungsrate sowie die Längsbeschleunigung. Zur Erhöhung der Robustheit gegenüber Modellabweichungen, mechanischem Spiel und Aktuatorverzögerungen berücksichtigt die Optimierung geeignete Strategien sowie weiche Nebenbedingungen.

Die Kommunikation zwischen Bewegungsplanung, Motion Control und den unterlagerten Aktorregelungen erfolgt über klar definierte Schnittstellen. Dabei werden die in AP 5000 erarbeiteten Methoden zur Trajektorienplanung [7, 13, 14] kontinuierlich von der Bewegungsplanung bereitgestellt und an die Motion-Control-Ebene übergeben. Diese verarbeitet die geplanten Trajektorien unter Berücksichtigung der aktuellen Fahrzeugzustände und stellt die berechneten Stellgrößen den unterlagerten Regelkreisen zur Verfügung.

Im Rahmen umfangreicher Fahrzeugversuche erfolgt die Validierung des Gesamtsystems unter realen Einsatzbedingungen. Die Ergebnisse zeigen eine zuverlässige Fahrzeugzustandsschätzung, ein stabiles Regelverhalten sowie eine präzise Trajektorienverfolgung bei unterschiedlichen Startpositionen und Fahrmanövern. Insbesondere bei den für U-Shift II relevanten Niedriggeschwindigkeitsmanövern werden geringe Quer- und Orientierungsfehler sowie eine hohe Wiederholgenauigkeit erreicht, während sämtliche Fahrzeug- und Aktuatorgrenzen zuverlässig eingehalten werden. Die Echtzeitfähigkeit der Regelungsarchitektur konnte auf der eingesetzten Hardware nachgewiesen werden; die erzielten Rechenzeiten ermöglichen einen kontinuierlichen Fahrzeugbetrieb ohne Einschränkungen. Abbildung 32 zeigt die automatisierte Aufnahme einer Fahrzeugkapsel aus drei unterschiedlichen Startpositionen sowie die dabei auftretenden Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlich gefahrener Trajektorie.

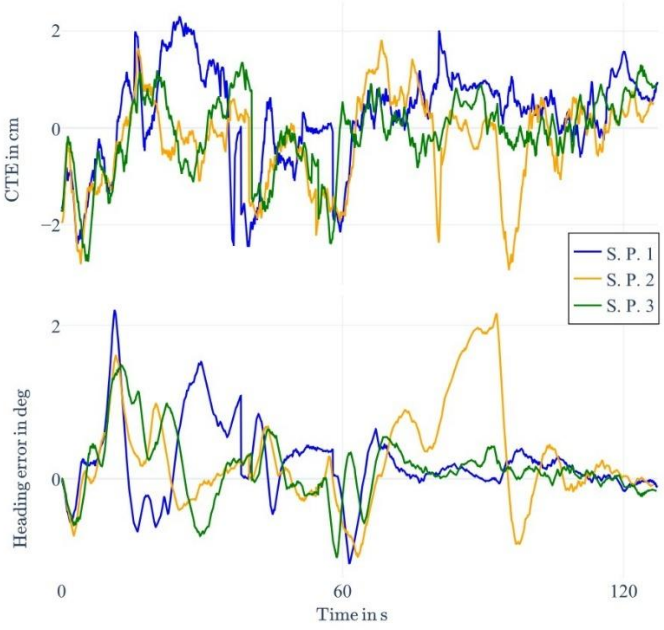


Abbildung 32: Kapselaufnahme aus drei unterschiedlichen Startpositionen sowie Winkel- / und Laterale Abweichung

Mit Abschluss des Arbeitspakets steht eine vollständig integrierte Motion-Control-Plattform zur Verfügung, welche die Grundfahrfunktionen, die Fahrzeugzustandsschätzung und die Trajektorienfolgeregelung in einer modularen Echtzeitarchitektur vereint. Damit bildet sie die Grundlage für den hochpräzisen automatisierten Betrieb des U-Shift-II-Fahrzeugs und insbesondere für die automatisierte Durchführung des Kapselwechsels. Eine detaillierte Beschreibung der implementierten Verfahren zur Lokalisierung und Trajektorienfolgeregelung ist in [26] zu finden.

4.3.7. AP 3700: Strukturelle Sicherheit

Das Arbeitspaket AP 3700 hatte zum Ziel, die strukturelle Integrität und Sicherheit des U-Shift II-Fahrzeugs über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu gewährleisten. Die Arbeiten umfassten die Definition der Lastfälle, die Durchführung iterativer Finite-Elemente-Methode (FEM)-Simulationen sowie die experimentelle Validierung im Rahmen der Gesamtintegration.

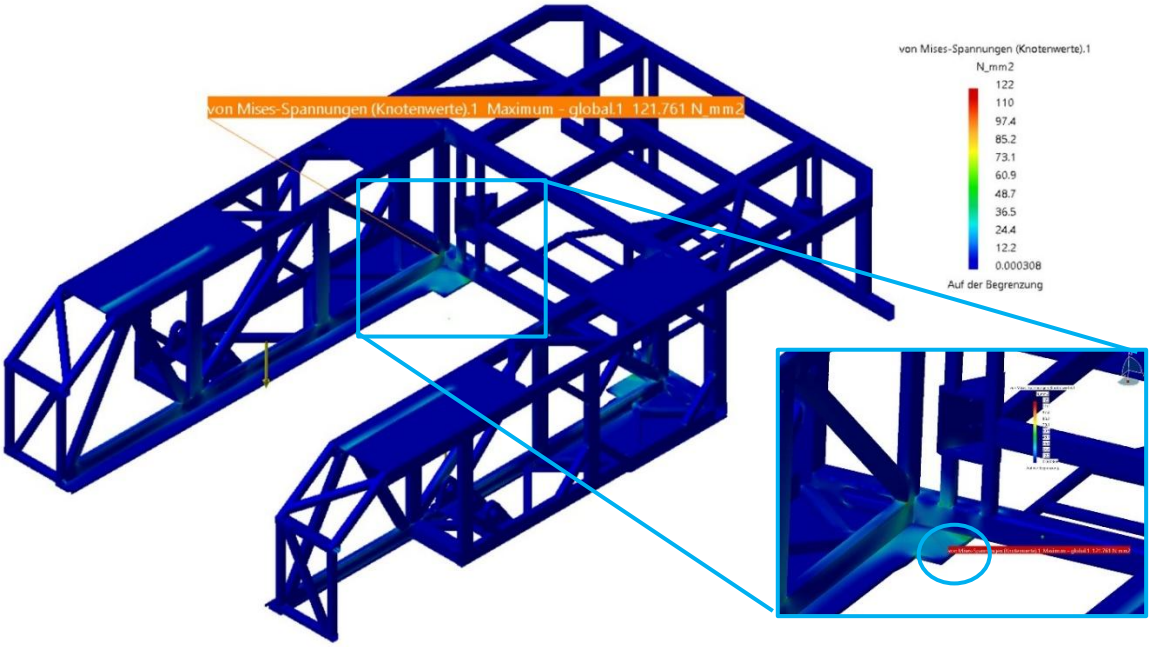


Abbildung 33: Von-Mises-Spannungen am Driveboard beim Lastfall „statische Simulation des Kapselgewichts"

Die strukturelle Auslegung des Rahmens und der Karosserie basierte auf FEM-Simulationen, die in enger Abstimmung mit dem Konstruktionsprozess (AP 3100) durchgeführt wurden. Als Randbedingungen wurden alle relevanten Kräfte und Lagerpunkte definiert, darunter:

- Lagerpunkte des Fahrwerks (Vorder- und Hinterachse)
- Krafteinleitungen in die Struktur
- Ersatzmassen für Großkomponenten („Big Blocks") wie die Traktionsbatterie und die E-Motoren
- Statische und dynamische Lasten der Personenkapsel sowie der Güterkapsel

Die Simulationen analysierten die Spannungsverteilung unter verschiedenen Belastungsrichtungen (x, y, z), um kritische Bereiche zu identifizieren. Die hier dargestellte Simulation wurde mit CATIA-FEM (CATIA V5-6R2024) und einer Diskretisierung mit 8 mm parabolischen Tetraedern durchgeführt. Der Lastfall „Belastung mit Kapselgewicht" entspricht einer Simulation eines Kapselgewichts von 30kN auf die Auflagefläche im Driveboard. Die Überprüfung dient der statischen Festigkeitssimulation der spezifischen Auflageschiene und dem umgebenden Rahmenbereich. Durch wiederholte Iterationen zwischen Konstruktion und Simulation konnte eine optimale Materialverteilung erreicht werden, die sowohl die Festigkeitsanforderungen als auch die Gewichtsziele erfüllte. Wie in Abbildung 33 zu sehen, liegen alle Spannungen deutlich unter den zulässigen Höchstspannungen bei einem Maximum im U mit 122 N/mm², was einem unkritischen Zustand entspricht, sodass kein Materialversagen zu erwarten ist.

Während der physischen Integration aller Subsysteme zeigte sich, dass notwendige Anpassungen an den Fahrwerkskomponenten (insbesondere an der Vorderachse) die strukturelle Sicherheit nicht beeinträchtigten. Um die geänderten Lastpfade abzusichern, wurden gezielt Verstärkungsteile in die Rahmenstruktur des Vorderwagens integriert. Diese modifizierte Rahmenstruktur wurde erneut simuliert und die Ergebnisse bestätigten, dass die strukturelle Sicherheit trotz der Änderungen gewährleistet bleibt.

Mit Abschluss des Arbeitspakets AP 3700 wurde die strukturelle Sicherheit des U-Shift II-Fahrzeugs rechnerisch durch FEM-Analysen gewährleistet. Auch praktisch wurde die strukturelle Sicherheit durch die erfolgreiche Integration aller Systeme und Testfahrten nachgewiesen. Das Fahrzeug verfügt über eine stabile Karosseriestruktur, die allen definierten Sicherheitsanforderungen entspricht und den sicheren Betrieb mit variierenden Kapseltypen ermöglicht.

4.4. Elektrik/Elektronik (AP 4000)

Das AP 4000 „E/E-Architektur" umfasste die Entwicklung und Integration der elektrisch/elektronischen und softwareseitigen Systemarchitektur des U-Shift-II-Fahrzeugkonzepts, das als modulare Plattform prototypisch umgesetzt wurde. Die Arbeiten reichten von der Entwicklung der E/E-Architektur über die serviceorientierte Softwarearchitektur sowie deren Einsatz für modulare Fahrzeugkonzepte und spezifische E/E-Safetymechanismen bis hin zu Connectivity und Diagnose. Ziel war eine funktionsfähige E/E-Architektur, welche die Anforderungen aus der Systemauslegung umsetzt und erfüllt.

4.4.1. AP 4100: E/E-Architektur

Zu Beginn des Arbeitspakets wurden in enger Abstimmung mit den Projektpartnern die Systemanforderungen an die E/E-Architektur identifiziert und dokumentiert. Grundlage hierfür waren die Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt U-Shift I sowie die in U-Shift II definierten Projektziele.

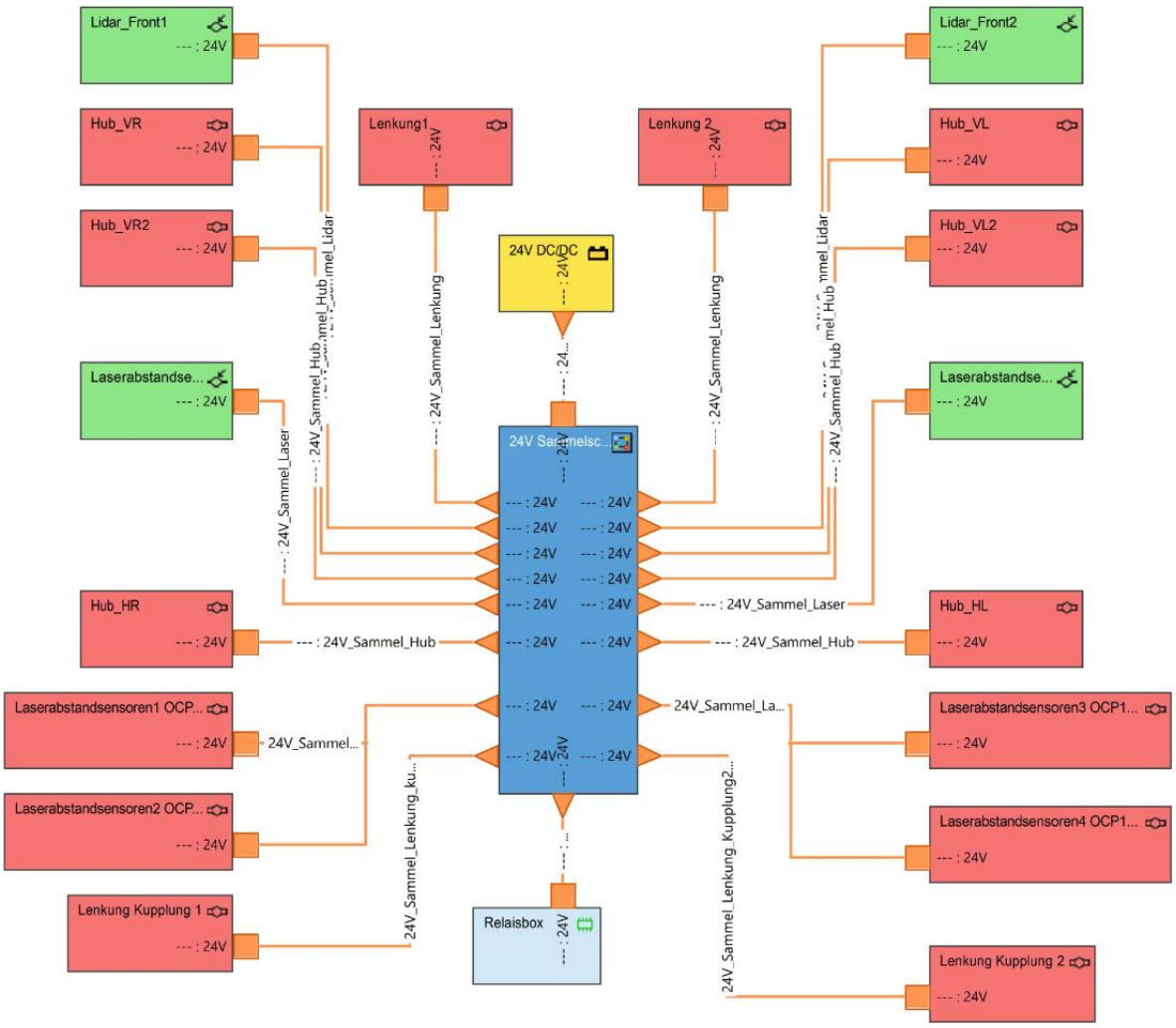


Abbildung 34: 24V Bordnetz (generiert mit PREEVision)

Auf Basis dieser Anforderungen (drei Spannungsebenen, Energieversorgung, Antrieb etc.) und der zur Umsetzung der Projektziele notwendigen Komponenten (GNSS-Sensorik, Automatisierungsrechner, Konnektivität etc.) wurde die logische Funktionsarchitektur mit dem Werkzeug PREEVision der Firma Vector Informatik modelliert. Abbildung 34 zeigt einen Auszug der Modellierungsergebnisse am Beispiel des 24-V-Bordnetzes und dessen Vernetzung. Die Konzeptionierung um-

fasste unter anderem die Ladeschnittstelle sowie die Vernetzung aller notwendigen Geräte. Zugleich wurden damit die Rahmenbedingungen für das Variantenmanagement geschaffen, das in AP 4200 umgesetzt wurde. In diesem Zuge wurden die zum Fahrzeugbetrieb notwendigen Steuergeräte ausgewählt und der Kapselkonnektor spezifiziert, über den die Kommunikation zwischen Driveboard und Kapsel erfolgt. Zur Auslegung und anschließenden Integration des Leitungsstrangs wurden Lastflussanalysen durchgeführt. Auf deren Grundlage wurden die notwendigen Leitungsquerschnitte berechnet und die elektrische Absicherung aller Verbraucher dimensioniert. Die Analysen erfolgten sowohl komponentenbezogen (z. B. Relais, DC/DC-Wandler) als auch ortsbezogen. Um eine zuverlässige Auslegung zu gewährleisten, wurden die Berechnungen basierend auf DIN VDE 0298-4 und DIN VDE 0100-430 durchgeführt.

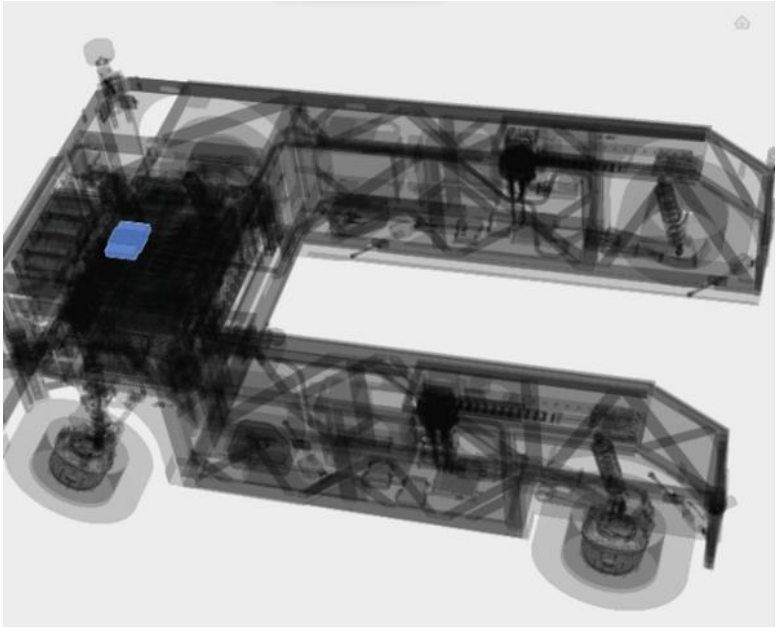


Abbildung 35: CAD Tool für E/E-Integration

Aufbauend auf der Modellierung wurde ein CAD-gestütztes Werkzeug entwickelt, das den E/E-Aufbau von Prototypen mit geringer Stückzahl unterstützt (Abbildung 35). Für die Kommunikation zwischen Steuergeräten, Hochleistungsrechnern sowie Sensoren und Aktoren wurde ein hybrider Ansatz aus Ethernet und CAN-Bus realisiert. Ethernet eignet sich durch seine Flexibilität, Geschwindigkeit und Skalierbarkeit insbesondere für die serviceorientierte Architektur aus AP 4200. Der CAN-Bus stellt ergänzend einen hart echtzeitfähigen, regelbasierten Kommunikationspfad für sicherheitsrelevante Systeme bereit, beispielsweise Motoren, Batteriesteuerung und Betriebsbremsen und war damit eine wesentliche Grundlage für die Umsetzung der Safety-Konzepte aus AP 4300. Darüber hinaus wurde eine Boot- und Shutdown-Reihenfolge definiert und umgesetzt, die einen reproduzierbaren Start- und Endzustand des Driveboards gewährleistet. Die entwickelten Konzepte wurden erfolgreich in den Demonstrator integriert und getestet, die Auslegung und Absicherung des Bordnetzes haben sich im Betrieb bewährt.

4.4.2. AP 4200: Service-orientierte Architektur (SOA)

Als Basis für die Umsetzung einer serviceorientierten Architektur (SOA) auf modularen Fahrzeugplattformen hat sich das Robot Operating System 2 (ROS 2) als geeignet erwiesen. Um über eine rein signalbasierte Kommunikation via Ethernet hinauszugehen, wurde oberhalb von ROS 2 eine zusätzliche Abstraktionsschicht entwickelt, die die ROS-2-Nodes über Fähigkeiten, Abhängigkeiten und weitere Metadaten (z. B. Quality of Service) beschreibt. Diese Abstraktion ermöglicht eine

lose gekoppelte und damit flexible Softwarearchitektur. Als Middleware wurde Cyclone DDS eingesetzt, das ROS-2-kompatibel ist und zudem Shared-Memory-Kommunikation unterstützt, ein Vorteil insbesondere bei großen Datenmengen, etwa von Sensoren.

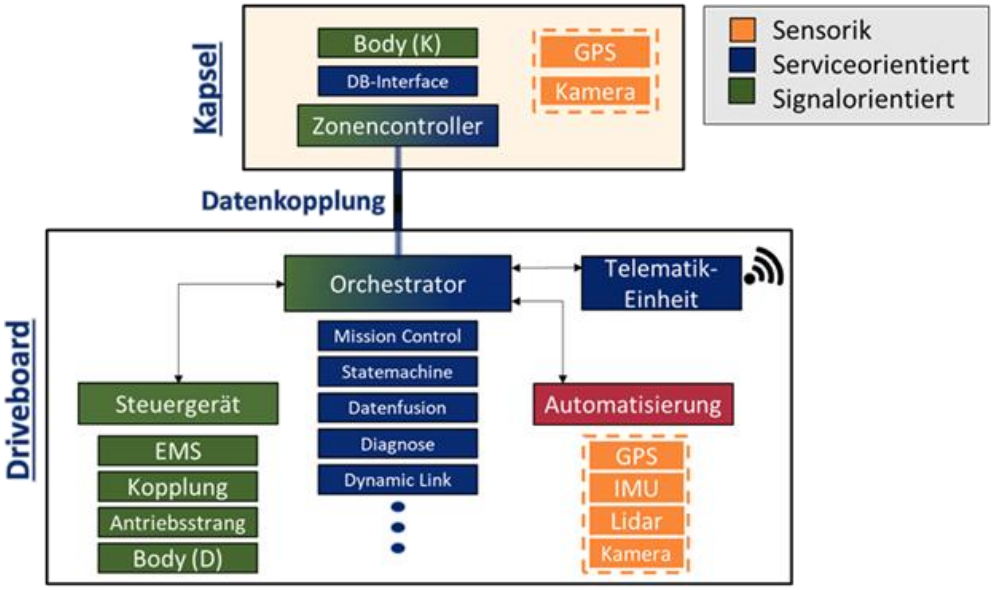


Abbildung 36: SOA-Gesamtkonzeptschaubild mit aufgenommener Personentransportkapsel

Mit Blick auf die modularen Fahrplattform-Eigenschaften des U-Shift Driveboards wurde gemeinsam mit den Projektpartnern ein möglichst aussagekräftiger Use-Case definiert. Hierfür wurde die Personentransportkapsel aus dem Vorgängerprojekt herangezogen, die im SOA-Konzept mit einem Zonencontroller sowie mit zum Driveboard baugleicher Sensorik (GNSS) ausgestattet wurde. Abbildung 36 zeigt das zugehörige Gesamtkonzept: Kernbestandteile sind der sowohl signal- als auch serviceorientiert kommunikationsfähige Orchestrator im Driveboard und der Zonencontroller in der Personentransportkapsel mit ihren jeweiligen Services. Die hybride Kommunikationsstruktur ist notwendig, um auch mit nicht serviceorientierungsfähigen Geräten kommunizieren zu können, beispielsweise mit Steuergeräten der Aktorik. Da die Datenkopplung zwischen Driveboard und Kapsel nur temporär besteht, sobald eine Kapsel physisch aufgenommen ist, muss das System selbstständig erkennen, wann eine Kapsel aktiv ist.

Diese Erkennung und die anschließende Konfiguration übernimmt im Wesentlichen der in Abbildung 37 dargestellte Dynamic-Link-Prozess: Eine dem Driveboard unbekannte Kapsel meldet sich mit einem eindeutigen Identifier an. Der Orchestrator fragt daraufhin bei der Cloud an, welche Softwarekomponenten (SWC) für die Nutzung der Kapsel notwendig sind, lädt diese herunter, startet die entsprechenden Services und verbindet sie automatisch mit den dazu passenden Services. Die beschriebenen SOA-Konzepte wurden im Rahmen des Projekts prototypisch umgesetzt, erfolgreich getestet und auf mehreren Fachtagungen veröffentlicht.

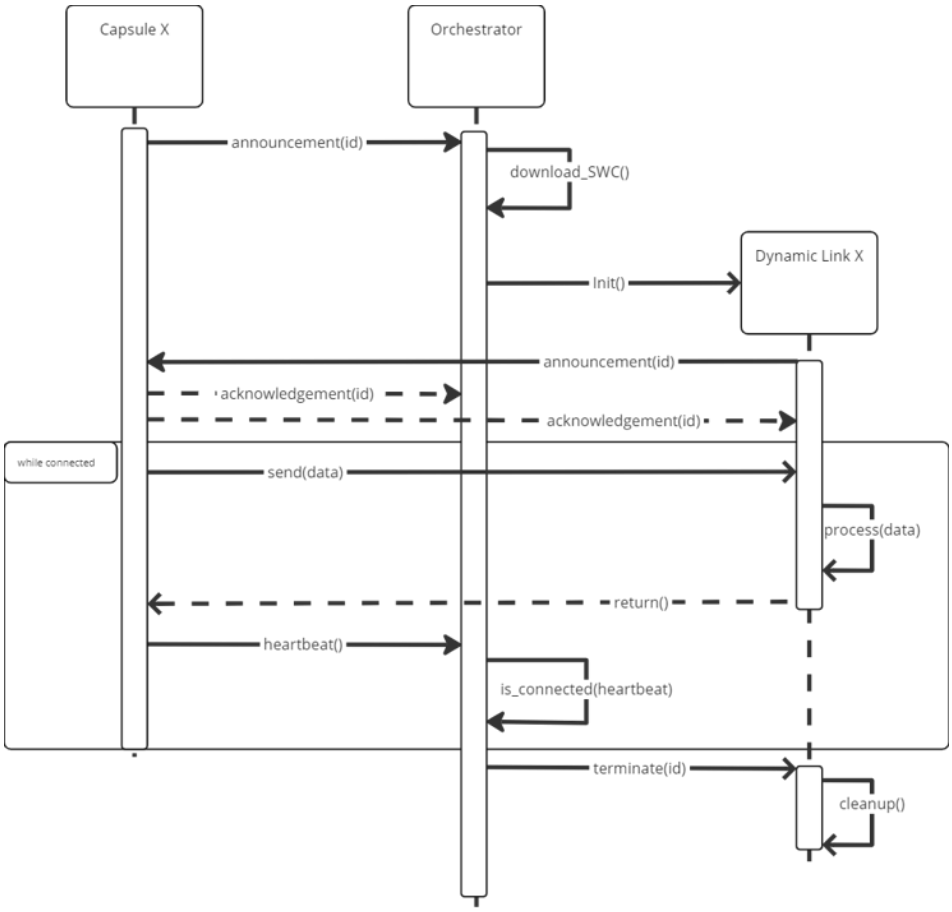


Abbildung 37: Prozess zur automatischen Konfiguration der Softwarearchitektur bei einem Kapselwechsel

4.4.3. AP 4300: Spezifische EE Safetymechanismen

Der U-Shift II Demonstrator muss strenge Elektrik/Elektronik (E/E)-Sicherheitsanforderungen erfüllen, die dem spezifischen Anwendungsfall modularer, autonomer Elektrofahrzeuge gerecht werden. Ziel von AP 4300 war daher die Konzeptionierung und Umsetzung geeigneter E/E-Safety-Mechanismen. Besondere Herausforderungen sind dabei die Sicherheit während des automatisierten Fahrens sowie während der Hub- und Aufnahmemanöver des Fahrzeugs mit unterschiedlichen Kapselaufbauten.

Den Ausgangspunkt bildeten Safety-Analysen in Anlehnung an HARA (Hazard Analysis and Risk Assessment) und TARA (Threat Assessment and Remediation Analysis). Diese stützten sich maßgeblich auf die in AP 1100 identifizierten Use-Cases und die dort erarbeiteten Szenarien- und Anforderungsanalysen. Auf dieser Grundlage wurden die sicherheitskritischen Betriebssituationen des Demonstrators bewertet und daraus die im Folgenden beschriebenen Safety-Mechanismen abgeleitet.

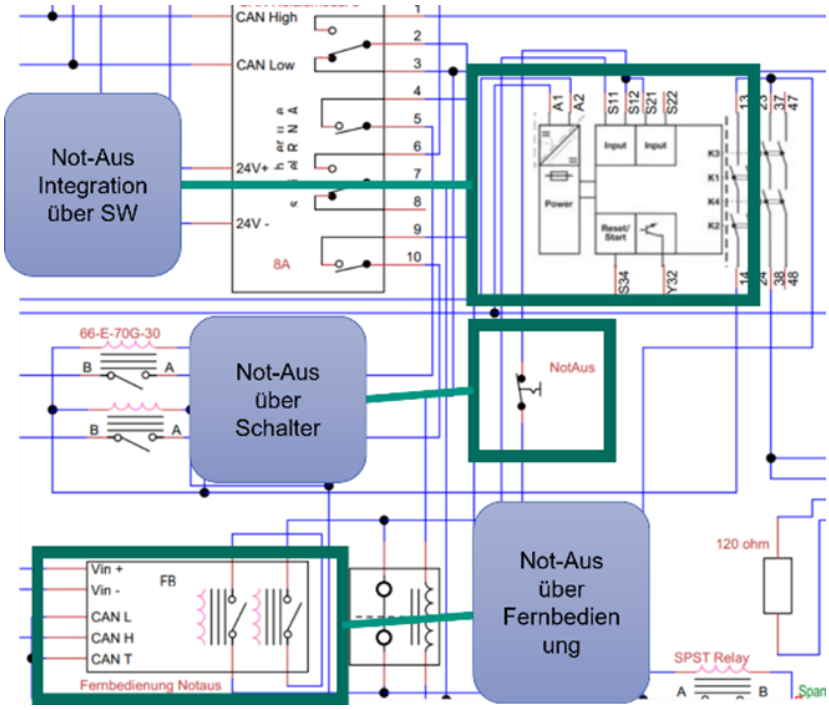


Abbildung 38: Umsetzung des E/E-Safety-Mechanismus

Der entwickelte Safety-Mechanismus besteht aus zwei Ebenen: Hardware (HW) und Software (SW). Der Not-Aus auf HW-Ebene überführt das Fahrzeug in einen sicheren Zustand, wenn ein Fehler oder Ausfall des Antriebssystems (Batterie, E-Maschine, Inverter etc.) oder von Softwarekomponenten (Trajektorienplanung, Regelung, Kommunikationsnetzwerk) auftritt. Wird ein Fehler erkannt, trennt der Mechanismus zunächst die 48-V-Versorgung (Hochvolt-Energiesystem), anschließend wird automatisch die Parkbremse aktiviert, um unkontrolliertes Fahrzeugverhalten zu verhindern. Die weniger kritischen 12-V- und 24-V-Systeme bleiben aktiv, um einen sicheren Stillstand zu ermöglichen und Diagnoseinformationen zum Fehler bereitzustellen. Der gesamte Ablauf erfolgt als geordnete, systemgeführte Routine. Als zusätzliche Sicherheitsebene wurde ein industriestandardisierter externer Funk-Not-Aus mit identischer Funktionalität umgesetzt, um mögliche Zuverlässigkeitsprobleme der ersten Ebene abzufangen (siehe Abbildung 38).

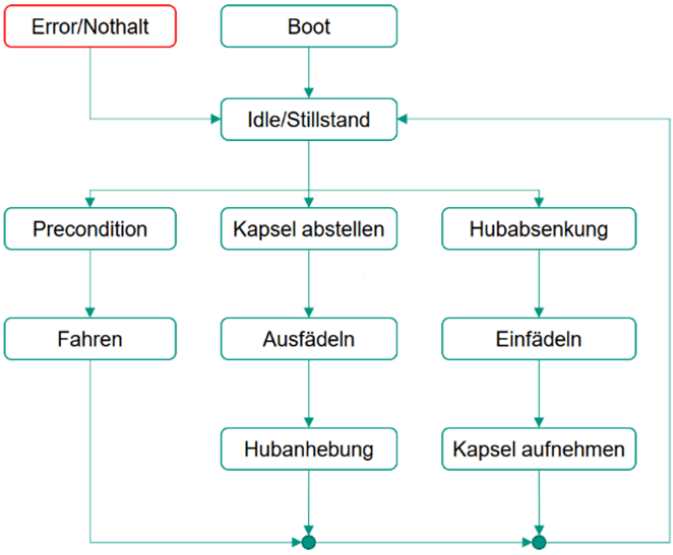


Abbildung 39: Konzept der State Machine

Auf SW-Ebene wird der kontrollierte Not-Aus auf Systemebene durch eine State Machine realisiert, die die Ist- und Soll-Zustände des Fahrzeugs während des Betriebs in Echtzeit koordiniert, einschließlich Startvorgang (Booten), autonomem Fahren, Anheben des Driveboards, Aufnehmen und Absetzen von Kapseln sowie Parken (siehe Abbildung 39). Für jeden Zustandsübergang ist genau eine Systemgruppe (Kommunikation, Automatisierung oder Regelung) verantwortlich und darf ihn initiieren. Alle anderen Systemgruppen müssen ihre Bereitschaft bestätigen, bevor die State Machine den Übergang ausführt. Der Fehlerzustand besitzt zwei Unterzustände: Der schwache Fehlerzustand wird bei Konflikten in Zustandsübergängen oder in der Kommunikation mit der State Machine ausgelöst und führt zu einem kontrollierten Stillstand, ohne die HW-Sicherheitsebene zu aktivieren. Der starke Fehlerzustand wird von einer Systemgruppe bei einem internen Fehler explizit ausgelöst und aktiviert den Not-Aus auf HW-Ebene. Die State Machine wurde erfolgreich im Demonstrator umgesetzt. Die Mechanismen beider Ebenen wurden vor den weiteren prototypischen Tests umfassend geprüft, unter anderem durch simulierte Fehler und das manuelle Auslösen der Sicherheitsketten.

Darüber hinaus wurde der E/E-Safety-Mechanismus um ein neuartiges zertifikatsbasiertes Sicherheitskonzept erweitert, das eine Brücke zwischen dem Automotive-Sicherheitsstandard ISO 26262 und der modularen, adaptiven Softwarekonfiguration des U-Shift II Demonstrators schlagen soll.

4.4.4. AP 4400: Connectivity und Diagnose

Der U-Shift II Demonstrator ist nicht für einen isolierten Betrieb gedacht, sondern für die Symbiose mit der ihn umgebenden Infrastruktur. Gleichzeitig erfordert der Betrieb der Sicherheitsmechanismen (z. B. des E/E-Safety-Mechanismus aus AP 4300) integrierte Diagnose- und Monitoringsysteme. Dies ist bei fahrerlosen Fahrzeugen besonders herausfordernd, da kein Fahrpersonal vorhanden ist, das Anomalien über Sinneseindrücke (Sehen, Vibrationen, Geruch) wahrnehmen könnte. Ziel von AP 4400 war daher die Konzeptionierung und Integration geeigneter Konnektivitäts- und Diagnosesysteme.

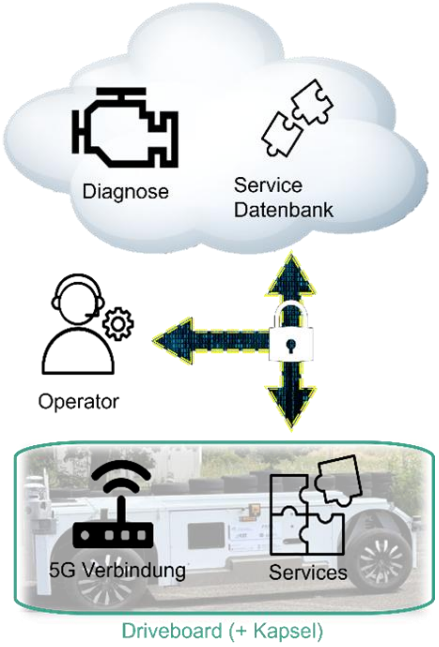


Abbildung 40: Übersicht der Konnektivität

Die Konnektivität ermöglicht die Off-Board-Auswertung des Fahrzeugstatus in Echtzeit, Software-Deployment und Over-the-Air(OTA)-Updates, einen softwarebasierten Remote-Not-Aus (über die State Machine aus AP 4300) sowie die Speicherung der Daten. Die sichere Verbindung zur Cloud

(ITIV-Backend-Server) wurde über einen VPN-gesicherten 5G-Onboard-Router realisiert (Abbildung 40). OTA-Updates, die Kommunikation mit der Infrastruktur auf dem Betriebshof und der Datentransfer nutzen die Standardprotokolle SSH und FTP. Remote-Diagnose und -Monitoring bauen auf dieser Konnektivität auf, sind über HTTP und eine Prometheus-Datenbank umgesetzt und decken alle sicherheitskritischen Sensoren, Steuergeräte und Aktoren ab (Bremse, Energiemanagement, elektrischer Antrieb, Hubsystem etc.). Die 5G-Verbindung erwies sich als ausreichend, um die Echtzeit-Monitoring-Anforderung von mindestens 1 Hz in allen Betriebszuständen zu erfüllen. Ein intuitives Frontend-Dashboard auf Basis von Grafana bietet transparenten Zugriff auf den aktuellen und historischen Fahrzeugstatus, die Position, die Trajektorie sowie Datentrends (siehe Abbildung, b). Das Dashboard ist per WLAN von jedem Notebook, Tablet oder Smartphone erreichbar und über eine Nutzerverwaltung abgesichert.

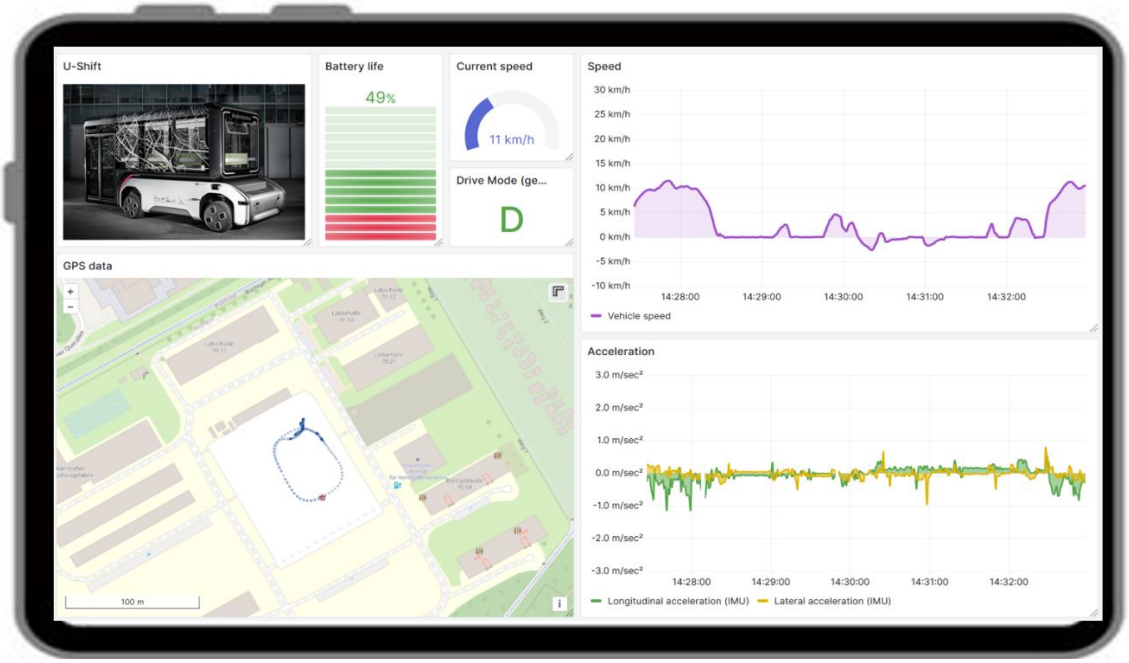


Abbildung 41: Monitoring Frontend

Darüber hinaus wurden für U-Shift II mehrere wissenschaftliche Innovationen des Diagnosesystems entwickelt, insbesondere Konzepte zur prädiktiven Diagnose und zur erklärbaren Anomalieerkennung, die als Input für eine zukünftige prädiktive Wartung (Predictive Maintenance) von Fahrzeugflotten dienen. Ermöglicht wurden diese Konzepte durch die Konnektivität und die hohe Rechenleistung in der Cloud.

4.5. Automatisierung (AP 5000)

Die folgenden Abschnitte geben eine Übersicht über die im Rahmen dieses Projekts entwickelte Automatisierung des U-Shift-Fahrzeugs. Parallel zur technischen Umsetzung im Fahrzeug führten diese Arbeiten zu einer Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen. In 5 findet sich eine Übersicht über diese Publikationen.

Eine Übersicht über die Automatisierung des U-Shift II wurde im Laufe des Berichtszeitraums bereits in einer wissenschaftlichen Publikation mit dem Titel "The Automation Concept of the U-Shift II Vehicle" [13] vorgestellt. Für Details sei daher auf dieses Paper sowie auf die darin referenzierten Publikationen verwiesen.

Die Automatisierungssoftware wurde hauptsächlich in C++ und Python geschrieben und wird über das Robot Operating System 2 (ROS2) auf vier verschiedenen Rechnern ausgeführt. Das Betriebssystem der Rechner ist Ubuntu 22.04, die Automatisierungssoftware läuft aber zur Hardwareabstraktion in einem eigenen Docker-Container.

Drei dieser Rechner dienen als sogenannte Sensormodul-PCs und verarbeiten jeweils die vorderen linken, die vorderen rechten und die nach hinten gerichteten Sensoren des Driveboards. Auf dem vierten Rechner wird die Fusion der Daten der Sensormodul-PCs durchgeführt. Zudem laufen auf letzterem alle Softwarekomponenten zur Bewegungsplanung des Driveboards. Die Sensormodul-PCs sind über 10-Gbit/s-Ethernet mit dem vierten Rechner verbunden.

4.5.1. AP 5100: Sensormodule

Das Driveboard verfügt über verschiedene Sensoren (Lidare, Radare und Kameras) für die Umgebungserfassung, deren Positionen in Abbildung 42 dargestellt sind. Die Sensordaten werden, wie oben beschrieben, in drei getrennten Sensormodulen verarbeitet. Jedes der vorderen Sensormodule hat ein Sichtfeld von 270°. Eine Auflistung der verwendeten Sensoren ist in Tabelle 4 zu finden.

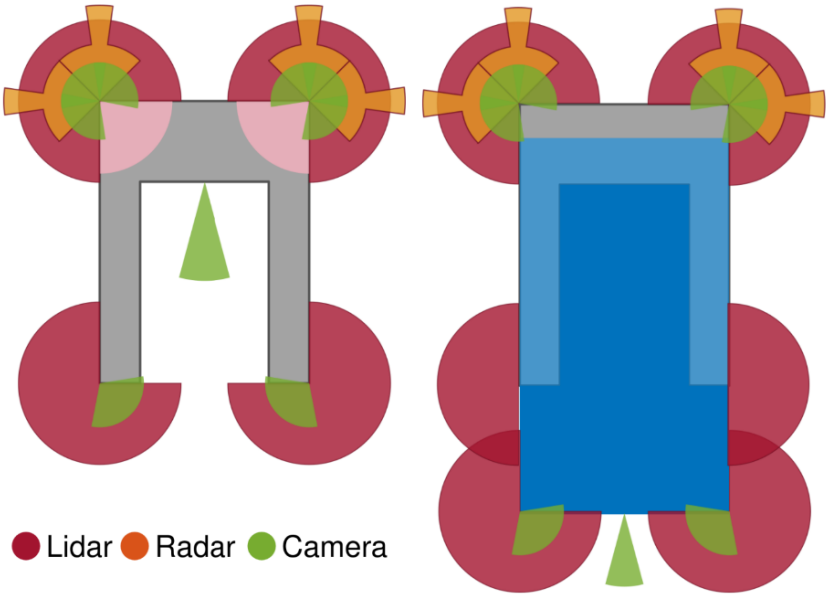


Abbildung 42: Positionen der Sensoren des Driveboards ohne Kapsel (links) und mit aufgenommener Personenkapsel (rechts). (Bild: © [13])

Tabelle 4: Verbaute Sensoren in den drei Sensormodulen

Position	#	Typ	Bezeichnung	Eigenschaften
Vorne links/rechts	3	Kamera	Baumer VCXG-124C.PTP	4096px * 3000px Brennweite: 6mm (Weitwinkel) FoV: 99.3° × 81.6° (hor. / vert.)
	1	Lidar	Ouster OS1-64-G	64 layer FoV: 120m@360°*45°
	2	Radar	Continental ARS 408-21	FoV hor.: 20m@120°, 70m@90°, 250m@18°
Hinten	2	Kamera	Baumer VCXG-124C.PTP	4096px * 3000px Brennweite: 6mm (Weitwinkel) FoV: 99.3° × 81.6° (hor. / vert.)
	1			4096px * 3000px Brennweite: 12mm (tele)
	2	Lidar	Hesai PandarXT	Fov: 50m@360°*32°
Kapsel	2	Kamera	Baumer VCXG-124C.PTP	4096px * 3000px Brennweite: 6mm (Weitwinkel) FoV: 99.3° × 81.6° (hor. / vert.)
	1		Baumer VCXG-124C.PTP	4096px * 3000px Brennweite: 12mm (tele) FoV: 61.0° × 46.7° (hor. / vert.)
	2	Lidar	Hesai PandarXT	FoV: 50m@360°*32°

Diese Sensoren sind die Basis für die hochgenaue Erkennung und Anfahrt an die Kapseln. Jeder Fehler in deren Erkennung wirkt sich direkt auf alle nachfolgenden Schritte aus. Aus diesem Grund ist eine hochgenaue Kalibration der verwendeten Sensoren notwendig. Dieses Thema wurde im Rahmen dieses Projekts in mehreren wissenschaftlichen Arbeiten [1], [2], [4], [6], [8], [17] untersucht. Mithilfe der dort vorgestellten Methoden konnten die verschiedenen Sensoren erfolgreich kalibriert werden.

Aufgrund der verteilten Architektur über mehrere Sensormodule muss zudem die Synchronisation der Module und der Sensoren sichergestellt werden. Dies wird über das Precision-Time-Protocol (PTP) durchgeführt. Es kann aufgrund von Übertragungs- und Verarbeitungslatenzen vorkommen, dass Messungen im zentralen Automatisierungsrechner nicht in der richtigen Reihenfolge eintreffen. Hierfür wurde ein sogenannter Minimal Latency Buffer [10], [15] entwickelt. Dieser schätzt die Ankunftszeiten der benötigten Messungen und kann somit diese zeitlich sortiert an nachfolgende Module weitergeben. Im Folgenden wurde dieser immer verwendet, wenn Daten aus verschiedenen Sensormodulen fusioniert werden.

Eine zusätzliche Besonderheit in diesem Projekt war der Umstand, dass die hinteren Kameras und die hinteren Lidare durch eine aufgenommene Kapsel teils oder ganz verdeckt werden, wodurch

die Personenkapsel ebenfalls mit Sensoren ausgestattet werden musste. Sie verfügt über zwei Lidare und drei Kameras an ihrer Rückseite, welche die verdeckten Sensoren des Driveboards kompensieren. Das hat jedoch zur Folge, dass die Sensoren der Kapsel zur Laufzeit zugeschaltet werden müssen, während die hinteren verdeckten Sensoren abgeschaltet werden müssen. Die Verarbeitung der Sensordaten erfolgt weiterhin auf dem PC für das hintere Sensormodul im Fahrzeug und somit ist ein adaptives Sensorkonzept notwendig. Dies wurde mithilfe sogenannter Lifecycle-Nodes in ROS2 realisiert, durch die nach erfolgreichem Andocken der Personenkapsel und nach Inbetriebnahme der Datenverbindung die Sensortreiber der Personenkapsel aktiviert und die Sensortreiber des Driveboards deaktiviert werden können. Das Abdocken der Kapsel geschieht dann in umgekehrter Reihenfolge.

4.5.2. AP 5200: Automatisierte Normal-Fahrfunktion

Die automatisierten Normal-Fahrfunktionen basieren auf einem objektbasierten Umfeldmodell, welches Objekte in Lidar-Punktwolken und im Kamerabild klassifizieren kann. Dies geschieht auf Basis der Lidarpunktwolke mithilfe eines sogenannten Centerpoint-Detektors[1], im Kamerabild mithilfe eines Yolo_V8_M-Detektors[2]. Ein beispielhaftes Scenario ist in Abbildung 43 dargestellt.

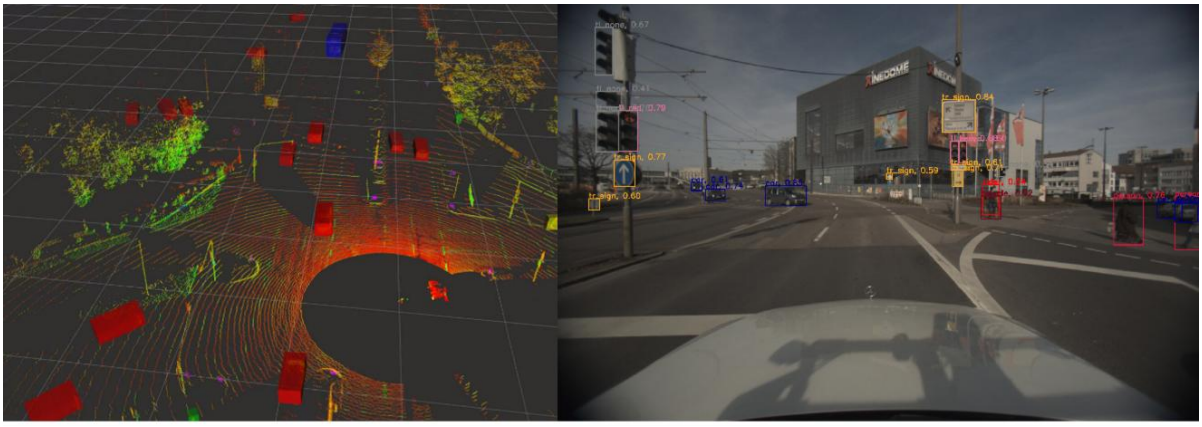


Abbildung 43: Detektierte Objekte des Centerpoint-Detektors (links) neben den im Kamerabild detektierten Objekten des Yolo_V8_M-Detektors (rechts) bei einer beispielhaften Fahrt durch Ulm. (Bild: ©MRM, Ulm University)

Diese Detektionen werden in einem auf Random Finite Sets basierenden Multi-Objekt-Tracking-Algorithmus fusioniert. Dieser wurde für die Anforderungen im Projekt, auch im Hinblick auf einen selbstüberwachten, zuverlässigen Betrieb, weiterentwickelt und in [3], [18], [25] veröffentlicht. Ein beispielhaftes Ergebnis ist in Abbildung 44 dargestellt.

[1] T. Yin, X. Zhou and P. Krähenbühl, "Center-based 3D Object Detection and Tracking," 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Nashville, TN, USA, 2021, pp. 11779-117881

[2] R. Varghese and S. M., "YOLOv8: A Novel Object Detection Algorithm with Enhanced Performance and Robustness," *2024 International Conference on Advances in Data Engineering and Intelligent Computing Systems (ADICS)*, Chennai, India, 2024, pp. 1-6

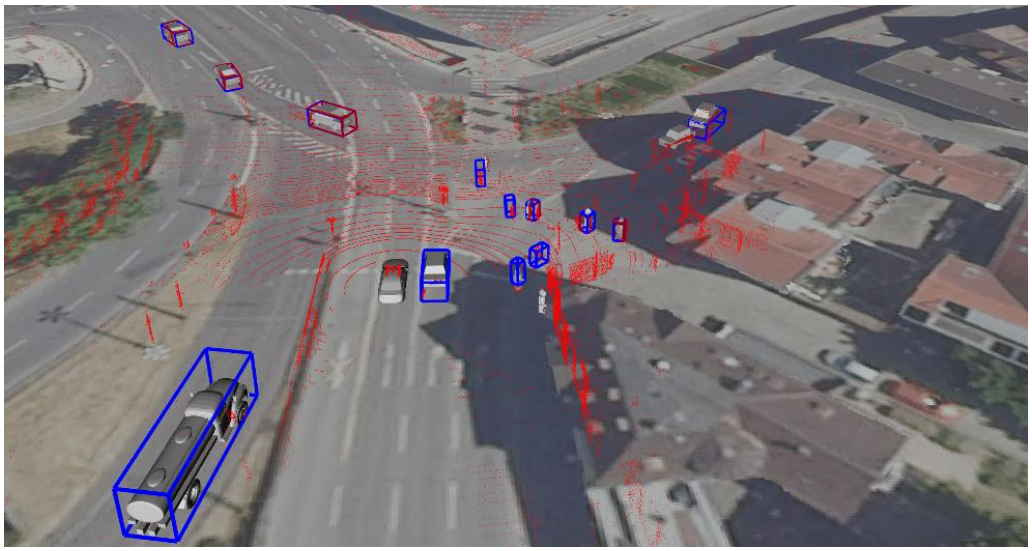


Abbildung 44: Visualisierung der getrackten Objekte in blau und der Lidar-Punktwolke in rot einer beispielhaften Verkehrssituation in Ulm. (Bild: ©MRM, Ulm University, Luftbild: LGL, www.lgl-bw.de, dl-de/by-2-0)

Jedes Sensormodul generiert hierbei eine eigene solche Umgebungsrepräsentation. Diese Sensormodul-Umfeldmodelle werden anschließend im zentralen Automatisierungsrechner zum Fahrzeugumfeldmodell fusioniert. Dieses Fahrzeugumfeldmodell dient zusammen mit einer hochgenauen Lanelet2-Karte als Basis für die Planung. Bevor das fusionierte Umfeldmodell von Planungsalgorithmen verwendet wird, wurde im Rahmen des Projekts noch eine Plausibilisierungsebene eingeführt. Sie überprüft die Plausibilität von getrackten Objekten relativ zu einer hochgenauen Karte [23].

Die Datenfusion aus mehreren Sensoren kann jedoch auch dazu führen, dass verschiedene Sensoren Messungen generieren, die miteinander in Konflikt stehen. Der Ursprung dieses Konfliktes kann zum einen in verschiedenen Sensormodi liegen, er kann jedoch auch von defekten Sensoren, zu hohen Latenzen oder kompromittierten Datenströmen verursacht werden. Aufgrund dieser Problematik wurde im Rahmen des Projekts das Thema der Selbstbewertung und Konflikthandling näher erforscht, wie in den Publikationen [9], [16], [19], [20] im Detail beschrieben.

Der im Projekt entwickelte Planungsalgorithmus kann die Normalfahrfunktionen sowie auch die Rangier-Fahrfunktionen bewältigen, ohne dass zwischen zwei Algorithmen gewechselt werden muss. Dies wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

4.5.3. AP 5300: Automatisierte Rangier-Fahrfunktion

Das oben beschriebene Umfeldmodell muss für die Rangier-Fahrfunktionen erweitert werden. Die hochgenaue Lanelet2-Karte der Fahrspuren ist im Rangierbetrieb nicht mehr relevant, da sich das Fahrzeug nun in unstrukturierten Umgebungen wie Betriebshöfen oder Parkplätzen etc. befindet. Die Umgebung wird daher durch eine Belegungsrasterkarte dargestellt, welche durch eine Bodenpunkterkennung aus den Lidar-Punktwolken generiert wird. Jedes Sensormodul generiert hierbei eine eigene Rasterkarte, die im zentralen Automatisierungsrechner fusioniert werden. Ein beispielhaftes Ergebnis der Fusion ist in Abbildung 45 zu sehen.

Die Besonderheit der entwickelten sogenannten Adaptive Patched Grid Map (APGM) [5] ist hierbei, dass sie Patch-weise berechnet wird und auch die Auflösung Patch-weise verändert werden kann. So können uninteressante weit entfernte Bereiche mit einer gröberen Auflösung dargestellt werden als z.B. nahe relevante Bereiche. Zudem kann situationsabhängig die Auflösung, die Anordnung und die Anzahl der Patches verändert werden, sodass zum Beispiel in strukturierten Umgebungen nur Patches entlang einer Landstraße generiert werden müssen, wobei die Auflösung

grob bleiben darf im Gegensatz zu Fahraufgaben beim Parken, bei denen nur der Parkplatz modelliert werden muss, aber die Auflösung deutlich feiner eingestellt werden muss.

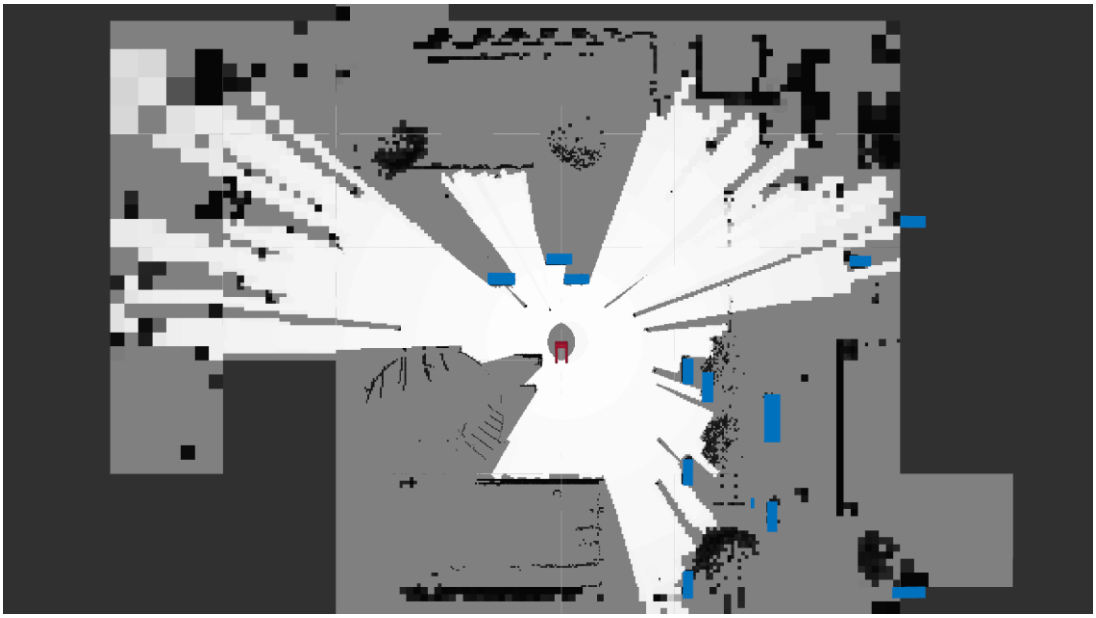


Abbildung 45: Visualisierung der Adaptive Patched Grid Map mit getrackten Objekten in blau. (Bild: © [13])

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Rangierbetriebs ist die hochgenaue Erkennung der Kapseln. Diese ist in den folgenden Abbildungen näher erläutert. Abbildung 46 zeigt ein beispielhaftes Szenario im Simulationsframework CARLA[3], welches um ein funktionierendes Driveboard und um zwei Kapselvarianten erweitert wurde. Das Driveboard steht hierbei vor einer Personenkapsel und einer Cargokapsel. Das Simulationsframework wurde hierbei so modifiziert, dass das Driveboard auch in der Simulation an die Kapseln andocken kann. Somit ist der Kapselwechsel auch in der Simulation vollständig durchführbar.

Abbildung 46: Simulationsumgebung in CARLA mit simuliertem funktionalem Driveboard, einer Cargokapsel und einer Personenkapsel. (Bild: © [13])

[3] Alexey Dosovitskiy, German Ros, Felipe Codevilla, Antonio Lopez and Vladlen Koltun, CARLA: An Open Urban Driving Simulator, Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning, 1—16, 2017

Die Kapseln sind mit verschiedenen ArUco-Markern[4] versehen. Jede Kapsel besitzt drei große ArUco-Marker an den Seiten und vorne, die zur groben Posenschätzung sowie zur Identifizierung der Kapseln genutzt werden. Zudem befindet sich ein ChArUco-Board an der Front jeder Kapsel. Es kombiniert die Vorteile von ArUco-Markern und Schachbrettern, wodurch die Pose der Kapsel hochgenau geschätzt werden kann. Eine exemplarische Erkennung der Marker und der Rückschluss auf die Kapselposition ist in Abbildung 47 visualisiert.

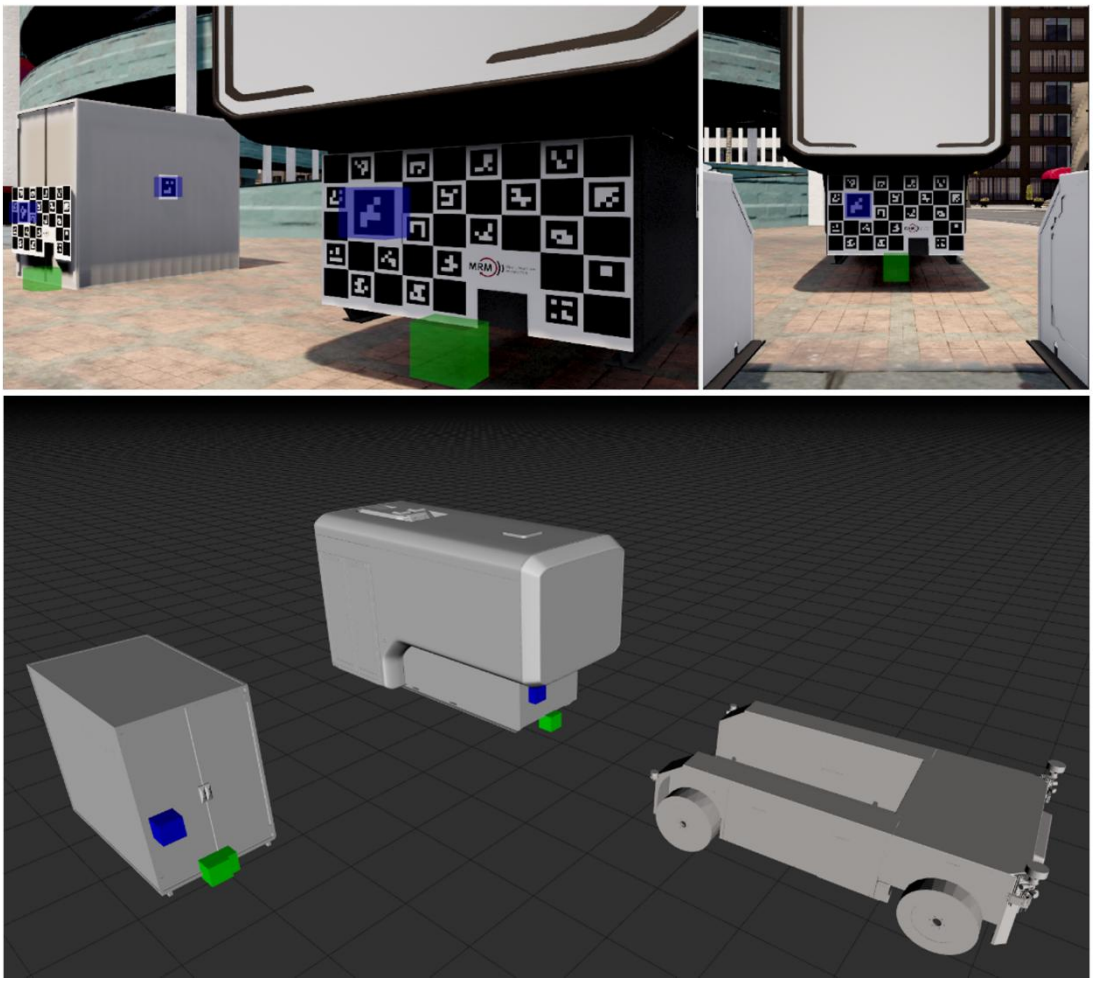


Abbildung 47: Erkannte ArUco-Marker in blau mit rekonstruierter Kapselposition in grün (oben) und vollständig rekonstruiertes Scenario in Rviz (unten). (Bild: © [13])

Wenn nur die ArUco-Marker und nicht das ganze ChArUco-Board zu sehen ist, wird die Posenschätzung der Marker zudem durch die Sensor-Fusion mit Lidar-Daten verbessert. Die Unsicherheitsellipse der Positionsschätzung des Markers wird hierbei verwendet, um pro Marker-Erkennung einen Teil aus der Punktwolke herauszuschneiden. In diesen Teil wird dann mithilfe eines RANSAC-Algorithmus[5] eine Ebene gefittet. Die Erkennung des Markers im Kamerabild wird nun mit der Ebene geschnitten und dadurch die Position sowie der Winkel des Markers neu berechnet. Die Kapselerkennung wurde im Rahmen dieses Projekts auch auf Github veröffentlicht[6]. Schluss-

[4] S. Garrido-Jurado, R. Muñoz-Salinas, F.J. Madrid-Cuevas, M.J. Marín-Jiménez, Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion, Pattern Recognition, Volume 47, Issue 6, 2014, Pages 2280-2292,

[5] Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, 24(6), 381-39

[6] https://github.com/uulm-mrm/capsule_pose_estimation

endlich werden die Detektionen der Kapseln durch einen Kalman-Filter gefiltert. Da die Kapselschätzung jedoch pro Sensormodul abläuft, werden alle gefilterten Kapseldetektionen im letzten Schritt im zentralen Automatisierungsrechner in einer Track-To-Track Fusion fusioniert.

Das Umgebungsmodell für die Rangier-Fahrunktionen besteht somit aus einer Belegungsrasterkarte, den getrackten Objekten und den Positionen der Kapseln. Dieses wird nun in den Algorithmen der Bewegungsplanung verwendet.

Ein zentraler Baustein der Automatisierungssoftware ist das sogenannte Brain der Automatisierung. In diesem sind alle relevanten Informationen bezüglich des Umfeldmodells, z.B. alle derzeit sichtbaren Kapseln, und des Driveboard-Zustands, wie „Hub ist oben“ oder unten, gesammelt. Diese Informationen werden zum einen von der Automatisierungssoftware selbst generiert, oder zum anderen von der MicroAutoBox (MAB) aus AP 3600 an das Brain versendet. Das Brain hat nun die Aufgabe, bestimmte Verhaltensweisen wie "Andocken an Kapsel A" oder "Fahrt zur Position X" umzusetzen. Hierbei wird zwischen mehreren Verhaltensweisen unterschieden, welche durch Kommandos umgesetzt werden, die an die im weiteren Verlauf erläuterten Pfadplanungs- und Trajektorienplanungs-Algorithmen sowie an die MAB aus AP 3600 versendet werden. Diese Verhalten sind IDLE (Stillstand), DRIVE (Fahrt zu einer Ziel-Pose), SEARCH (suche eine Kapsel), DOCK (docke an Kapsel an) und UNDOCK (stelle eine Kapsel ab und fahre aus der Kapsel). Diese Verhaltensweisen werden durch einen internen Zustandsautomaten gesteuert und können durch eine Schnittstelle von außen getriggert werden.

Wie im ersten Absatz beschrieben, unterscheiden sich die Normal-Fahrfunktionen von den Rangierfahrfunktionen darin, dass hierbei die Fahrspuren durch eine hochgenaue Karte dargestellt sind. Deswegen ist der erste Schritt für die Rangier-Fahrfunktionen die Generierung eines Referenzpfades. Dies wird durch einen sogenannten Hybrid-A*-Algorithmus durchgeführt. Dieser graphbasierte Algorithmus generiert kollisionsfreie und fahrbare Pfade zwischen einer Start- und einer Ziel-Pose. Zudem wurden die erweiterten Bewegungsprimitive des U-Shifts im Pfadplanungsalgorithmus integriert [7]. Im ursprünglichen Plan des Projekts hatte das U-Shift die Eigenschaft, dass es die Vorderräder gegensinnig nach innen drehen kann. Dadurch wäre es in der Lage, auf der Stelle über die Mitte der Hinterachse zu drehen. Diese Fähigkeit wurde daher auch in den entwickelten Hybrid-A*-Algorithmus integriert. Dadurch können sehr platzsparende Pfade geplant werden. Abbildung 48 zeigt zwei beispielhafte Pfade, einmal inklusive der explorierten Posen auf einem Parkplatz und einmal mit Berücksichtigung der erweiterten Bewegungsprimitive in der Simulationsumgebung CARLA.

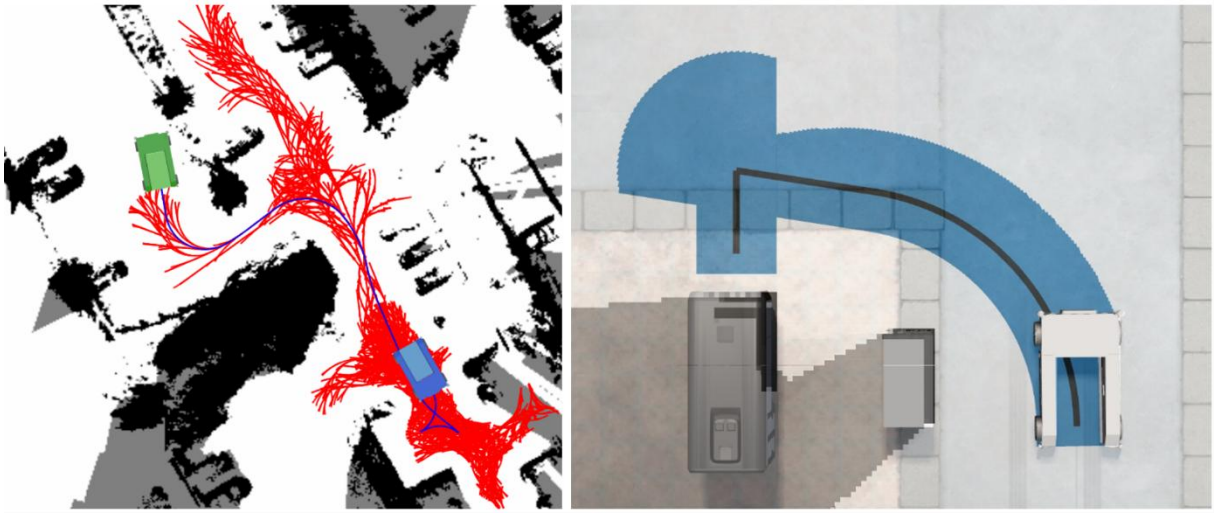


Abbildung 48: Visualisierung des geplanten Pfades (blau) und der explorierten Posen (rot) des Hybrid-A-Algorithmus auf einem Parkplatz in Ulm (links). Exemplarischer Pfad unter Berücksichtigung der erweiterten Bewegungsprimitive in CARLA (rechts). (Bild: © [13])*

Zudem wurde evaluiert, inwieweit der Planungsalgorithmus mit in Konflikt stehenden Daten umgehen kann, die z.B. durch Kalibrationsfehler oder Beschädigungen der Sensoren im Betrieb verursacht werden können [11]. Dieser Konflikt kann, wie in der Veröffentlichung im Detail beschrieben, in den Zellen der APGM erkannt und im Planungsalgorithmus berücksichtigt werden.

Ausgehend von diesem geplanten Referenzpfad können durch Raytracing die linke und rechte Begrenzung eines sogenannten Korridors generiert werden. Diese modellieren die Begrenzungen des fahrbaren Bereichs in sogenannten Frenet-Koordinaten. Dieser Korridor ist äquivalent zur Darstellung der Fahrspur durch die hochgenaue Karte, die in den Normal-Fahrfunktionen generiert wird.

Dieser Korridor dient nun als Basis für den nachfolgenden Trajektorienplanungs-Algorithmus. In diesem Projekt wurde ein Planungsalgorithmus basierend auf einem sogenannten Model Predictive Contouring Controller (MPCC) entwickelt. Dies ist ein modelprädiktiver Regler, der die Eigenschaften eines Pfadfolgeregler erfüllt. Dieser kann nun den beschriebenen Korridor abfahren. Zudem wurde der MPCC erweitert, sodass er gleichzeitig als Pfadfolgeregler und Posenregler fungieren kann [14]. Die Eigenschaft des Posenreglers ist für die hochgenaue Anfahrt an die Kapsel notwendig. Durch diese Erweiterung kann die Kapsel in einem Zug angefahren werden, wobei sich der Algorithmus schon während der normalen Pfadfolgeregelung auch für die Ziel-Pose ausrichten kann. Eine schematische Fahrt durch einen Korridor ist gemeinsam mit der schematischen Darstellung des erweiterten MPCCs in Abbildung 49 dargestellt.

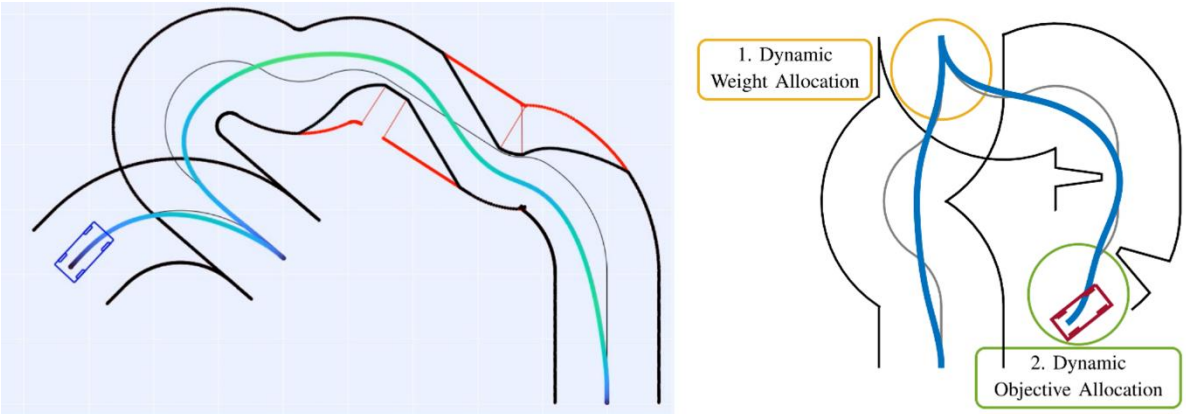


Abbildung 49: Beispielhafte gefahrene Trajektorie des MPCC (links) ©MRM, Ulm University. Schematische Darstellung des erweiterten MPCC (rechts) (Bild: © [14])

Da das Driveboard während der Laufzeit der Planungsalgorithmen Kapseln aufnehmen und absetzen kann, müssen alle Planungsalgorithmen zudem zur Laufzeit rekonfigurierbar sein, um auf die veränderten Maße des Fahrzeuges zu reagieren.

Schlussendlich ist zu erwähnen, dass alle Planungsalgorithmen im Projekt sehr eng mit dem Trajektorienfolgeregler aus AP 3600 entwickelt und parametriert wurden, um eine komfortable und sichere Fahrweise zu ermöglichen. Durch Nutzung des entwickelten Simulationsframeworks in CARLA konnten auch in Abwesenheit des Driveboards Automatisierungs- und Interface-Tests durchgeführt werden [22].

4.6. Systemintegration und Testinfrastruktur (AP 6000)

4.6.1. AP 6100: Demonstrator – Ausbaustufe 1

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die erste Ausbaustufe des U-Shift II Driveboards hinsichtlich seiner Grundfahrfunktionen validiert. Die zugrundeliegenden Testparameter und Abnahmekriterien wurden im Vorfeld im Projektkonsortium gemeinsam festgelegt.

Die Ausbaustufe 1 beinhaltet die Integration aller wesentlichen Hardware-Komponenten des Driveboards wie beispielsweise den Rahmen/Chassis (Struktur inkl. Hauptanbindungspunkte für Subsysteme), ein prototypisches Koppelsystem, das Fahrwerk inkl. Hubvorrichtung, die Antriebe und Batterien (48-V Traktionsbatterie inkl. BMS + 12-V Batterie), die Energie- und Thermomanagementkomponenten bzw. das Kühlsystem, die E-/E- Architektur mit Verkabelung und Steuergeräten, den Orchestratorrechner, die MicroAutobox, die Automatisierungsrechner und wesentliche Sensorik für Automatisierung, den Not-Aus Knopf und den Empfänger Funkfernbedienung. Der für die vollständige Ausbaustufe geplante Funktionsumfang ist in der ersten Ausbaustufe noch nicht gänzlich implementiert und beschränkt sich im Wesentlichen auf die Grundfahrfunktionen (beschleunigen und bremsen, vorwärts-/ rückwärtsfahren, lenken), die Fernsteuerung/manuelle Steuerung und Safetymechanismen, inkl. Not-Aus-Kette (Betätigungsmöglichkeiten am Fahrzeug und per Fernbedienung).

Die Tests zur Abnahme der Ausbaustufe 1 fanden am 17.07.2024 statt und umfassten die systematische Überprüfung der wesentlichen Driveboard-Funktionen. Dabei wurde insbesondere die Funktionalität der Fernbedienung (FB) als primäres Steuerungselement für diese Ausbaustufe verifiziert. Es wurden folgende Testparameter erfolgreich abgenommen:

Tabelle 5: Testparameter der Ausbaustufe 1

Test	**Erfüllt / Nicht Erfüllt / Datum**
Fahrzeug lässt sich laden	Erfüllt
Fahrzeug lässt sich einschalten	Erfüllt 17.07.2024
48 V lassen sich über die Fernbedienung einschalten	Erfüllt 17.07.2024
48 V lassen sich über die Fernbedienung abschalten	Erfüllt 17.07.2024
Betriebsbremse lässt sich über die FB bedienen	Erfüllt 17.07.2024
Feststellbremse lässt sich über die FB bedienen	Erfüllt 17.07.2024
Lenkung lässt sich über die FB bedienen	Erfüllt 17.07.2024
Gegensinniges Einschlagen der Vorderräder funktioniert	Erfüllt 17.07.2024
Fahrzeug kann vorwärts über die FB gefahren werden	Erfüllt 17.07.2024
Fahrzeug kann rückwärts über die FB gefahren werden	Erfüllt 17.07.2024
Fahrzeug kann Kurven fahren	Erfüllt 17.07.2024
Fahrzeug kann mit der FB verzögert werden	Erfüllt 17.07.2024
Hub lässt sich über die FB bedienen	Erfüllt
Die Kapsel kann auf dem DB verriegelt werden	Erfüllt 17.07.2024
Der Kapselkonnektor kann sich mit der Kapsel verbinden	Erfüllt 17.07.2024
Kühlsystem wird bei Bedarf zugeschaltet (automatisch)	Erfüllt
Lichttechnische Einrichtungen können entsprechend zugeschaltet werden	Erfüllt 17.07.2024

4.6.2. AP 6200: Demonstrator - vollständige Ausbaustufe

Die vollständige Ausbaustufe des U-Shift II Driveboards umfasst die volle Funktionalität aller Subsysteme. Darunter fällt bspw. die Integration der Automatisierungsfunktionalitäten, der automatisierte Kopplungsmechanismus und die Verriegelung der Kapseln auf dem Driveboard, eine präzise Rangierfähigkeit, SOA, Motioncontrol und ein softwareseitiges Safetykonzept Im Rahmen des APs wurde die Spezifikationen für die Abnahme der vollständigen Ausbaustufe in Abstimmung mit den Projektpartnern definiert (Tabelle 6) und erprobt. Die Spezifikationen verstehen sich ergänzend zu denen der Ausbaustufe 1 in Tabelle 5.

Tabelle 6: Ausbaustufe 2 zum Ende Stand der Abschlussveranstaltung

Das Energie- und Thermomanagement ist unter realen Bedingungen einsatz- und funktionsfähig.
- aktive Kühlung (Batterie/Antrieb) schaltet automatisch bei definierter Temperatur-/Lastgrenze
- BMS zeigt plausiblen SOC
Automatisiertes Fahren ist möglich
- Objekt- und Rasterbasierte Erfassung der Umgebung
- Planung zwischen Start- und Zielpositionen
- Trajektorienfolgeregelung
Eine automatisierte Kapselaufnahme im Rangierbetrieb ist möglich.
- Hochgenaue Erfassung und Identifikation der Kapseln
- Hochpräzise Planung und Regelung zur Kapselaufnahme
- Automatische Verriegelung & Datenverbindung zur Personenkapsel

Die Kriterien wurden erfüllt und bei der Abschlussveranstaltung des Projekts im Juni 2026 demonstriert. Diverse Videoaufnahmen dokumentieren die Funktionalitäten.

4.6.3. AP 6300: Test-Betriebshof

Ein zentraler Bestandteil des Arbeitspakets AP 6300 war die Planung, Spezifikation und Umsetzung des Betriebshofs. Ziel war es, eine Test- und Demonstrationsumgebung zu schaffen, die sowohl Fahrzeugtests als auch die Abschlusspräsentation mit automatisierten Fahrmanövern ermöglichte. Ein wesentliches Kriterium von Beginn an war die Fahrfläche für die zu demonstrierenden Fahrmanöver und Funktionen (Kapselwechsel, Passagiereinstieg, Sensoranhänger) während der Testphase und beim finalen Demo-Event.

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde als Standort für den Betriebshof eine asphaltierte Freifläche auf dem Campus Ost des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) ausgewählt. Die Fläche verfügt über eine Länge von 85 Metern und eine Breite von 70 Metern. Sie ist Teil eines umzäunten KIT-Geländes. Die Infrastruktur des Campus Ost erfüllte die Voraussetzungen für die im Projekt geplanten Arbeiten. Am Rand der Fahrfläche konnte eine ausreichende elektrische Infrastruktur zur Verfügung gestellt werden. Für den Energiebedarf, insbesondere für die Ladung des Driveboards, wurden 32A CEE-Anschlüsse spezifiziert. In den umliegenden Werkstätten des Campus Ost stehen zudem leistungsstarke Drehstromanschlüsse (dreiphasig mit 400 V) mit bis zu 125 A zur Verfügung.

Für die Durchführung von Tests mit dem U-Shift II Driveboard wurde ein Büroraum vor Ort auf der Testfläche benötigt. Hierfür wurde durch das DLR ein den Anforderungen des Projekts entsprechender Bürocontainer beschafft, der unter anderem eine gute Sicht auf die Testfläche ermöglichte und die benötigte Energieinfrastruktur bereitstellte (Abbildung 50). Die Anforderungen an diesen Container wurden im Vorfeld im Projektkonsortium abgestimmt, um einen reibungslosen Testbetrieb zu gewährleisten.

Der Container weist Außenmaße von 5 Metern x 3 Metern auf und bietet eine Nutzfläche von ca. 12 m². Er wurde so konzipiert, dass er nicht nur als Arbeits- und Lagerraum, sondern auch als zentrale Überwachungsplattform dient. Die Flächenlast des Dachs ist dabei ausreichend dimensioniert für die zu erwartende Auslastung von bis zu 2 Personen/m², was unter anderem die Nutzung als Aussichtsplattform während der Abschlussveranstaltung ermöglichen sollte.

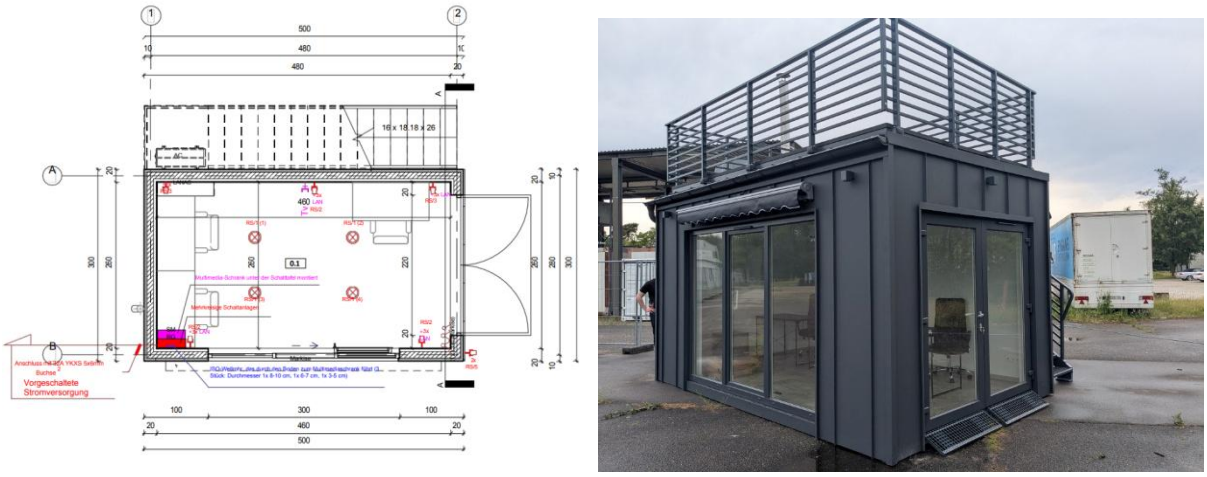


Abbildung 50: Container technische Zeichnung (links, Bild: Loft-Heim Mobilheime); aufgestellt am Testgelände (rechts, Bild: DLR CC BY-ND)

Der Betriebshof wurde durch mobile Infrastruktursensorik ergänzt, die im Projekt durch mobile Sensoranhänger realisiert wurden. Eine der beiden im Rahmen des Projekts aufgebauten mobilen Infrastruktursensoreinheiten ist in Abbildung 51 dargestellt.

Abbildung 51: Ausgefahrener Sensoranhänger (Bild: ©MRM, Ulm University)

Der Kern eines jeden dieser beiden Anhänger ist der ausfahrbare Sensorkopf. Er verfügt über drei Kameras, einen Lidar, einen Global Navigation Satellite System (GNSS)-Empfänger und eine Inertial Measurement Unit (IMU). Bei der Auslegung und Umsetzung der mobilen Infrastruktursensoreinheiten wurde auf eine schnelle Einsatzbereitschaft nach einem Wechsel des Aufstellortes Wert gelegt. Hierzu sind die Kameras mit Fish-Eye Objektiven ausgestattet, was eine vollständige 270°-Abdeckung des Sichtbereichs erlaubt. Zusätzlich wird durch die vollständige Abdeckung des Sichtbereichs eine Neuausrichtung der Kameras nach einem Wechsel des Aufstellortes überflüssig, sodass der Sensorkopf nur einmal intrinsisch und extrinsisch kalibriert werden muss. Am Aufstellort selbst erfolgt die restliche Kalibrierung weitestgehend automatisiert. So wird auf Basis der Lidar-Messungen die Höhe des Sensorkopfes über der lokalen Bodenebene geschätzt und eine Nivellierung der für den Datenaustausch relevanten Koordinatensysteme auf Basis der IMU durchgeführt.

Für die Verarbeitung der Sensordaten hin zu einem lokalen Umfeldmodell wird eine im Vergleich zum Driveboard leicht angepasste Sensorpipeline eingesetzt. Hierzu werden in den Kamerabildern Objekte wie bspw. Fußgänger mittels eines YOLO26-Modells[7] detektiert und mittels Projektion auf die geschätzte Bodenebene in den dreidimensionalen Raum überführt. Dort erfolgt anschließend eine zeitliche Filterung mittels des oben genannten Multi-Objekt-Tracking-Algorithmus. Das dadurch erzeugte Umfeldmodell kann anschließend über verschiedene Kommunikationswege mit dem Driveboard geteilt werden. Im Rahmen der Demonstration wurde hierfür der Einfachheit halber eine WiFi-Schnittstelle genutzt. Um die begrenzte Bandbreite des Kommunikationskanals maximal auszunutzen, wurde zudem am effizienten Versand von Rasterkarten geforscht (Referenz [24]).

Die Testfläche wurde zusätzlich zur Durchführung umfangreicher Tests auch für die Vorführung von automatisierten Fahrmanövern bei der Abschlussveranstaltung des Projekts genutzt. Dabei sah die Aufteilung der Testfläche vor, dass der Fahrbereich kleiner als die gesamte Freifläche gehalten wurde, um ausreichend Raum für Gäste und Sicherheitsabstände zu schaffen. Die Zuschauerflächen waren seitlich am Testfeld in der Nähe des Containers angeordnet, was einen optimalen Blick auf die automatisierten Fahrmanöver inklusive des Kapselwechsels ermöglichte (Abbildung 52).

Abbildung 52: Fahrfläche mit Bushaltestelle, Bürocontainer und Zuschauerbereichen bei der Abschlussveranstaltung (Bild: DLR)

[7] Glenn Jocher and Jing Qiu and Mengyu Liu and Shuai Lyu and Fatih Cagatay Akyon and Muhammet Esat Kalfaoglu, Ultralytics YOLO26: Unified Real-Time End-to-End Vision Models, 2606.03748, arXiv, 2026

Zwischen der Fläche der Fahrvorführung und dem Zuschauerbereich wurde ein ausreichender Sicherheitsabstand eingehalten und weitere Maßnahmen wie geeignete Absperrungen gewährleisteten die Sicherheit der Gäste. Eine Visualisierung der Infrastruktur- und Sensordaten auf einem Bildschirm ermöglichte Einblicke in die Umsetzung der Fahrzeugautomatisierung.

4.7. Projektmanagement, Öffentlichkeit, Bürgerbeteiligung (AP 7000)

4.7.1. AP 7100: Projektmanagement

Das Projektmanagement koordinierte die Arbeiten des Projektteams und stellte eine effiziente und effektive Kommunikation des Projektkonsortiums sicher. Zudem erfolgte ein kontinuierliches Risikomanagement, das zeitliche Abläufe, technische Risiken etc. berücksichtigte. Die pandemiebedingten Beschränkungen zu Projektbeginn stellten eine erhebliche Herausforderung für die Kommunikation und Zusammenarbeit im Projekt dar und erforderte auch Änderungen an Arbeitsinhalten wie dem Bürgerdialog, der anfangs auf Grund der Auflagen im Rahmen virtueller Aktivitäten erfolgte. Diese stellten Alternativen für eigentlich geplante interaktive Formate in Präsenz dar. Im Projektverlauf wurden pandemiebedingte Auflagen gelockert bis aufgehoben, so dass dann auch Projekttreffen, Workshops mit Interessensgruppen etc. in Person stattfinden konnten.

Auf Grund der Herausforderungen wie der Coronapandemie, Lieferverzögerungen, Reparaturen an Driveboard-Komponenten und Optierungsbedarf bei technischen Systemen war eine Laufzeitverlängerung des Projekts erforderlich. Im Rahmen dieser kostenneutralen Laufzeitverlängerung wurden alle vorgesehen Projektmeilensteine erreicht. Im Projekt U-Shift II wurde das Fahrzeugkonzept an zentralen Punkten weiterentwickelt, die dafür notwendigen Technologien erprobt und demonstriert.

4.7.2. AP 7200: Öffentlichkeit / Bürgerdialog

Ein Bürgerdialog mit verschiedenen Interessensgruppen begleitete die technologische Entwicklung des U-Shift Fahrzeugs. Im Rahmen von Workshops, Ausstellungen und Befragungen erhielten Interessierte aus der Zivilgesellschaft und spezifische Interessensgruppen wie bspw. Kommunen Einblicke in die Forschung und diskutierten Ideen für Einsatzmöglichkeiten. Die erhobenen Ideen und Anforderungen fließen auch nach dem Projekt weiter in die Entwicklung von U-Shift ein.

Den Auftakt des Bürgerdialogs bildete eine Online-Umfrage, die allgemeine Fragen zur derzeitigen Alltagsmobilität, Wünsche für zukünftige Mobilität, Fragen zum fahrerlosen Fahren, zu U-Shift spezifischen Aspekten und soziodemographischen Aspekten der Teilnehmenden beinhaltete.

An der Umfrage nahmen 124 Personen teil, davon beantworteten 98 den kompletten Fragebogen. Der überwiegende Teil der Teilnehmenden besitzt einen hohen Bildungsgrad (88 %), ist zwischen 21 und 39 Jahre alt (58 %) und männlich (58 %). Rund die Hälfte ordnet sich einem städtischen Umfeld zu (50 %), die übrigen Personen geben an, in einer Kleinstadt (14 %), einem Vorort (26 %) oder einer ländlich geprägten Region (11 %) zu wohnen.

Die Frage „Wo würden Sie sich für Ihre Mobilität am meisten Veränderung wünschen?“ beantworten die meisten Teilnehmenden mit „bessere Rad- und Fußwege“ (56 %), gefolgt von „umweltfreundlicher unterwegs sein“ (47 %) und „mehr Verbindungen im ÖPNV, insbesondere in Spitzenzeiten“ (42 %). Auch On-Demand-ÖPNV wurde als positive Option für die Zukunft bewertet, 32 % der Befragten wünschten sich dies.

Bezüglich der möglichen zukünftigen Veränderungen in der Arbeitswelt durch elektrisches und automatisiertes Fahren (siehe Abbildung unten) sah rund ein Drittel der Befragten die Notwendigkeit, aktiv Lösungen zu entwickeln, um wegfallende Arbeitsplätze zu ersetzen. Gleichzeitig wurden aber von der Hälfte der Befragten auch Chancen gesehen, dass neue Geschäftsmodelle Arbeitsplätze schaffen könnten. Das angeforderte Qualifikationsniveau wurde dabei als erhöht angesehen und geht nach Einschätzung der Befragten mit stark verändertem Fachwissen einher (62 % von 110 Personen, die die Frage beantworteten, Mehrfachantworten möglich).

Die Frage nach der Wichtigkeit von ausgewählten U-Shift Fahrzeugeigenschaften beim Einsatz im ÖPNV ergab, dass die Befragten mehrheitlich einen umweltfreundlichen Antrieb, die Möglichkeit zur Kontaktaufnahme zu Personal und Barrierefreiheit als wichtigste Themen ansehen (Abbildung 53).

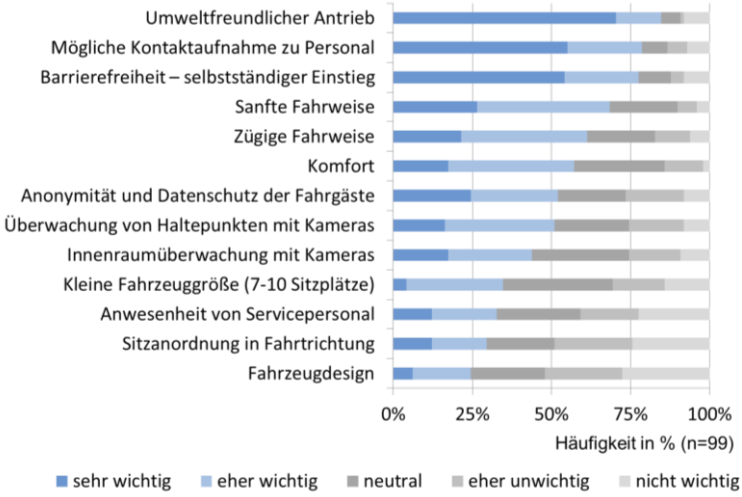


Abbildung 53: Wichtigkeit unterschiedlicher U-Shift Charakteristika beim Einsatz im ÖPNV

Die Befragung zu Beginn des Projekts wurde durch zahlreiche Workshops mit unterschiedlichem Fokus ergänzt. Ein wichtiges Thema waren dabei Anforderungen unterschiedlicher Interessensgruppen. Eine mögliche Anwendung von U-Shift liegt im Bereich des öffentlichen Personenverkehrs, wie beispielsweise mobilitätseingeschränkte Personen.

Durch den Entfall von (Fahr-)personal ist das Thema Barrierefreiheit von großer Wichtigkeit, um allen Personen einen eigenständigen Zugang anzubieten. Die Anforderungen für die barrierefreie Nutzung von U-Shift wurden in einem Workshop untersucht und wertvolle Erkenntnisse zur elektrischen Rampe, zusätzlichen Haltegriffen, Anpassung des Tür- und Rampenöffners, akustische und visuelle Signale bei Türöffnen/-schließen, etc. erhoben (Abbildung 54). Die Ergebnisse fließen auch über das Projekt hinaus in die weitere U-Shift Entwicklung ein.

Abbildung 54: Workshop Barrierefreiheit (Bild: DLR)

Zur weiteren Untersuchung von Gestaltungsaspekten für unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten für die U-Shift Kapseln betreute das DLR Arbeiten von Studierenden aus dem Master-Studiengang Engineering Design der Hochschule Magdeburg-Stendal, die für das U-Shift Konzept Kapselkonzepte entwarfen und als virtuelle 3D-Modelle umsetzten. Von dem breiten Spektrum der entstandenen Kapselvarianten ist eine Auswahl in Abbildung 55 dargestellt.

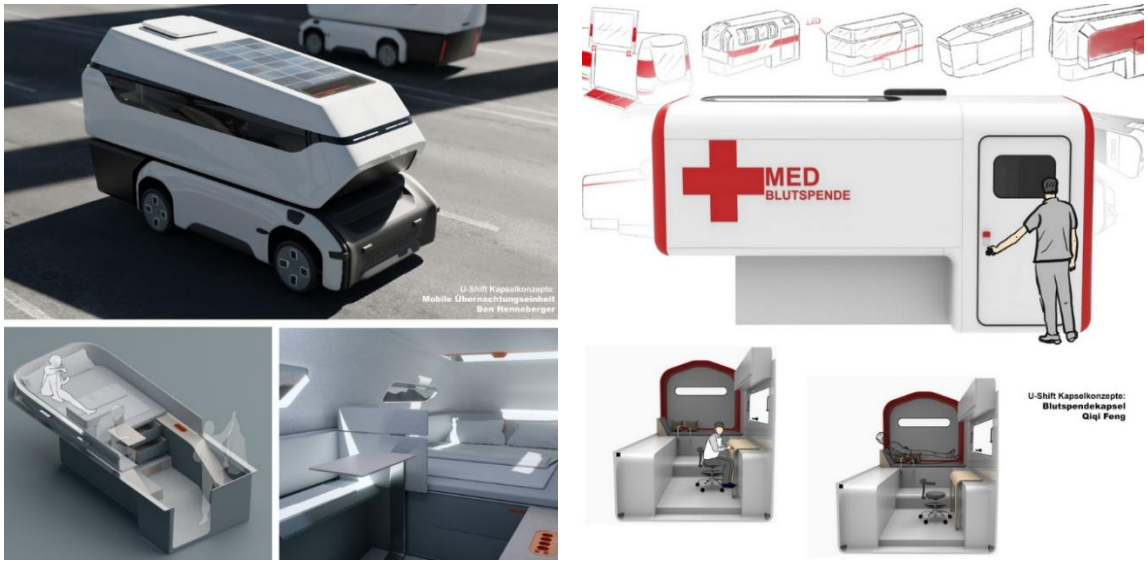


Abbildung 55: Beispiele für Designentwürfe für Kapselvarianten von Studierenden der Hochschule Magdeburg-Stendal (Bilder: DLR, Studierende der Hochschule Magdeburg-Stendal: Ben Henneberger und Qiqi Feng)

Ausstellungen zu den Projektinhalten von U-Shift II ergänzten die Erhebungen. So wurde das U-Shift Konzept und das Projekt U-Shift II im Rahmen einer Ausstellung bei der Landesgartenschau Eppingen und der Gartenschau in Neuenburg präsentiert. Im Rahmen einer Ideenwerkstatt zu möglichen U-Shift Anwendungen stellte ein Team des DLR dabei in Eppingen neue Ideen zur Mobilität von morgen vor und entwickelte diese gemeinsam mit Gästen der Gartenschau weiter. In kurzen Pop-Up Workshops sammelten Teilnehmende Ideen und tauschten sich zu Visionen zu U-Shift Anwendungen aus. Ergänzend zu Diskussionen zum Potential für städtische Gebiete bestand dabei ein reges Interesse an möglichen Anwendungen in ländlichen Räumen. Beispiele hierfür sind Zubringer zu bestehenden Bahnanbindungen oder Dienstleistungskapseln im medizinischen Bereich. Besonders interessiert waren Teilnehmende der Ideenwerkstatt an der Möglichkeit, das U-Shift mittels VR-Brille in virtueller Realität zu erleben. So konnten sie einen anschaulichen Eindruck des Fahrzeugs erhalten, indem sie beispielsweise virtuell in das Fahrzeug einsteigen und den Innenraum betrachten konnten. Das intuitive Erleben ergänzt klassische Methoden der Informationsvermittlung und unterstützt so den Austausch zwischen dem Forschungsteam und unterschiedlichsten Nutzergruppen.

In diversen Formaten wurden die Öffentlichkeit und Fachkreise projektbegleitend zu Forschungsergebnissen und dem U-Shift Konzept informiert. Unter anderem erfolgte dies über folgende Formate:

- U-Shift Film, z.B. über Youtube abrufbar (2020)
- Präsentation auf der virtuellen Zwischenbilanzkonferenz zum SDA BW (2021)
- Filmbeitrag bei Galileo (2021)
- Präsentation des U-Shift I Prototyps bei der IAA Open Space München (2021)
- Präsentation des U-Shift I Prototyps beim ITS Weltkongress Hamburg (2021)
- Beitrag im Magazin "Neuland", KIT (2022)
- Wissenschaftsfestival, Vortrag Schlossplatz Stuttgart (Juni 2022)
- Ausstellung bei der Gartenschau in Eppingen (Juli 2022)
- Ausstellung bei der Landesgartenschau in Neuenburg mit Vernissage (September 2022)
- E-Mobilitätstag Ilmenau (September 2022)
- EARPA – Vorstellung U-Shift Konzept (Okt. 2022)
- Besuch Sendung mit der Maus (Oktober 2022)
- Ausstellung zu U-Shift auf der Bundesgartenschau in Mannheim (2023)
- Präsentation eines U-Shift Prototyps bei der VDI Veranstaltung „Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn“ (2023)
- Internationales Stuttgarter Symposium (2023 und 2024)
- Präsentation U-Shift II auf der Hannover Messe (2024)
- 8. Jahresveranstaltung zum Strategiedialog Automobilwirtschaft Karlsruhe (Nov. 2024)
- U-Shift Website www.u-shift.de (2020-2026)

Zudem wurden die Forschungsarbeiten von U-Shift II in ca. 50 wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Fachartikeln dokumentiert bzw. der Fachwelt auf Konferenzen präsentiert, siehe Kapitel 5.

4.7.3. AP 7300: Anschlussfähigkeit & Transferkonzepte

Das Projekt entwickelte Beiträge zur Förderung der Marktreife des U-Shift Konzepts sowie für eine nachhaltige Ergebnisverwertung bei gleichzeitiger konzeptioneller Weiterentwicklung des Gesamtsystems. Methodisch wurden alle erarbeiteten Teilergebnisse kontinuierlich auf ihre industrielle Transferfähigkeit geprüft. Zur experimentellen Erprobung des U-Shift II Driveboard Prototyps unter realen Bedingungen wurden umfangreiche Tests auf einem nicht-öffentlichen Testfeld durchgeführt.

Der systematische Dialog mit unterschiedlichen Interessengruppen – einschließlich Kommunen, Industrievertretern und spezifischen Nutzergruppen – ergab Impulse für die strategische Weiterentwicklung des U-Shift-Konzepts. Durch diese interdisziplinäre Abstimmung wurden nicht nur praktische Rahmenbedingungen und Marktpotenziale identifiziert, sondern es ließen sich gezielt Entwicklungspfade ableiten. Diese reichen von der erforderlichen Validierung einer Demonstrator-Flotte im realen Quartierseinsatz über die Harmonisierung mechanischer und E/E-Schnittstellen bis hin zur Ausarbeitung skalierbarer Betriebs- und Geschäftsmodelle (siehe 4.1.1). Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichten eine bedarfsgerechte Spezifikation des Gesamtsystems und bilden eine Grundlage für die Weiterentwicklung der U-Shift Technologien über das Projekt hinaus.

4.7.4. AP7400: Demo-Event

Zum Projektabschluss präsentierte das U-Shift Team am 18. Juni 2026 den im Projekt entwickelten, aufgebauten und erprobten U-Shift II Driveboard-Prototyp (Abbildung 56) im Zusammenspiel mit verschiedenen Kapseln und gab einen Einblick in die Forschungsarbeiten. Vorträge und eine

Ausstellung zu Projektinhalten Postern und Exponaten erläuterten Details der U-Shift Technologien und des Bürgerdialogs. Im Rahmen der Veranstaltung zeigte das Team zudem erfolgreich verschiedene automatisierte Fahrmanöver inkl. hochpräzisem Rangieren und automatisiertem Kapselwechsel mit dem U-Shift II Driveboard. Die Funktionalität aller dafür notwendigen Fahrzeugsysteme konnte somit im Beisein externer Gäste demonstriert werden.

Abbildung 56: U-Shift II Driveboard mit Gästen der Abschlussveranstaltung des Projekts U-Shift II. (Bild: DLR) Von links: Prof. Andreas Wagner, Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS), Prof. Kora Kristof (KIT), Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut, Ministerin für Wirtschaft, Handwerk und Tourismus des Landes Baden-Württemberg, Prof. Meike Jipp, (DLR), Prof. Michael Buchholz, Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik der Universität Ulm

5. Literatur - Publikationen zu U-Shift II

[1] Markus Horn, Thomas Wodtko, Michael Buchholz, Klaus Dietmayer, Online Extrinsic Calibration based on Per-Sensor Ego-Motion Using Dual Quaternions, IEEE Robotics and Automation Letters, 2021

[2] Thomas Wodtko, Markus Horn, Michael Buchholz, Klaus Dietmayer, Globally Optimal Multi-Scale Monocular Hand-Eye Calibration Using Dual Quaternions, International Conference on 3D Vision, 2021

[3] Martin Herrmann, Tim Luchterhand, Charlotte Hermann, Thomas Wodtko, Jan Strohbeck, Michael Buchholz, Notes on the Product Multi-Sensor Generalized Labeled Multi-Bernoulli Filter and its Implementation, International Conference on Information Fusion, 2022

[4] Markus Horn, Thomas Wodtko, Michael Buchholz, Klaus Dietmayer, Extrinsic Infrastructure Calibration Using the Hand-Eye Robot-World Formulation, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2023

[5] Thomas Wodtko, Thomas Griebel, Michael Buchholz, Adaptive Patched Grid Mapping, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2023

[6] Markus Horn, Thomas Wodtko, Michael Buchholz, Klaus Dietmayer, User Feedback and Sample Weighting for Ill-Conditioned Hand-Eye Calibration, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2023

[7] Oliver Schumann, Michael Buchholz, Klaus Dietmayer, Efficient Path Planning in Large Unknown Environments with Switchable System Models for Automated Vehicles, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2023

[8] Thomas Wodtko, Michael Buchholz, Globally Optimal GNSS Multi-Antenna Lever Arm Calibration, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2024

[9] Thomas Wodtko, Thomas Griebel, Alexander Scheible, Michael Buchholz, Conflict Handling in Time-Dependent Subjective Networks, International Conference on Information Fusion, 2024

[10] Thomas Wodtko, Alexander Scheible, Michael Buchholz, Self-Assessment and Correction of Sensor Synchronization, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2024

[11] Oliver Schumann, Thomas Wodtko, Michael Buchholz, Klaus Dietmayer, Self-Assessment of Evidential Grid Map Fusion for Robust Motion Planning, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2024

[12] Markus Schön, Jona Ruof, Thomas Wodtko, Klaus Dietmayer, The ADUULM-360 Dataset - A Multi-Modal Dataset for Depth Estimation in Adverse Weather, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2024

[13] Michael Buchholz, Thomas Wodtko, Oliver Schumann, Dominik Authaler, The Automation Concept of the U-Shift II Vehicle, Stuttgart International Symposium, 2025

[14] Oliver Schumann, Michael Buchholz, Klaus Dietmayer, Dynamic Objective MPC for Motion Planning of Seamless Docking Maneuvers, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2025

[15] Thomas Wodkto, Alexander Scheible, Dominik Authaler, Michael Buchholz, Adaptive Minimal Latency In-Sequence Ordering for Multi-Channel Data Fusion in Autonomous Driving, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2025

[16] Thomas Wodtko, Thomas Griebel, Michael Buchholz, Klaus Dietmayer, A Unified Self-Assessment Framework for Autonomous Driving Stacks Using Subjective Logic, Uni-DAS e.V. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren, 2025

[17] Thomas Wodtko, Marco Deuscher, Michael Buchholz, Leveraging Motion Tracking for Sample Weighting in Motion-based Calibration and Self-Assessment, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2025

[18] Thomas Griebel, Thomas Wodtko, Michael Buchholz, Klaus Dietmayer, Self-Assessment and Monitoring Module for Tracking Algorithms in the Stone Soup Framework, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration (MFI), 2025

[19] Thomas Wodtko, Thomas Griebel, Michael Buchholz, eSLIM++ - an Efficient Subjective Logic Implementation in C++ Providing Easy-to-Use Python Interfaces, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration (MFI), 2025

[20] Thomas Wodtko, Michael Buchholz, Balancing Conflict and Harmony - Persistent Trust Revision in Time-Dependent Subjective Networks, IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration (MFI), 2025

[21] Robin Dehler, Oliver Schumann, Jona Ruof, Michael Buchholz, Multi-Staged Framework for Safety Analysis of Offloaded Services in Distributed Intelligent Transportation Systems, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2025

[22] Sören Fuchs, Oliver Schumann, Jens Neubeck, Andreas Wagner, Combining Hardware-in-the-Loop and Software-in-the-Loop Using Open Source Simulation for Enhanced Testing of Autonomous Vehicle, Tagung Automatisiertes Fahren, 2025

[23] Jasper Wolff, Thomas Wodtko, Michael Buchholz, Efficient Map-Based Consistency Check Using a Sigma-Point Signed-Distance Estimator, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2026

[24] Robin Dehler, Dominik Authaler, Aryan Thakur, Thomas Wodtko, Michael Buchholz, Analysis of Efficient Transmission Methods of Grid Maps for Intelligent Vehicles, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2026

[25] Alexander Scheible, Thomas Wodtko, Michael Buchholz, The Persistence Model for Multi-Object Tracking: Modeling Error Impact and Parameter Estimation, International Conference On Information Fusion, 2026

[26] Sören Fuchs, Jens Neubeck, Andreas Wagner, Trajectory Tracking Control and State Estimation for Highly Automated Vehicles: A System Framework Implemented on U-Shift II, Stuttgart International Symposium, 2026

[27] Marc Schindewolf, Houssem Guissouma, Eric Sax, Analysis and Modeling of Future Electric/Electronic Architectures for Modular Vehicle Concepts, 21. Internationales Stuttgarter Symposium, 2021

[28] Felix Krauter, Marc Schindewolf, Eric Sax, Certificate-based Safety Concept for Future Dynamic Automotive Electric/Electronic Architectures, 22. Internationales Stuttgarter Symposium, 2022

[29] David Kraus, Sören Fuchs, Veljko Vučinić, Jochen Kiebler, Andreas Wagner, Eric Sax, Introducing a Dynamic Link for Hybrid E/E-Architectures of Modular Electric Autonomous Vehicles, 37. EVS Symposium, 2024

[30] David Kraus, Daniel Baumann, Veljko Vučinić, Eric Sax, Cloud-Enabled Reconfiguration of Electrical/Electronic Architectures for Modular Electric Vehicles, World Electric Vehicle Journal, 16(3), 111, 2025

[31] Veljko Vučinić, David Kraus, Eric Sax, Diagnostics for Automated Electric Vehicles: Batteries Short-Term Faults Predictions, 2025 IEEE 7th International Conference on Cybernetics, 2025

[32] Veljko Vučinić, David Kraus, Dragan Aleksendrić, Eric Sax, Operational Hypervisor: Anomaly Detection and Handling for Automated Electric Vehicles, 20th Annual IEEE International Systems Conference (SysCon), 2026

[33] Marco Münster, Mascha Brost, Robert Hahn, Tjark Siefkes, Gerhard Kopp, Stephan Schmid, Tim Knutzen, U-Shift vehicle concept: modular on the road, 21. Internationalen Stuttgarter Symposium, 2021

[34] Marco Münster, Mascha Brost, Tjark Siefkes, Gerhard Kopp, Elmar Beeh, Frank Rinderknecht, Stephan Schmid, Manuel Osebek, Sebastian Scheibe, Robert Hahn, David Heyner, Philipp Klein, Giovanni Piazza, Christian Ulrich, Werner Kraft, Franz Philipps, Lennart Köhler, Michael Buchholz, Thomas Wodtko, Klaus Dietmayer, Michael Frey, Fabian Weitz, Frank Gauterin, Hannes Stoll, Marc Schindewolf, Houssem Guissouma, Felix Krauter, Eric Sax, Jens Neubeck, Sven Müller, Sven Eberts, Michael Göldner, Stephan Teichmann, Jochen Kiebler, Miralem Saljanin, Michael Bargende, Andreas Wagner, U-Shift II vision and project goals, 22. Internationales Stuttgarter Symposium, 2022

[35] Fabian Weitz, Michael Frey, Frank Gauterin, Entkoppelbares Lenksystem mit Möglichkeit des gleich- und gegensinnigen Radeinschlags, chassis. tech plus 2022/ ATZ, 2022

[36] Fabian Weitz, Michael Frey, Frank Gauterin, Fahrwerkskonzept für große Lastbereiche mit integrierter Niveauregulierung, Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn, 2022

[37] Fabian Weitz, Michael Frey, Frank Gauterin, Fahrwerkskonzept für große Lastbereiche mit integrierter Niveauregulierung für das Projekt U-Shift, 22. Internationales Stuttgarter Symposium, 2022

[38] Jochen Kiebler, Miralem Saljanin, Sven Müller, Smiljana Todorovic, Jens Neubeck, Andreas Wagner, Novel Approach for Vehicle-Self-Localization, 22. Internationales Stuttgarter Symposium, 2022

[39] Marco Münster, Sebastian Scheibe, Manuel Osebek, Robert Hahn, Gerhard Kopp, Tjark Siefkes, Vehicle concepts for the mobility of tomorrow, Automatisiertes Fahren 2022 ATZ Live Tagung, 2022

[40] Marco Münster, Sebastian Scheibe, Manuel Osebek, Gerhard Kopp, Tjark Siefkes, Autonomous. Electric. Modular. The U-Shift Project, Forum Mobilitaet Ilmenau, 2022

[41] Marco Münster, Mascha Brost, Fahrzeugkonzepte der Zukunft für die Mobilität von morgen, Wissenschaftsfestival Stuttgart, 2022

[42] Marco Münster, Sebastian Scheibe, Manuel Osebek, Tjark Siefkes, Modulares Fahrzeugkonzept für die Mobilität von morgen, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 2022

[43] Jochen Kiebler, Lokalisierung und Fahrzustandsschätzung für eine vollautomatisierte elektrische Fahrzeugplattform, Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart, 2023

[44] Manuel Osebek, Sebastian Scheibe, Marco Münster, Gerhard Kopp, Tjark Siefkes. Insights into the Vehicle Architecture of the Modular Vehicle Concept U-Shift, Car Body Engineering Insight @ Jaguar Land Rover, 2023

[45] Fabian Weitz, Michael Frey, Frank Gauterin, Methodical Design of a Subframe for a Novel Modular Chassis Concept without Knowledge of Final Vehicle Parameters, SAE International Journal of Commercial Vehicles 17(1):2024, 2024

[46] Fabian Weitz, Christian Simon Debnar, Michael Frey, Frank Gauterin, Additively manufactured wheel suspension system with integrated conductions and optimized structure, Stuttgarter Symposium 2024, 2024

[47] Fabian Weitz, Christian Simon Debnar, Michael Frey, Frank Gauterin, Additively manufactured wheel suspension system with integrated conductions, MDPI Vehicles, 2024

[48] Fabian Weitz, Niklas Leonard Ostendorff, Michael Frey, Frank Gauterin, Steering system with mechanical coupling of the wheels and the possibility of wheel steering in opposite directions, Stuttgarter Symposium 2024, 2024

[49] Fabian Weitz, Niklas Leonard Ostendorff, Michael Frey, Frank Gauterin, Lifting Actuator Concept and Design Method for modular Vehicles with autonomous Capsule changing Capabilities, MDPI Vehicle Design Processes, 2nd Edition, 2024

[50] Thomas Wodtko, Alexander Scheible, Dominik Authaler, Michael Buchholz, Batched Minimal Latency In-Sequence Ordering for Multi-Channel Data, The IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2025

[51] Marco Münster, Tjark Siefkes, Mascha Brost, Robert Hahn, Gerhard Kopp und Stephan Schmid, U-Shift vehicle concept: modular on the road. In: 21st Internationale Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, 7. Springer. Internationale Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, 2021-03-30 - 2021-03-31, Stuttgart. doi: 10.1007/978-3-658-33466-6_23. ISBN 978-3-658-33466-6. ISSN 2198-7432, 2021

[52] Christian Ulrich, Vergleichende Bewertung zur ganzheitlichen Untersuchung neuartiger, im Betrieb modularer Fahrzeugkonzepte für den urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehr. Dissertation, Universität Stuttgart. doi: 10.57676/qcdc-k252, 2024.