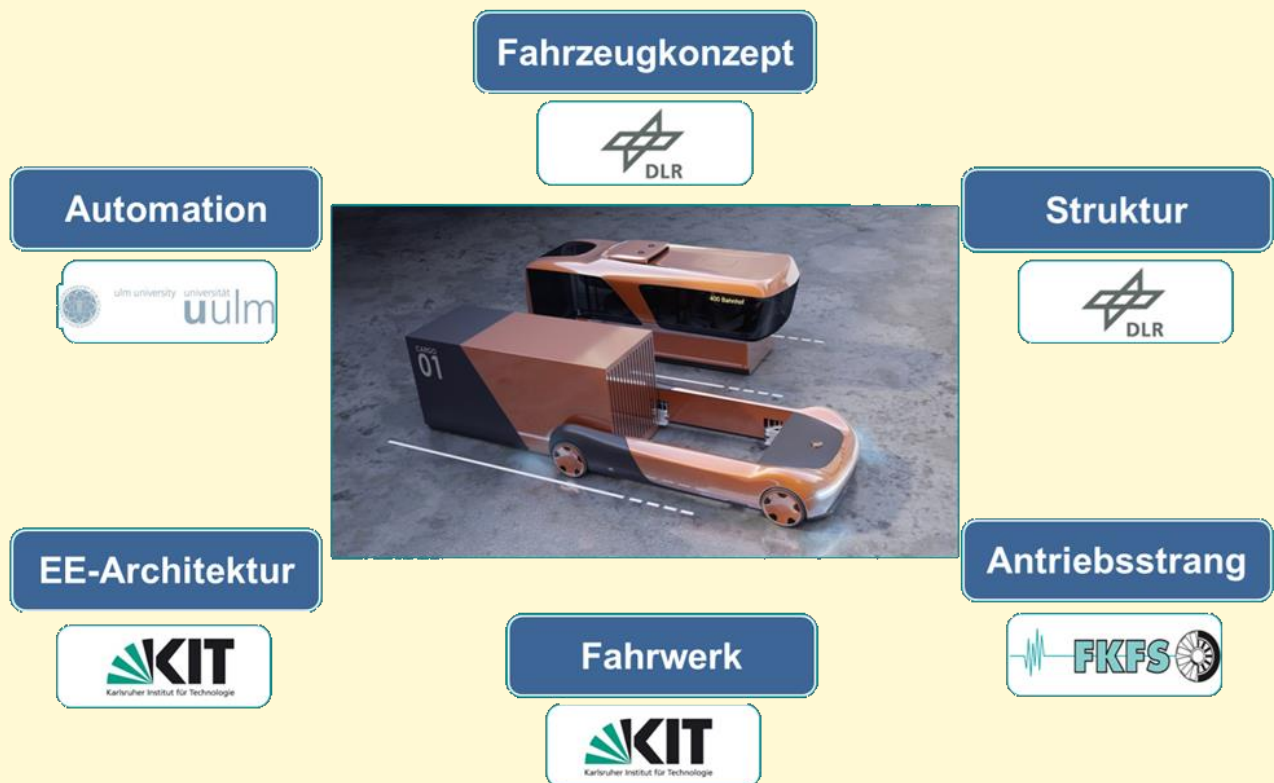


# Fahrzeugkonzept U-Shift Machbarkeitsstudie

## Projekt: Modular Electrified Capsule and Platform (ModECaP)



Projektförderung  
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg,  
Theodor-Heuss-Str. 4  
70174 Stuttgart

**Förderzeitraum:**

1.9.2018 - 31.12.2019

**Projektpartner:**

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

Forschungsinstitut für Krafftahwesen 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)

**Autoren (in alphabetischer Reihenfolge des Nachnamens):**

Michael Buchholz, UULM-MRM  
Sven Eberts, FKFS  
Michael Frey, KIT-FAST  
Houssein Guissouma, KIT-ITIV  
Marco Münster, DLR  
Jens Neubeck, FKFS  
Hannes Stoll, KIT-ITIV  
Christian Ulrich, DLR  
Tjark Siefkes, DLR  
Jürgen Weimer, DLR

**Datum:**

09.12.2019

**Kontakt:**

Jürgen Weimer  
juergen.weimer@dlr.de

# Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	4
2. Neue Fahrzeugkonzepte – Stand der Entwicklungen	5
2.1. Modulare Fahrzeugkonzepte ab Werk (ip-modular)	5
2.2. „On-the-Road“-modulare Fahrzeugkonzepte	7
3. U-Shift – ein neues “On-the-Road” modulares Fahrzeug	8
4. Technische Machbarkeit	10
4.1. Fahrzeugkonzept und Gesamtfahrzeug	10
4.2. Fahrzeugstruktur	15
4.3. Antrieb	16
4.4. Fahrwerk	18
4.5. Elektrik/Elektronik Architektur und Methoden	20
4.6. Automatisierung	24
5. Verwertungspotential	27
5.1. Markt	27
5.2. Stakeholder Workshop Anwender	28
5.3. Stakeholder Workshop Hersteller	29
5.4. U-Shift-Modell und weitere Kommunikation	30
5.5. Geschäftsmodelle	30
6. Literaturverzeichnis (alphabetisch)	33

# 1. Zusammenfassung

Die Zielsetzung des Projektes ModECaP war der Nachweis der Machbarkeit eines Demonstrations- und Industrialisierungsvorhabens und der Darstellung möglicher Anwendungen inklusive zugehöriger Geschäftsmodelle für ein „on-the-road“-modulares, fahrerloses Fahrzeugkonzept. Die Machbarkeit einer neuen Mobilitätslösung basierend auf einem disruptiven Fahrzeugkonzept hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: a) dem Fahrzeugkonzept selbst mit all seinen neuen innovativen Ausprägungen und b) der erfolgreichen Anwendbarkeit im Transportsystem mit entsprechend neuen Geschäftsmodellen. Im Zentrum stehen die Stakeholder.

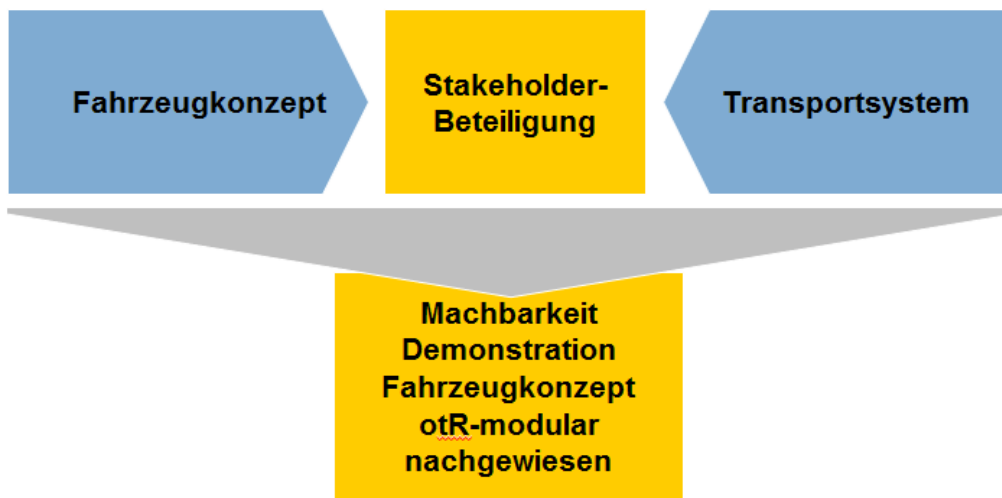


Abbildung 1: Zielbild und Vorgehensweise

Das Projekt ModECaP wurde in allen Arbeitspaketen entsprechend der Planung umgesetzt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die technische Machbarkeit gewährleistet ist. Das Fahrzeugkonzept ist in sich schlüssig. Die Subsysteme Fahrzeugstruktur, Antrieb, Fahrwerk, Elektrik/Elektronik sowie Automatisierung wurden im Rahmen dieser Studie ausgearbeitet und analytisch verifiziert.

Für die Marktanalyse wurde Deutschland in Betrachtung gezogen, mit einzelnen Ausblicken auf den globalen Markt. Dabei lag der Fokus auf den urbanen Räumen. In mehreren Stakeholder-Workshops mit Anwendern und potentiellen Herstellern wurden die Anforderungen weitestgehend bestätigt und für das Nachfolgeprojekt weiter konkretisiert. Anwender wie auch Hersteller zeigten sich im Allgemeinen positiv von dem neuen Fahrzeugkonzept überrascht. Im Rahmen der U-Shift Anwendungsanalyse wurden Mobility-as-a-Service (MaaS) und Logistic-as-a-Service (LaaS) als potentielle Geschäftsmodelle identifiziert und erstmalig modelliert. Ein möglicher Business Case wurde dazu im Detail beleuchtet: Das „neue Unternehmen“ vereint die Aktivitäten eines Spediteurs und eines öffentlichen Verkehrsbetreibers: Ein Unternehmen, das Transportdienstleistungen für Unternehmen des öffentlichen Verkehrs, der Paketzustellung und der Supermarktzustellung anbietet. Hierzu wurde ein Betriebstag in einer fiktiven Innenstadt betriebswirtschaftlich analysiert. Für diesen Anwendungsfall konnte die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugkonzepts nachgewiesen werden. Weitergehende Untersuchungen sind in den Nachfolgeprojekten U-Shift I und U-Shift II geplant.

## 2. Neue Fahrzeugkonzepte – Stand der Entwicklungen

Verschiedene Akteure der etablierten Automobilbranche, aber auch anderer Bereiche, präsentieren unkonventionelle Mobilitätskonzepte, die die bekannten sozioökonomischen Veränderungen in Umwelt und Verkehr aufgreifen. Eine große Zahl dieser innovativen Ansätze richtet sich auf bodengebundene Fahrzeugkonzepte, wobei andere versuchen den Verkehr in die Luft oder unter die Erde zu verlagern. Der Fokus dieses Berichts sind ausschließlich bodengebundene Fahrzeugkonzepte.

Viele dieser neuen Fahrzeugkonzepte verfolgen einen modularen Ansatz. Ihr gemeinsames Ziel ist es, maßgeschneiderte Fahrzeuge für spezifische Anwendungen anzubieten und nicht den herkömmlichen „One-Fits-All“-Ansatz weiter zu entwickeln. Auf diese Weise kann auch der „New Purpose Vehicle“-Design-Ansatz effektiv umgesetzt werden. Man unterscheidet in zwei Kategorien: 1) Der modulare Produktionsansatz (in-production-modular, ip-modular) trennt das konventionelle Fahrzeug in Einzelkomponenten, die zu einsatzoptimierten Designs zusammengefügt werden können. Die ip-Modularisierung erfolgt bereits während der Produktion im Werk, d.h. nach Verlassen des Werks sind die einzelnen Module fest „verheiratet“. 2) Der modulare Ansatz auf der Straße (on-the-road-modular, otr-modular) betrifft i.A. ein standardisiertes Antriebsmodul sowie eine anwendungsspezifische Anzahl von zweckoptimierten Transporteinheiten, die während des Betriebs dynamisch gewechselt werden können. Für alle neuen Bodenfahrzeugkonzepte gilt, dass sie in der Regel für hochautonome und vernetzte Funktionen sowie für vollelektrischen Antrieb ausgelegt werden.

### 2.1. Modulare Fahrzeugkonzepte ab Werk (ip-modular)

Der modulare Produktionsansatz ermöglicht es den Automobilherstellern, durch den Einsatz vieler identischer Komponenten eine hohe Variation an anwendungsoptimierten Fahrzeugderivaten herzustellen und damit unter anderem die Produktions- und Entwicklungskosten zu senken. Eine einfache Form dieser ip-Modularisierung besteht z.B. aus Plattformen mit den Fahrfunktionen und Transporteinheiten, die für bestimmte Zwecke ausgelegt sind. Diese beiden Komponenten werden am Ende der Produktion fest verbunden. Die Fahrzeuge sind damit beim Verlassen des Werkes fixiert, d.h. ein dynamischer Wechsel der Transporteinheiten auf der Straße ist nicht möglich. Unternehmen wie Open Motors ("EDIT"), Toyota („ePalette“) oder Renault („EZ-Pro“) haben u.a. ip-modulare Fahrzeugkonzepte eingeführt. Dabei verfolgen sie einen "Mobility as a Service"-Ansatz (MaaS): Sie stellen die Plattform zur Verfügung und Anwender wie Amazon oder Pizza Hut gestalten die Aufbauten individuell. Die Hersteller bleiben Eigentümer des Fahrzeugs und sind (je nach Geschäftsmodell) während der Lebensdauer für die Wartung verantwortlich. Das von mehreren deutschen Universitäten initiierte Projekt UNICARagil verfolgt ebenfalls die ip-Modularisierung. Die skalierbare Antriebsplattform und die unterschiedlichen Nutzungseinheiten sollen Varianten für Taxis, Shuttles, Privatnutzung und Paketdienste ermöglichen. Neben der Modularisierung liegt der Schwerpunkt der Forschung unter anderem auf der Entwicklung einer innovativen elektronischen Architektur, die sich bspw. mit der Updatefähigkeit, einer servicebasierten Softwarearchitektur oder dem ausfallsicheren Schutz für verschiedene Anwendungen befasst.

Eine aktuell favorisierte Anwendung für modulare Fahrzeuge ist der Einsatz als Peplemover. Viele Unternehmen und Forschungseinrichtungen sehen in On-Demand Peplemover eine Lösung, um den steigenden Mobilitätsanforderungen in Städten gerecht zu werden. Während modulare Fahrzeugkonzepte neben einer Vielzahl anderer Anwendungen meist für einen Shuttle-Einsatz vorgesehen werden, gibt es

andere, die sich allein auf den Einsatz als Peoplemover spezialisieren. Peoplemover eignen sich hervorragend als Shuttle für den bedarfsgerechten Personentransport und sollen in Zukunft den öffentlichen Nahverkehr unterstützen (Beispiele: Hamburger Hochbahn; Berliner Verkehrsbetriebe). Weitere Konzepte sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Konzepte sehen alle sehr ähnlich aus, da sie jeweils für den Einsatz im Personenverkehr optimiert sind.



Abbildung 2: Peoplemover

Local Motors Olli, EasyMile EZ10, Continental CUBe, Bosch Shuttle, Navya, Paravan CLOUi, VW Sedic

Im Rahmen des Metaprojekts "Next Generation Car" (NGC) am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde mit dem NGC-UMV (Urban Modular Mover), ein ip-modulares Fahrzeugkonzept entwickelt. Es berücksichtigt Trends wie zunehmende Urbanisierung, Modularisierung, Elektrifizierung und die Einführung eines hohen Automatisierungsgrades und wurde auf der Internationalen Automobilausstellung 2019 vorgestellt. Das NGC-UMV bietet ein intelligentes modulares Plattformkonzept in der Karosseriestruktur, im Antriebsstrang und in den verschiedenen Automatisierungsstufen. Die Flexibilität der Plattform bietet die Möglichkeit, eine Vielzahl von Elektrofahrzeugderivaten für Personen und Güter zu realisieren: (a) den UMV Basic, ein 2+2-Sitzer mit einer Länge von 3,7 m; (b) den UMV Long, ein 2+2-Sitzer mit 4,1 m und einem größeren Kofferraum; (c) den UMV 2+Cargo, einen Kleintransporter; (d) einen völlig autonomen UMV Peoplemover als 2+2-Sitzer; (e) den UMV Cargo Mover, einen vollständig autonomen Lieferwagen. Die Modularisierungsschnittstellen des Karosseriekonzepts sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Karosserieplattform des UMV bietet die Variabilität in skalierbaren Front- und Heckmodulen, variablen Gewächshausabschnitten und Längenvariabilität. Die Gleichteilestrategie für z.B. den UMV Basic und UMV Peoplemover zeigt, dass nur die spezifischen Karosseriekomponenten - Dach, Dachrahmen, Dachquerträger und Seitenrahmen - geändert werden müssen, um die beiden Derivate auf der UMV-Plattform aufzubauen. Die anderen Bauteile bleiben die gleichen.

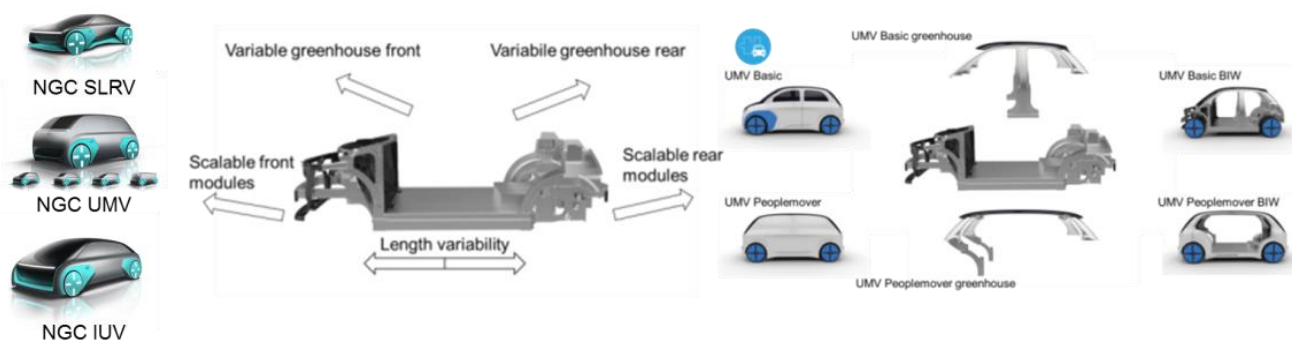


Abbildung 3: NGC Konzepte und UMV Modularisierungsstrategie

## 2.2. „On-the-Road“-modulare Fahrzeugkonzepte

Otr-modulare Fahrzeuge verfolgen eine andere Art der Modularisierung. Sie sind unterteilt in ein Antriebsmodul ("Driveboard") und ein Transportmodul ("Kapsel"). In einem herkömmlichen Auto wären dies das Fahrgestell und die Kabine. Das autonome Driveboard<sup>1</sup> kann je nach anstehender Transportaufgabe unterwegs verschiedene Kapseln aufnehmen. Das Kapsel-Wechsel-System ist das Schlüsselement dieser Konzepte. Die Kapseln sind für bestimmte Zwecke optimiert, z.B. für den Personentransport, Paketzustellung, etc. Diese dynamische otr-Modularisierung ermöglicht einen effizienten und flexiblen Einsatz der teuren Driveboards. Für ein autonomes<sup>1</sup> Driveboard entstehen weitere Vorteile wie ein möglicher Rund-um-die-Uhr-Betrieb und entfallende Personalkosten. Abbildung 4 zeigt vier aktuelle Beispiele:



Abbildung 4: Otr-modulare Fahrzeugkonzepte

Rinspeed (Snap und microSNAP), Mercedes-Benz (Vision Urbanetic), Continental (BEE), Airbus (Pop.Up Next)

Ein häufig zitiertes otr-modulares Fahrzeugkonzept ist der "Snap" von Rinspeed, dessen Hubsystem in die Ecken der Kapsel integriert ist, so dass das Driveboard (geformt wie ein „Skateboard“) unter die sich selbst anhebende Kapsel fahren kann. Darüber hinaus zeigte Rinspeed ein ähnliches Konzept, den Rinspeed "microSNAP" und auch den „MetroSnap“ auf der CES 2019. Dieses ist eine kleinere Version des Snap, die sich vor allem im Kapsel-Wechsel-System unterscheidet. Da die Kapseln beim microSNAP keine eigene Hubfunktion besitzen wird Infrastruktur in Form von zwei (Industrie-)Robotern benötigt, welche die Kapsel auf das Skateboard heben. Im Zuge der Veröffentlichung des microSNAPs gab Rinspeed bekannt, dass ihre SNAP-Flotte durch Schwarm-Intelligenz logistik- bzw. routenseitig optimiert gesteuert werden soll. Der Innenraum wird, je nach Anwendung, individuell von den Geschäftskunden gestaltet.

Im Hintergrund des modularen Konzepts "BEE" von Continental steht ebenfalls eine Schwarmintelligenz (vermutlich leitet sich daher die Bienen-Analogie ab). Die BEE soll in erster Linie ein urbaner Peoplemover sein, aber auch Kapseln für andere Anwendungen sind Teil des Systems. BEE fehlt jedoch ein durchgängiges Konzept für die Modularisierung bzw. den Kapselwechsel.

Mercedes-Benz präsentierte 2018 sein Konzept "Vision Urbanetic". Wie der microSNAP soll das Konzept während des Betriebs ohne Infrastruktur modular auf der Straße die Kapseln wechseln können.

<sup>1</sup> Die Driveboards sind in der Regel als autonome Fahrzeuge konzipiert.

Bisher wurde lediglich beschrieben, dass für den automatischen Wechsel der Kapseln das Fahrwerk seitlich ausgefahren werden soll. Solche Konstruktionen stellen einen sehr hohen technischen Aufwand dar. Bisher integriert der Vision Urbanetic eine "Lieferkapsel" sowie eine für den Personenverkehr.

Das Konzept "Pop.Up Next", das in Zusammenarbeit von Airbus, Audi und Italdesign präsentiert wurde, kombiniert Technologien von Flugzeugen und Straßenfahrzeugen in einer dynamischen otr-Modularisierung. Es besteht aus einer Antriebseinheit und getrennten Kapseln, ergänzt durch eine autonome und elektrische Drohne mit einer Schnittstelle zur Aufnahme der Kapseln. So ist der Pop.Up Next sowohl ein Bodenfahrzeug als auch ein luftgestützter Shuttle. Bisher ist das Konzept allerdings nur für den On-Demand-Personentransport ausgelegt. Die Drohne ersetzt das sonst notwendige Hubsystem, da sie vertikal starten und landen kann. Das Konsortium sieht vor, die Kapsel in weitere Transportsysteme wie Züge für ein multimodales Transportsystem zu integrieren.

### 3. U-Shift – ein neues "On-the-Road" modulares Fahrzeug

Das Projektkonsortium favorisiert ein neues Fahrzeugkonzept namens "U-Shift", welches auch auf einer dynamischen otr-Modularisierung basiert. U-Shift besteht aus einer autonomen, fahrerlosen und elektrischen Antriebseinheit (Driveboard) und getrennten Kapseln für den Transport von Waren und Personen (Abbildung 5). Das Driveboard ist gekennzeichnet durch ein integriertes, standardisiertes Hubsystem zur Aufnahme von individuellen Transportkapseln, insbesondere um die verschiedenen Anwendungsfälle wirtschaftlich zu gestalten.



Abbildung 5: U-Shift –design renderings für verschiedene Anwendungen (MIV, ÖV, Lieferverkehr)

Das Driveboard integriert alle Komponenten und Systeme, die für das autonome Fahren, das Kapselhandling und das Laden erforderlich sind. Abbildung 6 zeigt die Hauptkomponenten des Antriebsstrangs: (1) Hinterrad mit Federung, (2) Vorderradantrieb und (3) Batterie. Das Hubsystem, basierend auf einem verstellbaren Fahrgestell, wird nicht in der Kapsel, sondern in das U-förmige Driveboard integriert. Basierend auf einer Bedarfsanalyse und dem Vergleich mit anderen otr-modularen Konzepten und führt der neue Ansatz zu einer deutlichen Reduzierung der Kapsel- und Betriebskosten. Dies ist wesentlich für die den wirtschaftlichen Betrieb, da in typischen Anwendungen etwa 5-10 mal mehr Kapseln als Driveboards benötigt werden.



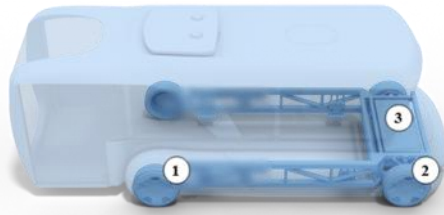


Abbildung 6: U-Shift – Konzept - Driveboard Komponenten<sup>2</sup>

Die Einsatzmöglichkeiten reichen von z. B. öffentlichem Personentransport (Peoplemover), Paketzustellung, Einzelhandelsbelieferung, Transport von Werkzeugen und Materialien für Handwerker über Recycling mit speziellen Entsorgungskapseln bis hin zu Wohnkapseln als Alternative für Wohnmobile. Daraus ergibt sich eine sehr hohe Variantenvielfalt an spezifischen Vorteilen, da er z.B. 1) zukünftig Kapseln. Für sehr viele Anwendungsfälle ist der ebene Zugang zur Kapsel von Laderampen für den städtischen Einzelhandel ersetzt und 2) körperlich Beeinträchtigten den Zugang zum Fahrzeug ermöglicht. Grundsätzlich sollten alle Kapseln eine standardisierte Schnittstelle aufweisen und die gleichen Außenabmessungen (insbesondere Länge und Breite) besitzen<sup>3</sup>. Auch die Schnittstellen für die Aufnahme und Verriegelung- sowie der Elektrik- und Datenanschluss müssen standardisiert sein.

Für einige Anwendungen, wie z.B. den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), ist eine zusätzliche Batterie in der Kapsel erforderlich, z.B. für die Klimatisierung auch ohne Driveboard oder die Erweiterung der Reichweite des Antriebs. Da das Driveboard für verschiedene Kapseltypen und damit für verschiedene Anwendungen gleich sein wird, muss das Chassis sowohl für den Einsatz ohne Nutzlast als auch für den Transport einer Kapsel mit maximaler Nutzlast (Personen oder Güter) ausgelegt werden. Je nach Anwendungsfall kann die Kapsel mit einem Überhang für mehr Platz versehen werden (Abbildung 5, Mitte). Dieser Überhang stellt allerdings eine Herausforderung für automatisierte Fahrfunktionen dar, da Sensoren am Driveboard nicht mehr hinter die Kapsel sehen können (Blindspot, v.a. bei Abbiege- und Überholvorgängen essentiell). Da die Kapseln kostengünstig bleiben sollen, müssen möglichst alle Sensoren im Driveboard integriert werden. Hinsichtlich der Automatisierung wird u.a. auch daher ein innovativer Ansatz bei der Fahrzeugautomatisierung favorisiert.

Die konsequente otr-Modularität ermöglicht es, das teure Driveboard rund um die Uhr zu nutzen. Unsere Vision ist, dass es sowohl Flotten von Driveboards, als auch eine große Anzahl von verschiedenen individueller Kapseln gibt. Es wurde eine Fahrzeugfamilie von Driveboards in verschiedenen Größen konzipiert. Dies eröffnet den Weg für viele neue Geschäftsmöglichkeiten<sup>4</sup>.

<sup>2</sup> Eigene Darstellung

<sup>3</sup> Dies gilt für Kapseln einer Driveboard-Familie (siehe Kapitel 4.1)

<sup>4</sup> Siehe Kapitel 5

## 4. Technische Machbarkeit

In diesem Kapitel werden die relevanten Subsysteme und Komponenten zur Machbarkeit des vorgeschlagenen Fahrzeugkonzepts U-Shift im Detail betrachtet.

### 4.1. Fahrzeugkonzept und Gesamtfahrzeug

Im Bereich Gesamtfahrzeugkonzept werden unterschiedliche Hauptgruppen definiert und die verschiedenen Teilbereiche von Automation, Fahrzeugstruktur, Fahrwerk, Antriebsstrang, EE-Architektur koordiniert (Abbildung 7).



Abbildung 7: Fahrzeugkonzept U-Shift Hauptgruppen

Wie bereits oben beschrieben sind die spezifizierten Fahrzeugkonzept-Merkmale und -Highlights die „On-the-road“-Modularität, das fahrerlose Fahren für Personen oder Gütern in Cargokapseln oder Personenkapsel für den ÖPNV oder den MIV (Abbildung 8). Das Konzept bietet die Möglichkeit unterschiedlichste Kapselvarianten zu generieren. Zu diesen Kapselvarianten gehören unterschiedliche Fahrzeuggrößen in Large, Medium, Small oder Extra Small (Abbildung 9). In der nächsten Phase werden die Arbeiten zur Umsetzung der Medium-Variante mit 4,2 t fokussiert.



**„On-the-Road“ Modularisierung**



**City-Logistik:**  
KEP, Last-Mile,  
Handel, Handwerk,  
Stückgut, ...



**ÖV:**  
Peplemover,  
Quartiersbus,  
Großraumtaxi, ...



**MIV:**  
privat  
individ. Kapseln  
Taxi, Flotte, ...

**Driveboard:**

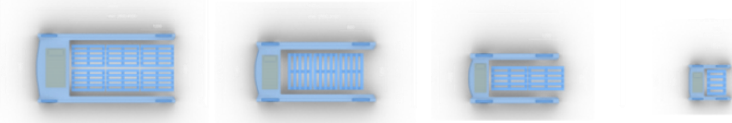
- Standardisiert
- Hochautomatisiert
- Elektrisch
- Große Stückzahl (Industrie)

**Kapseln:**

- Individualisiert
- Flexibel
- Bedarfsgerecht
- „Einfach“, leicht, kosteneffizient
- Variantenstückzahl (KMU)

Abbildung 8: Darstellung des Fahrzeugkonzept U-Shift und der Highlights „On-the-road“-Modularität, das fahrerlose Fahren für Personen oder Gütern

	Large	Medium	Small	X-Small
Typ	„Lkw / Bus“	„Kleinbus“	„Kleinwagen“	„Micro-Mover“
Driveboard: (L*B; mm)	5000 x 2500 <sup>*1</sup>	4000 x 2000	3000 x 1650	1200 x 1200
Gesamtgew.: (to)	tbd. << 7,5	3,5 (+ 0,75) <sup>*2</sup>	tbd. 1,5	0,6
Reichweite: (km)	200 (∞) <sup>*3</sup>	200 (∞) <sup>*3</sup>	200 (∞) <sup>*3</sup>	100
Max. Geschw.: (km/h)	80	80	tbd. 100	50
Ladung: („Paletten“)	6 (8) <sup>*4</sup>	3 (4) <sup>*4</sup>	2	½
(Personen)	12 (16) <sup>*4</sup>	8 (9) <sup>*4</sup>	2+2	1 +1
Zuladung: (to)	> 2	> 1	> 0,5	> 0,3



\*1) Maximalbreite StVZO \*2) incl. Batterie möglich  
\*3) mit Kapselbatterie \*4) Langkapsel (Überstand)

Abbildung 9: Fahrzeugkonzept U-Shift – Unterschiedliche Fahrzeuggrößen

In der Fahrzeugkonzeption werden unterschiedliche Merkmale wie beispielsweise die maximale Zuladung, die Positionierung der Tür oder die Anzahl der Sitz- und Stehplätze definiert. In Abbildung 10 ist eine Konfiguration für die Personenkapsel mit 7 Sitzplätzen, einem Stehplatz und einem Platz für einen Rollstuhl vorgesehen. Im Vergleich dazu sind auf der Fläche von 1250 x 2600 mm der Cargokapsel ohne Überhang drei Europaletten positioniert, mit Überhang von 850 mm sind auch vier Euro Paletten quer in einer Cargokapsel zu transportieren.

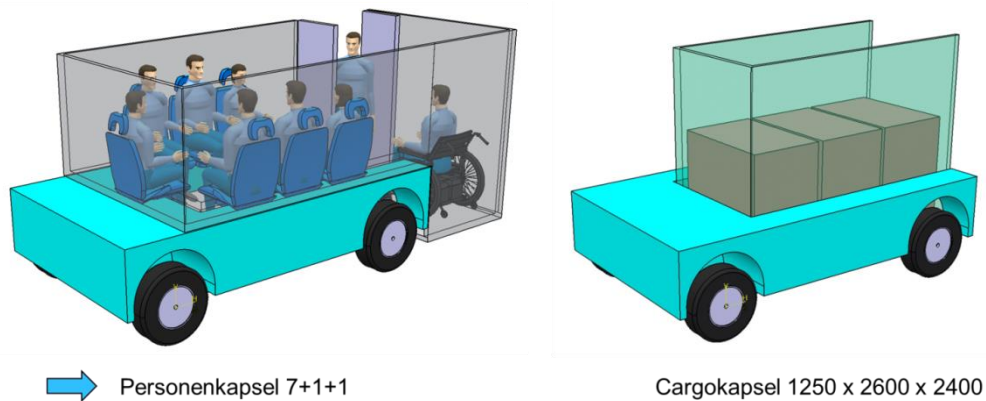


Abbildung 10: Fahrzeugkonzept U-Shift – Personenkapsel und Cargokapsel

Zusätzlich zu den Sitzplätzen, Stehplätzen und dem Rollstuhlplatz benötigen sowohl die Personenkapsel wie auch die Cargobox einen Grundrahmen mit Boden, Seitenwänden, Dach und einer Tür. Für die Hubbewegung zum Aufnehmen der Kapsel wurden verschiedene Varianten untersucht. Ausgewählt wurde eine fahrwerksintegrierte Version, so dass die Fahrwerke z.B. sowohl die Funktion Spurführung, Federung, Dämpfung erfüllen und den Hebemechanismus umfassen (Abbildung 11). Dies führt fahrzeugseitig beispielsweise so zu sehr großen Radhüllkurven, die von Radkästen abgedeckt werden. Der Antriebsstrang ist rein elektrisch, dieser kann beispielsweise über vier Radnabenmotoren realisiert werden. Ein weiteres Element für das Gesamtfahrzeug ist die Integration und die Anschlussstelle für die Sensorik für die automatisierten Fahrfunktionen.

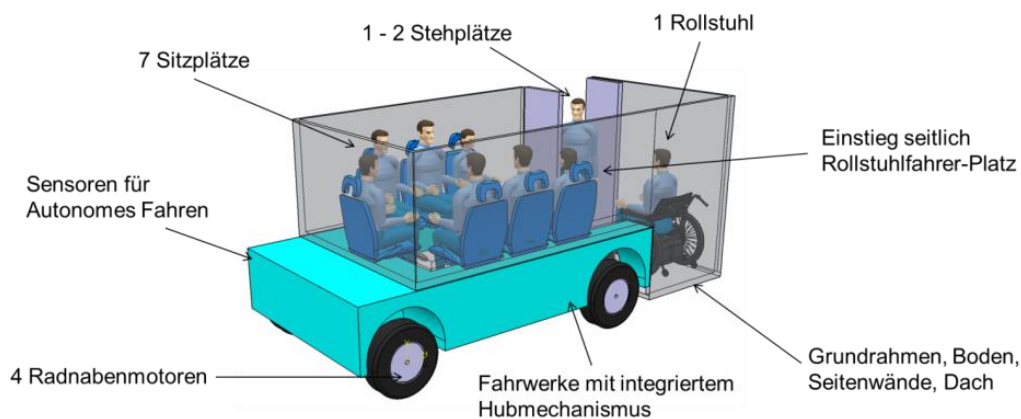


Abbildung 11: Fahrzeugkonzept U-Shift – Personenkapsel 7+1+1

Abbildung 12 zeigt das erste grobe Maßkonzept des Fahrzeuges. Das Fahrzeug ist in etwa 2110 mm breit, mit Überhang knapp 5000 mm lang und ohne Überhang circa 3700 mm lang. Die Fahrzeughöhe wird voraussichtlich 2,30 m bis 2,40 m betragen. Beim Maßkonzept der Cargokapsel ist hier eine Version gezeigt, die 3 Europaletten auf ca. 2500 mm unterbringt und dann keinen Überhang hat.

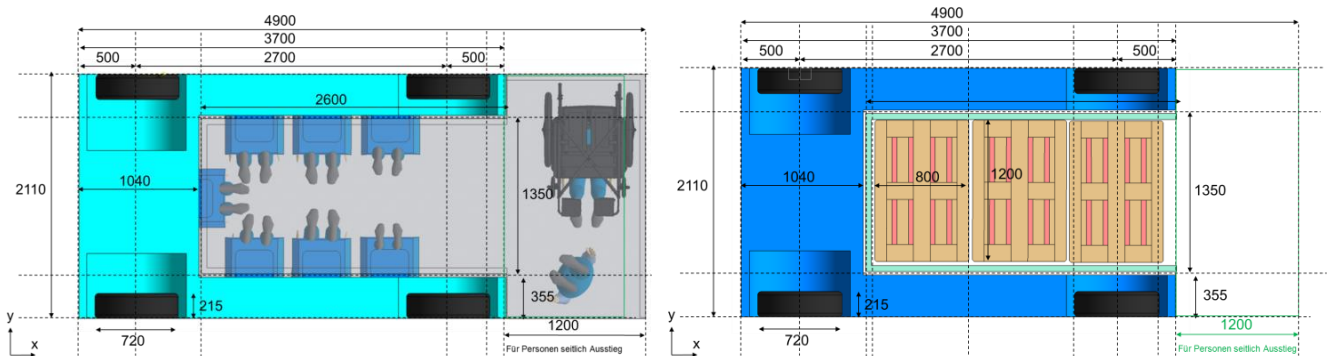


Abbildung 12: Fahrzeugkonzept U-Shift – Personenkapsel 7+1+1 und Cargokapsel – Maßkonzept

Auf Basis des oben beschriebenen Maßkonzeptes und weiterer Konzeptüberlegungen wurde eine modulare Sitzkiste entwickelt (Abbildung 13). Die Sitzkiste bietet einen ersten räumlichen Eindruck der Bau-räume und des Gesamtfahrzeugs. Es wurden zum einen technische Packageräume abgeschätzt, wie z.B. Reifen- und Fahrwerksbauraum. Zum anderen wurden für die Beurteilung des Interieurs der Platz und die Gestaltung der Sitzplatzanordnung und der Ergonomie getestet.

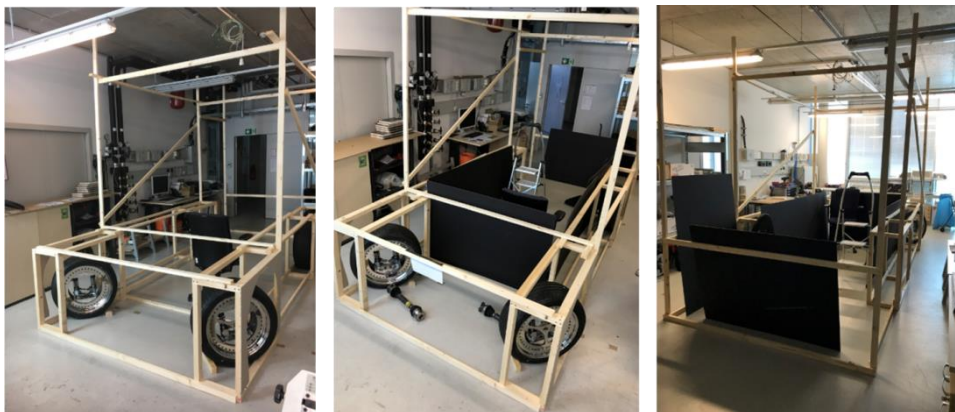


Abbildung 13: Modulare Sitzkiste der Version Medium mit Packagebau-räumen und einem ersten Erleben der Fahrzeugabmessungen und des Innenraums

Im Bereich Gesamtfahrzeug und Fahrzeugkonzept wurden unterschiedliche Untersuchungen und Ent-würfe zur Exterieur- und Interieurgestaltung entwickelt. Abbildung 14 zeigt hierbei wichtige Herausfor-derungen die sowohl in Exterieur, Interieur und in der Fahrzeugstruktur zu lösen sind. Einige Beispiele hierzu sind: der ausgestellte Radkasten aufgrund des Hubmechanismus im Fahrwerk, die Sicherheit, die optische Gestaltung der Fuge zwischen Kassel und Drive Bord, der Einfluss der Bauweise auf das die Kapseln, die modulare Sensorausführung für unterschiedliche Automationskonzepten, beispielsweise in der Fahrzeugfront, die Integration des Türeinstiegskonzept an der Fahrzeugseite usw.

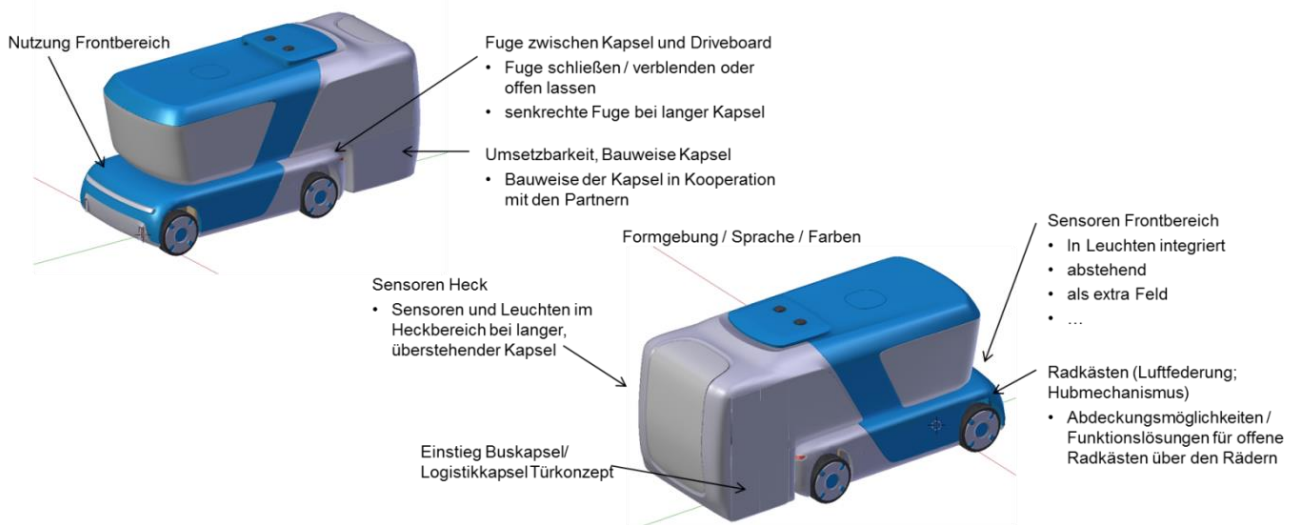


Abbildung 14: Gestaltungsfragen Problemfelder

In der Machbarkeitsstudie werden im Gesamtfahrzeugkonzept neben der Integration aller Hauptelemente des Fahrzeuges, Packaging also Volumen und Abmessungen, auch die Fahrzeugmassen zusammengeführt, um die Fahrzeug-Gesamtmasse und die maximale Zuladung abschätzen zu können. Die Zielmasse des Fahrzeugs beträgt 4,2 t (Abbildung 15), die auslegungsrelevant sowohl auf Kapsel und Driveboard, als auch in Bezug auf die einzelnen Radlasten zu verteilen ist. Erste Abschätzungen zur Zuladung ergeben in etwa einen Wert von circa 800-900 kg.

- Zielgewichte abgeleitet aus Anforderungsspezifikationen, wie z.B. Reichweite, Maximalgeschwindigkeit, Beschleunigung, Radsatzlasten, ....
- Angestrebt für ModECap: bis max. 4,2 t Gesamtgewicht

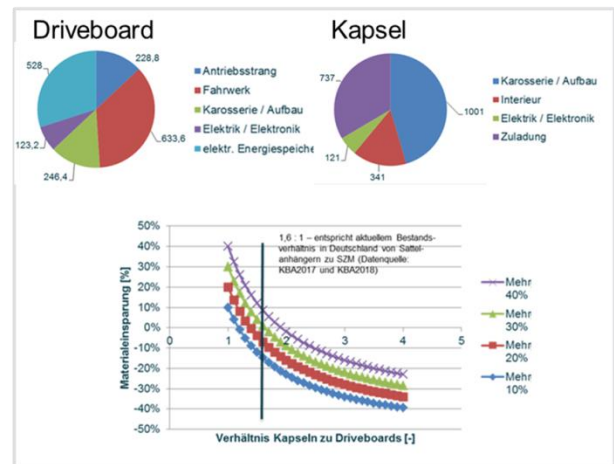
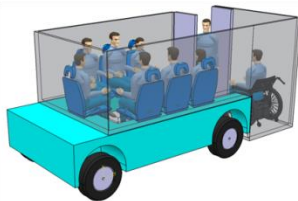


Abbildung 15: Auslegung von Zielmassen unterschiedlicher Hauptgruppen

4.2. Fahrzeugstruktur

Die Gestaltung der Fahrzeugstruktur ist immer stark mit dem Gesamtfahrzeug verbunden und den jeweiligen Packageelementen wie Fahrwerk, Antriebsstrang oder Sensoren. Die Hauptaufgabe der Karosserie bildet sowohl bei der Personenkapsel wie auch beim Driveboard vor allem die Aufgabe die unterschiedlichen Funktionsbereiche aufzunehmen sowie mechanische Lasten zu tragen. Bei der Gestaltung von Bauweisen gibt es unterschiedliche Ansätze die oftmals stark vom Produktionsvolumen abhängen. Abbildung 16 a) zeigt eine erste Eingliederung von unterschiedlichen Formen die Fahrzeug-Freiformflächen oder ebene Flächen zeigen. Die Ebenen Flächen können beispielsweise durch Sandwichelemente oder in einer Rahmenbauweise mit Schubflächen ausgeführt werden. Beispiele für technische Schnittstellen finden sich in Abbildung 16 b).

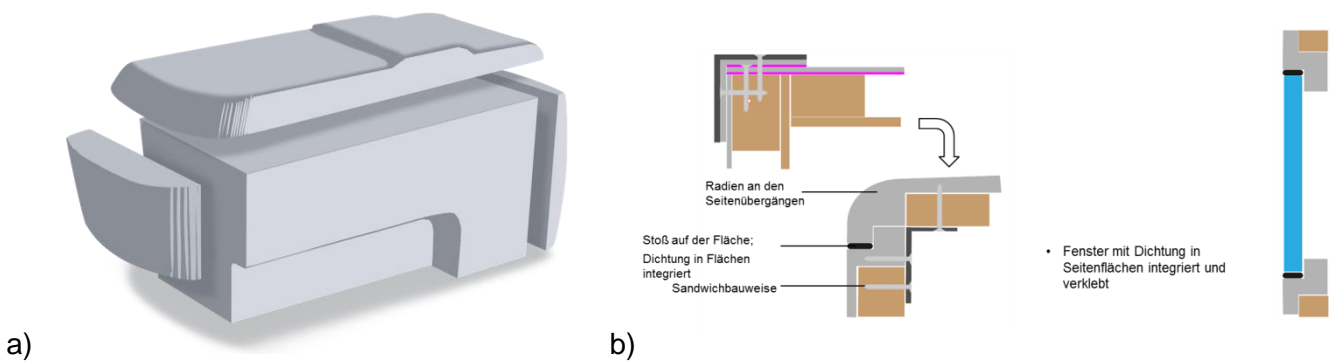


Abbildung 16: Bauweisen und Formen

Die große Herausforderung und Forschungsfrage bei der Fahrzeugstruktur stellt sich durch die konzeptbedingte U-Öffnung des Driveboards und der Frage der Kraftübertragung des U in die Kapseln. Für die Gestaltung der Fahrzeugkapseln wurden erste Lastpfaduntersuchungen für Torsion und Biegung für die Kapsel und das Driveboard durchgeführt (Abbildung 17 a)). Hierbei prägen sich erste grobe Lastfälle aus, die beispielsweise mit der Umsetzung einer Profilbauweise dargestellt werden können. Ein erster Konstruktionsentwurf ist in Abbildung 17 b) mit einer Torsion- und Biegetopologieberechnung übereinander gelegt.

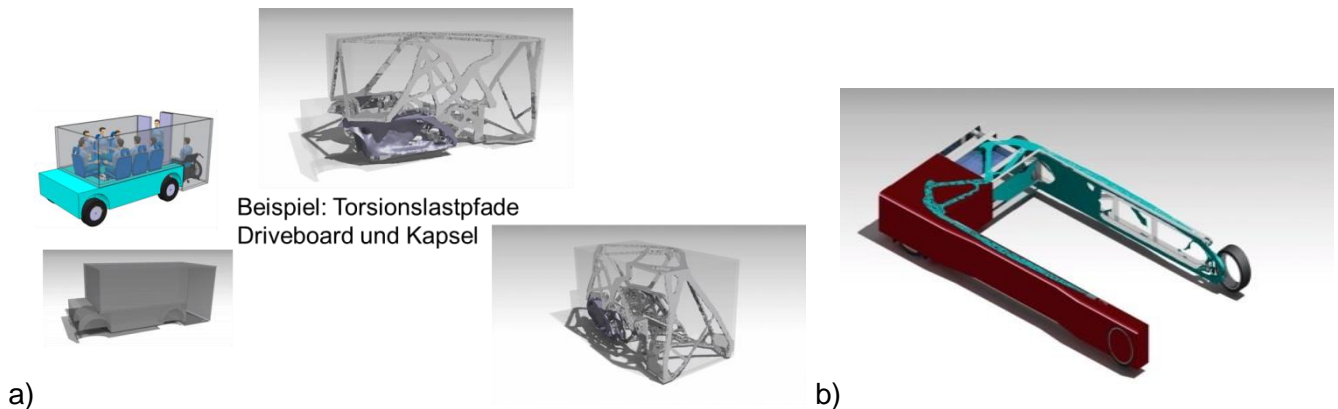


Abbildung 17: Fahrzeugstruktur – a) Erste Lastpfadanalyse für Driveboard und Personenkapsel mit Überhang; b) Entwurf Beispiel: Torsions- und Biegebelastpfade Driveboard

Für die Fahrzeugstruktur lässt sich das Fazit ziehen, dass es möglich ist eine Fahrzeugstruktur umzusetzen. Diese bietet aber viele Herausforderung durch das enge Package. Die offene Karosserie mit den beiden Schenkeln sowie der Kopplungsstelle für die Kapseln sind weitere herausfordernde Forschungsfragen.

#### 4.3. Antrieb

Für das Konzeptfahrzeug der Größe „Medium“ wurde im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie eine Antriebsstrangauslegung durchgeführt (vgl. Abbildung 19). Dabei mussten zunächst die Entwicklungsanforderungen und Spezifikationen für das Fahrzeugkonzept festgelegt werden. Auf Basis dieses Lastenhefts wurden dann die resultierenden Anforderungen und Randbedingungen für die Auslegung der einzelnen Antriebskomponenten bestimmt.

<u>Randbedingungen Komponentenauslegung</u>			
<u>Fahrzeug</u>		<u>Fahrleistungen</u>	
Gesamtmasse	4200 kg	Beschleunigung 0-60 km/h	<14 s
Stirnfläche	5 m <sup>2</sup>	Maximale Beschleunigung	1,4 m/s <sup>2</sup>
c <sub>w</sub> -Wert	0,55	Höchstgeschwindigkeit	80 km/h
<u>Reifen</u>		Geschw. Bei 8% Steigung	60 km/h
		Anfahrsteigfähigkeit	20 %
Dimension	215/75 R16	Reichweite	200 km
Radhalbmesser r <sub>dyn</sub>	36,5 cm	Betriebszeit	12 h
Rollwiderstandsbeiwert f <sub>0</sub>	0,008		

Abbildung 18: Randbedingungen für Komponentenauslegung

Auf Basis dieser Randbedingungen konnte im nächsten Schritt die Dimensionierung der Elektromotoren durchgeführt werden. Dabei ergab sich eine notwendige summarische Systemleistung aller Antriebsmaschinen von mindestens 92 kW. Aus der geforderten Anfahrsteigfähigkeit von 20% ergibt sich ein Antriebsdrehmoment von mindestens 2666 Nm in Summe. Aufgrund der Vorteile allradbetriebener Fahrzeuge hinsichtlich der Traktionsgrenzen, insbesondere auch bei unbelastetem Hinterwagen, wird im Konzeptfahrzeug jedes Rad mit einem Radnabenmotor ausgestattet. Für diese Radnabenmotoren wird folgend jeweils eine Maximalleistung von 25 kW bei einem maximalen Anfahrtdrehmoment von 700 Nm spezifiziert. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Leistungsanforderungen ist es möglich das elektrische Antriebssystem wahlweise mit einem Spannungslevel von 48V oder als Hochvoltsystem auszuführen.



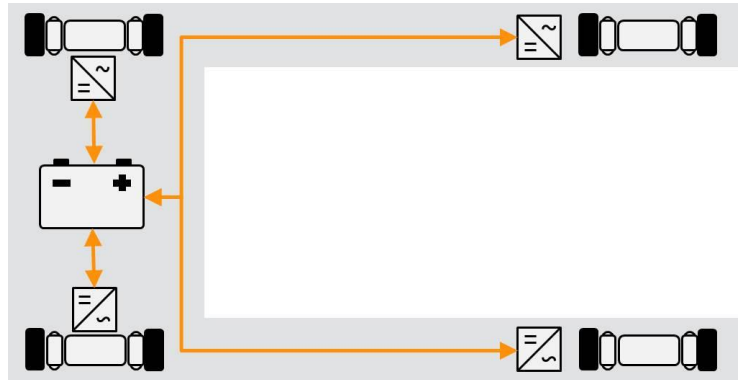


Abbildung 19: Antriebsstrang-Schema

Nach der Dimensionierung der Antriebsmaschinen konnte im nächsten Schritt die benötigte Batteriegröße für die geforderte Reichweite von 200 km bei einer Betriebszeit von 12 h ermittelt werden. Als Referenzzyklus wurde hierfür der Artemis Urban Driving Cycle herangezogen. Dieser Fahrzyklus basiert auf der statistischen Auswertung einer großen Datenbank realer europäischer Straßenmessungen im städtischen Umfeld. Mit einer mittleren Geschwindigkeit von 17,7 km/h bei einer Zyklus Höchstgeschwindigkeit von 57,3 km/h passt dieser sehr gut an das Anforderungsprofil des Projektfahrzeugs. Für die Dimensionierung der Batteriegröße wird zunächst der erwartete Stromverbrauch des Fahrzeugkonzepts simulativ untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in nachfolgender Abbildung dargestellt:

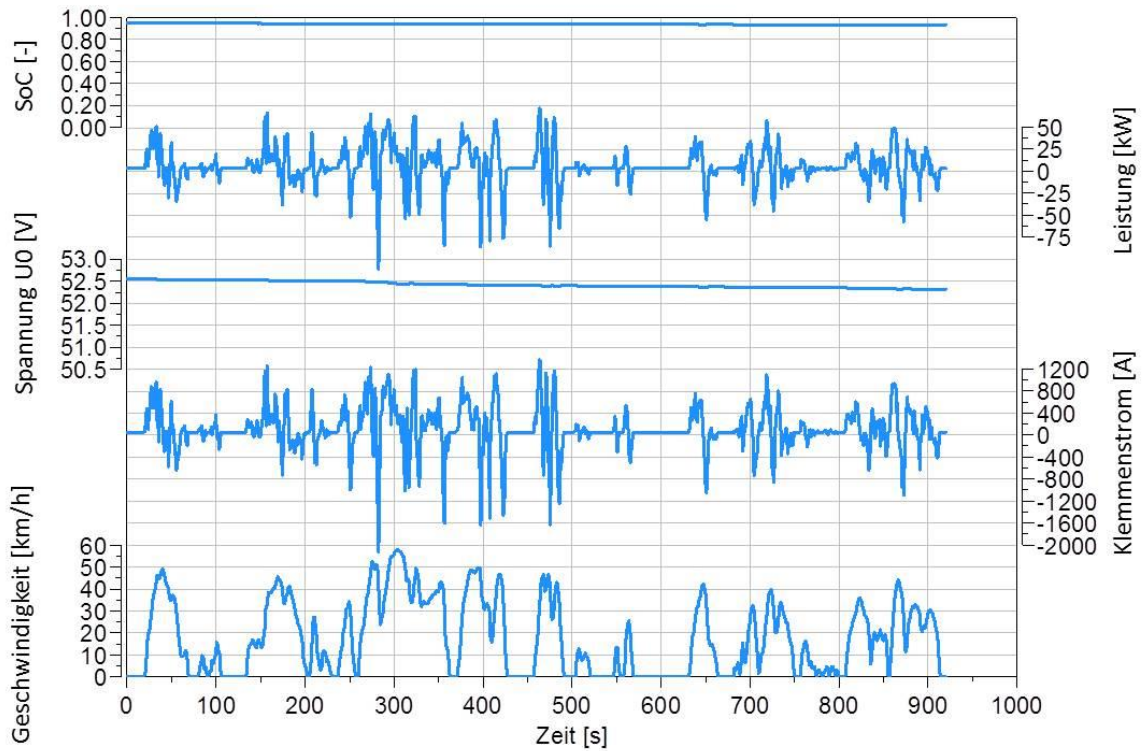


Abbildung 20: Simulationsergebnisse zur Strom-Verbrauchsprognose im Artemis Urban Test Cycle

Für den Artemis Urban Fahrzyklus hat sich in der Simulation ein Stromverbrauch für die Fahrtriebe von 15,4 kWh/100km ergeben. Für die geforderte Reichweite von 200 km wird also schon eine nutzbare Batteriekapazität von 30,8 kWh benötigt. Hinzu kommt noch der zusätzliche Stromverbrauch der Fahrzeugsteuergeräte in Höhe von 2,5 kW Dauerlast, wobei hier insbesondere der größte Teil für die autonomen Fahrfunktionen benötigt wird, sowie für die sonstigen elektrischen Verbraucher, welche nochmal mindestens 0,5 kW Bordnetzlast bedeuten. In Summe wächst damit die benötigte nutzbare Batteriekapazität nochmal um 3 kWh pro Stunde Betriebszeit. Für die gewünschte Betriebszeit von 12 Stunden wird als in Summe eine nutzbare Batteriekapazität von mindestens 67 kWh benötigt. Im resultierenden Batteriesystem lässt sich diese Batteriekapazität auf mehrere Batteriemodule aufteilen, was die Integration in das Fahrzeugkonzept deutlich erleichtert.

#### 4.4. Fahrwerk

Das Fahrwerk beeinflusst maßgeblich die Fahreigenschaften eines Fahrzeugs und hat daher neben der Aufgabe der präzisen Spurführung auch die Aufgabe, den Reifen-Fahrbahnkontakt sicherzustellen sowie durch eine Entkopplung von Fahrbahnebenheiten den Komfort zu gewährleisten. Für die Aufnahme bzw. das Absetzen der Kapseln ist zudem eine Niveauregulierung bzw. ein Hubmechanismus vorzusehen.

Der strukturelle Aufbau des Driveboards mit den beiden längs angeordneten Schenkeln stellt aufgrund des limitierten seitlichen Platzes eine Herausforderung für die Aufnahme des Fahrwerks an der Hinterachse dar, siehe Abbildung 21. Es kann daher an der Hinterachse nur eine Längslenkerachse eingesetzt werden. An der Vorderachse sind prinzipiell verschiedene Bauarten möglich. Hier ist ein Kompromiss zwischen einer erhöhten Manövrierfähigkeit durch sehr große Radeinschlagswinkel einerseits und dem dafür notwendigen Platzbedarf zu finden. Dieser Kompromiss ist auf den jeweiligen Use-Case bzw. den für das Rangieren des Fahrzeugs zur Verfügung stehenden Platz abzustimmen.

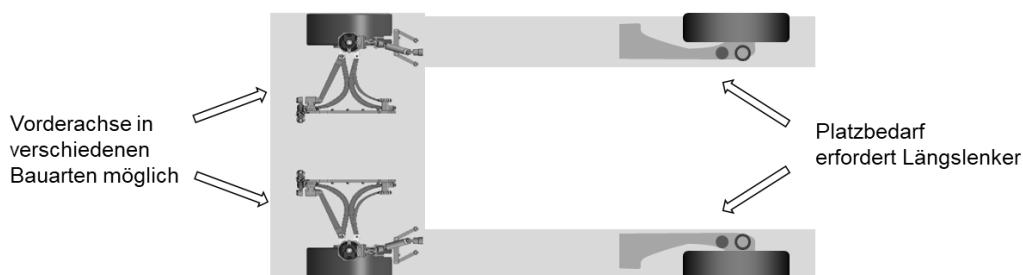


Abbildung 21: Fahrzeugstruktur – in Frage kommenden Fahrwerksbauarten

Die Integration der Antriebe (siehe auch Abschnitt 4.3) stellt eine weitere Herausforderung dar. Aufgrund des Platzbedarfs stellt bei den gegebenen Randbedingungen ein Radnabenantrieb die sinnvollste Lösung dar, entsprechende Realisierungen sind aus dem Stand der Technik bekannt, siehe Abbildung 22. Als alternative Ausführung, welche die Nutzung eines anderen Elektromotors und dessen Platzierung außerhalb des Rades erlaubt, wurde eine Längslenker-Schwinge mit integriertem Winkelgetriebe und

Antriebswelle betrachtet, siehe auch Abbildung 23. Somit kann je nach Anforderung an das Radantriebsmoment bzw. an die ungefederten Massen die jeweils passende Lösung umgesetzt werden.



Abbildung 22: Ausgeführte Bauarten von Radnabenmotoren und Fahrzeugintegration in einem Längslenker

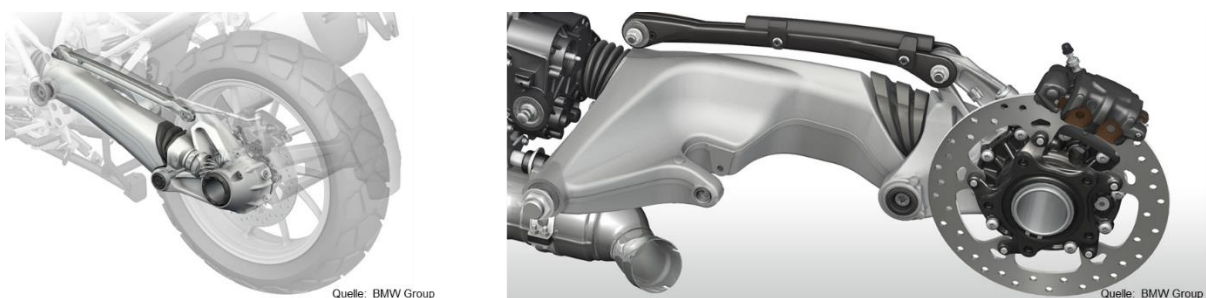


Abbildung 23: Ausführung einer angetriebenen Schwinge (BMW Paralever)

Zur Umsetzung der für das Absetzen und Aufnehmen der Kapseln notwendigen Hubeinrichtung sind prinzipiell zwei Lösungen denkbar:

- 1) Nutzung einer separaten Hubeinrichtung zur Höhenanpassung der Kapseln bei unverändertem Höhenniveau des Driveboards, siehe linke Seite von Abbildung 24. Vorteilhaft ist dabei, dass die Fahrwerkskonstruktion unbeeinflusst von der Hubfunktion durchgeführt werden kann. Nachteilig ist allerdings, dass durch die unveränderte Höhe der Oberkante des Driveboards beim Einfahren in die Kapsel entsprechender Freiraum zwischen Oberkante Driveboard und Unterkante der über das Driveboard ragenden Kapselgeometrie vorhanden sein muss, der nach dem Anheben der Kapsel weiter vergrößert wird. Hierdurch entsteht einerseits eine optische Lücke, andererseits kann der Raum nicht vollständig ausgenutzt werden.
- 2) Integration der Hubfunktion als Niveauregulierung in das Fahrwerk, siehe rechte Seite von Abbildung 24. Hierdurch kann erreicht werden, dass das komplette Driveboard in der Höhe einstellbar wird. Da-

mit kann die Oberkante des Driveboards in der Höhe so verändert werden, dass beim Einfahren zwischen der Unterkante der über das Driveboard ragenden Kapselgeometrie und dem Driveboard ein ausreichender Abstand eingestellt wird. Nach dem Anheben des Driveboards lässt sich dann die Kopplung im Bereich der Oberkante des Driveboards umsetzen, wodurch der Abstand zwischen Driveboard und Kapsel minimiert werden kann und eine optische Trennung vermieden wird. Nachteilig ist allerdings, dass zusätzlich Komponenten im engen Bauraum unterzubringen sind und bei den großen Hubbewegungen auch entsprechenden Radstandänderungen zu erwarten sind, allerdings nur während des Aufnehmens bzw. Absetzens der Kapsel, was wegen der geringen Geschwindigkeiten fahrdynamisch unbedenklich ist.

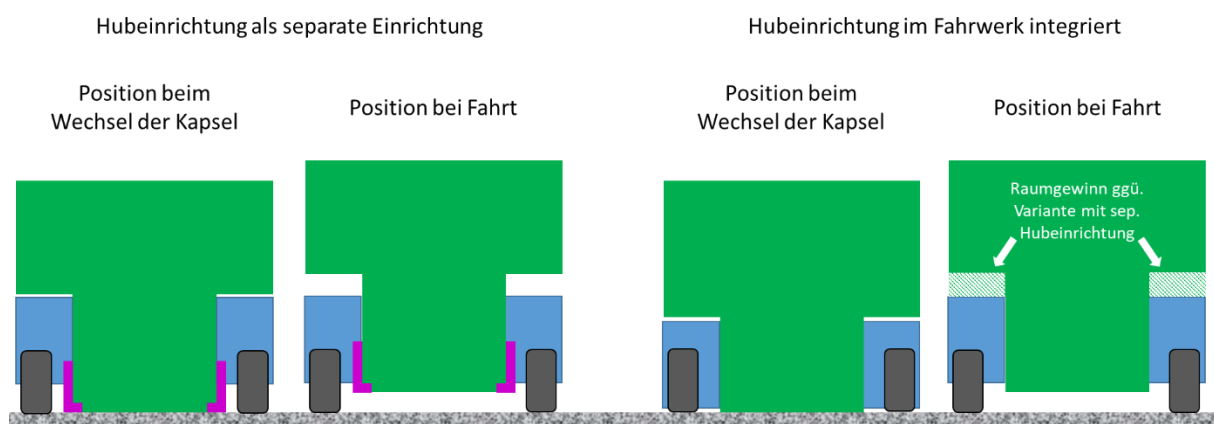


Abbildung 24: Unterschiedliche Möglichkeiten zur Umsetzung einer Hubbewegung für das Aufnehmen bzw. Absetzen einer Kapsel sowie deren Auswirkung auf die notwendigen Freiräume.

Aufgrund der zuvor beschriebenen Zusammenhänge ist die Integration einer Niveauregulierung in das Fahrwerk des Driveboards dem Aufbau einer zusätzlichen Hubeinrichtung vorzuziehen. Zur Umsetzung Niveauregulierung sind entsprechend zusätzliche Lenker zur Höhenanpassung der Gelenkpunkte der eigentlichen Längslenker sowie der Anbindungspunkte der Komponenten für Federung und Dämpfung vorzusehen. Hierzu sind aus dem Stand der Technik bereits Lösungen bekannt, die entsprechend adaptiert werden können.

#### 4.5. Elektrik/Elektronik Architektur und Methoden

Elektrik- und Elektronik-Umfänge, also auch Softwarebausteine, werden in allen Bereichen des Fahrzeugs eingesetzt, um damit die grundlegenden Antriebs-, Fahrwerks-, Karosserie- und Automatisierungsfunktionen zu realisieren. In dieser Machbarkeitsstudie wurden funktionale sowie technische Anforderungen und Randbedingungen an die E/E-Architektur des modularen Fahrzeugkonzeptes gestellt, und daraus ein abstraktes Modell für die notwendigen Hardware- und Software-Komponenten abgeleitet. Die Modellierung, die später für die konkrete Entwicklung des Fahrzeuges weiterverfolgt werden soll, basiert auf einem Schichtenmodell für E/E-Architekturen, wie es beispielsweise bei der Sprache EAST-ADL (Debruyne, Simonot-Lion, & Trinquet, 2004) oder dem Modellierungswerkzeug PREEvision (Vector Informatik GmbH, 2019) zu finden ist (siehe Abbildung 25). Dieses Modell fasst alle Entwicklungsartefak-

te einer E/E-Architektur von den ersten Systemanforderungen bis zum Kabelbaum und der geometrischen Topologie sowie ihre logischen und energetischen Beziehungen zusammen.

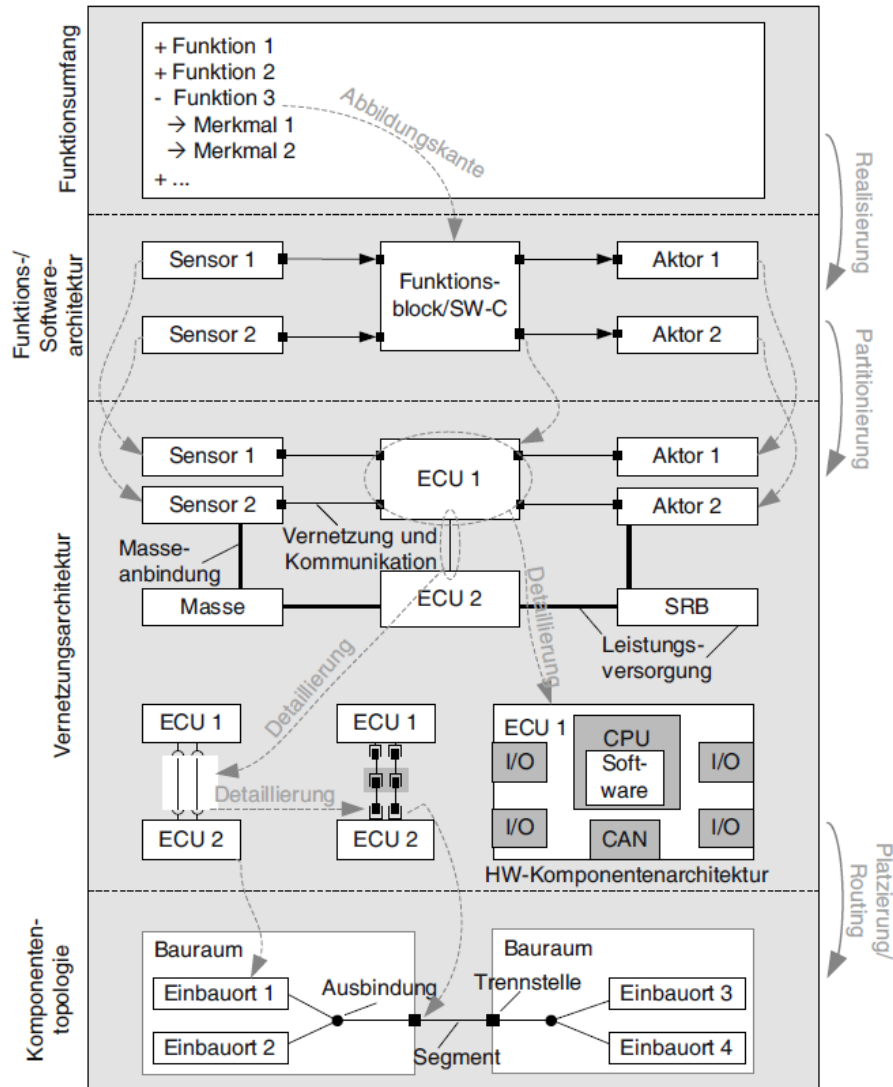


Abbildung 25: Durchgängiges Schichtenmodell einer Elektrik/Elektronik-Architektur

Um den begrenzt verfügbaren Bauraum für die Elektronikkomponenten im Driveboard optimal zu nutzen, eignet sich das Konzept der zentralisierten Architektur gegenüber der klassischen funktionsorientierten Variante. Dies kann realisiert werden, indem möglichst viel Funktionalität auf einem Zentralsteuergerät gebündelt wird.

Eine wichtige Anforderung für die Umsetzung des U-Shift-Geschäftsmodells ist, dass die Kapsel wenig bis keine Elektronik beinhalten sollte. Für die Personenkapsel müssen jedoch bestimmte Infotainment-, Komfort- und Body-Kontrolleinheiten vorhanden sein. Außerdem müssen aus Safety-Gründen und je nach Größe der Personenkapsel Sensoren in der Kapsel eingebaut werden, um sichere Rückwärtsfahrmanöver zu ermöglichen. Für die Verarbeitung und Weiterverwendung bestimmter Informationen aus

der Kapsel im Fahrmodul ist deshalb eine Datenkopplung erforderlich. Hierzu sollten sowohl das Fahrmodul als auch die Kapsel jeweils über ein zentrales Gateway verfügen. Diese Gateways sollten durch das Ethernet-Protokoll während der Kopplung verbunden werden können. Außerdem sollten sie über eine Telematik-Einheit mit der Cloud kommunizieren, um auf verschiedene Cloud-Dienste zuzugreifen und Updates Over The Air (OTA) empfangen zu können. Die resultierende Funktionsarchitektur für eine Kopplung mit einer Personenkapsel ist in Abbildung 26 dargestellt.

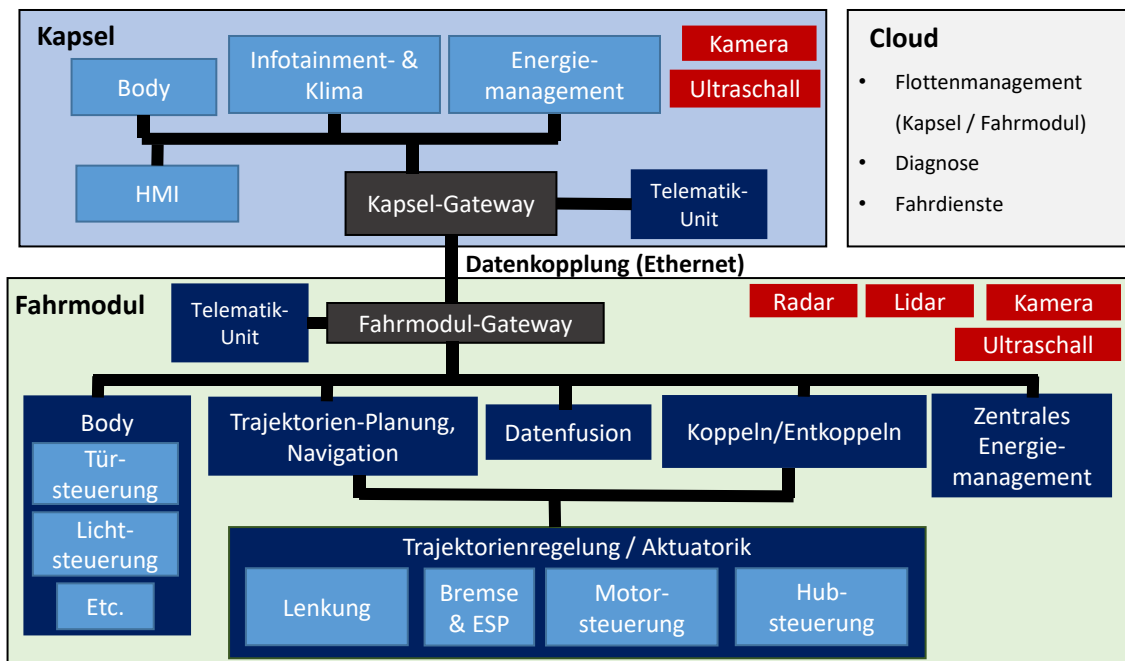


Abbildung 26: Funktionsarchitektur des Gesamtfahrzeugs (Fahrmoduls & Personenkapsel) (Vision); in Blau sind die Funktions- beziehungsweise die Funktionsgruppenblöcke, in Rot die Sensoren, und in Dunkelgrau die Kommunikationsgateways dargestellt.

Um die Softwarefunktionen möglichst flexibel und nach Bedarf („on demand“) verwenden zu können, wie beispielsweise das Anbieten von Sensor- und Diagnosedaten aus der Kapsel für die Funktionalität des Driveboards und die Integration neuer modularer Dienste während der Nutzungsphase zu ermöglichen, eignet sich das Konzept einer serviceorientierten Architektur (SOA). Diese kann zum Beispiel anhand der Kommunikationsmiddleware SOME/IP, die auf dem Kommunikationsprotokoll Ethernet basiert, realisiert werden. Das Fahrzeug kann jedoch auch mit einer klassischen signalorientierten E/E-Architektur aufgebaut werden, weist aber in diesem Fall gegenüber einer SOA gewisse Nachteile bezüglich der Erweiterbarkeit, der Modularität und der Infrastrukturanbindung auf.

Die Architektur in Abbildung 26 repräsentiert die notwendigen Funktionen zur vollständigen Realisierung der Vision des U-Shift-Konzeptes. Für die konkrete Umsetzung des U-Shift-Demonstrators wurden mehrere Vereinfachungen, wie beispielsweise der Verzicht auf eine dynamische Energiekopplung, getroffen. Daraus resultierte eine vereinfachte Vernetzungs-, Steuergeräte- und Kommunikationsstruktur aller Akteure, Sensoren und Steuergeräte. Das Ergebnis der Machbarkeitsstudie zeigt eine mögliche Vernetzungsarchitektur, die im Wesentlichen aus zwei direkt vernetzten Zentral-Rechnern besteht, die zum einen für die Umfelderkennung und Trajektorienplanung, zum anderen für die Ausführung der Software-

Komponenten der Grundfahrfunktionen ausgelegt sind. Weitere Bussysteme dienen der Informationsübertragung an die Stellglieder und Sensoren des Fahrzeugs (siehe Abbildung 27).

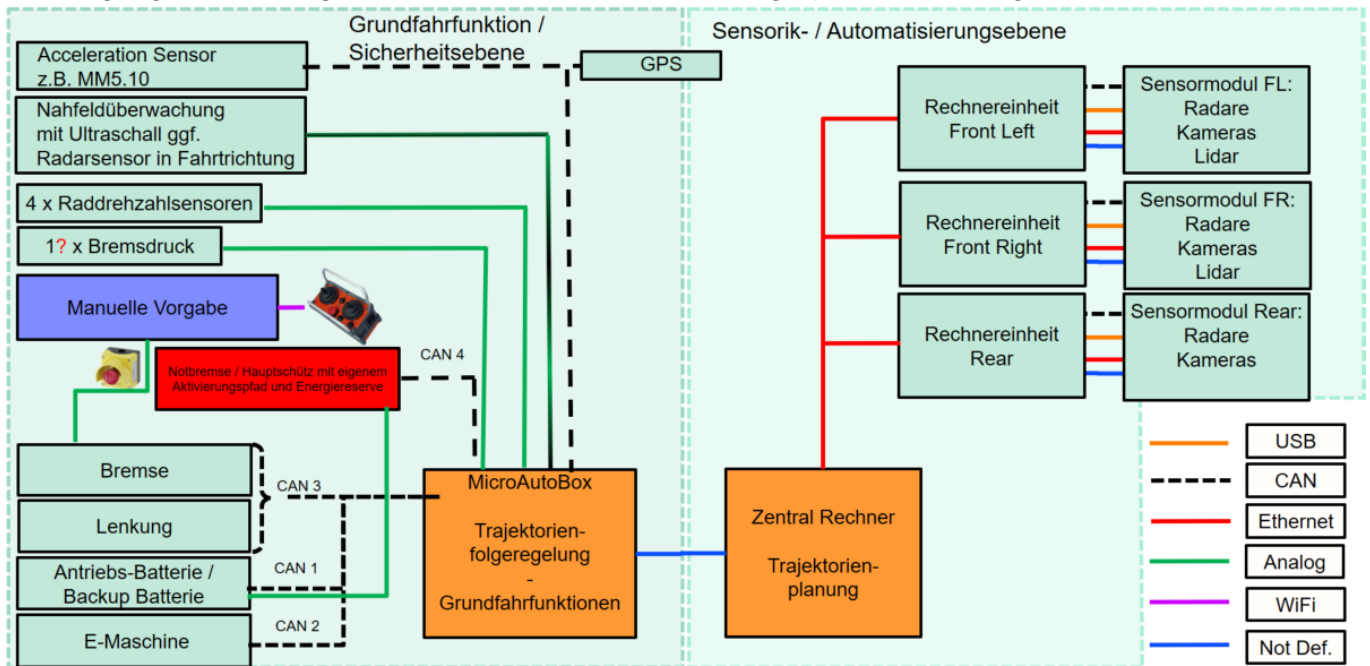


Abbildung 27: Hardware Vernetzungsarchitektur des U-Shift-Konzeptes

Ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der Auslegung des Fahrzeugs ist die Versorgung der E/E-Komponenten mit der für den Betrieb notwendigen elektrischen Energie. Die Machbarkeitsstudie zeigt, dass für das Gesamtfahrzeug ein Mehrkreis-Bordnetz mit unterschiedlichen Spannungsniveaus mit zwischengeschalteten Spannungswandlern und separaten Energiespeichern vorteilhaft ist, vgl. auch Abbildung 28.

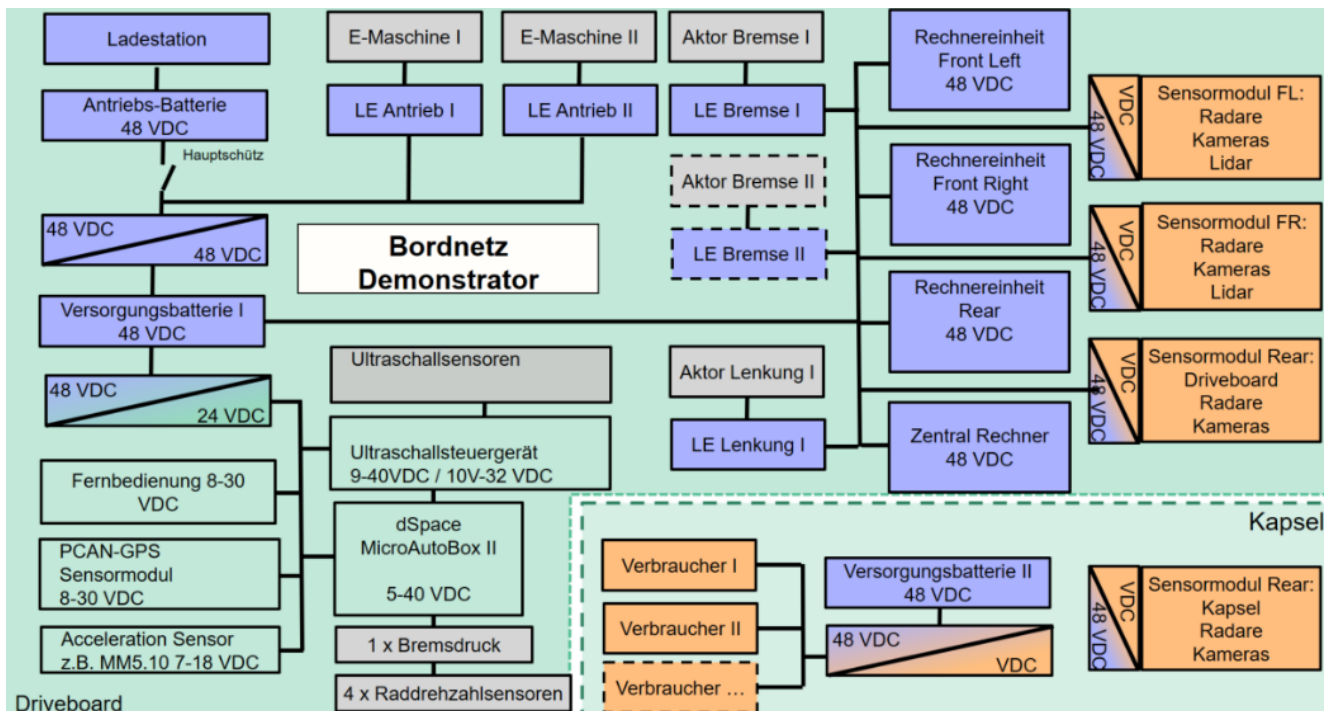


Abbildung 28 Bordnetz Gesamtfahrzeug

#### 4.6. Automatisierung

Eine Kernkomponente zur Realisierung des U-Shift-Konzepts ist die vollständige Automatisierung der Fahrzeuge für den fahrerlosen Betrieb. Die bereits beschriebenen Anwendungsszenarien gehen dabei von einem Flottenbetrieb der U-förmigen Driveboards aus. Diese Flotte wird von einer Leitzentrale überwacht und bekommt von dort auch die Fahraufgaben (Zielvorgabe mit/ohne Kapsel inkl. Routing) zugewiesen. Die Driveboards müssen daher in der Lage sein, diese vorgegebene Route vollständig automatisiert abzufahren. Zudem müssen die Aufnahme, das Abstellen oder der Wechsel der Kapseln an Start- und Zielort vollständig automatisiert ablaufen. Zielsetzung ist es, diese Funktionalitäten im normalen Mischverkehr darzustellen.

Da bereits heute herkömmliche Fahrzeuge - zumindest als Prototypen- und Versuchsfahrzeuge bzw. mit Sicherheitsfahrer zur Überwachung – vollautomatisiert im öffentlichen Verkehr zum Einsatz kommen, ist die prinzipielle Machbarkeit des automatisierten Fahrens zu bejahen. Eine Vielzahl an Forschungsprojekten und privatwirtschaftlichen Initiativen arbeiten derzeit an der Realisierung vollautomatisierter, fahrerloser Fahrzeuge. Da viele der Problemstellungen bei der Automatisierung unabhängig vom konkreten Fahrzeugkonzept sind, können die erarbeiteten Lösungen auch für das U-Shift-Konzept zum Einsatz kommen. Spezielle Herausforderungen des Fahrzeugkonzepts sind hingegen das Abstellen und insbesondere das Aufnehmen einer Kapsel, da hier sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit der kompletten informationsverarbeitenden Kette von der Umfeldwahrnehmung bis hin zur der Antriebsregelung gestellt werden.

In der Betrachtung des Konzepts aus Sicht der Geschäftsmodelle wird von einer deutlich höheren Anzahl an Kapseln verglichen mit der Anzahl der Driveboards im Flottenbetrieb ausgegangen. Zudem sollen die Driveboards auch ohne Kapseln automatisiert fahrfähig sein. Daher sind die fahrerseitigen



Komponenten der Automatisierung, also beispielsweise Umfeldsensorik und zugehörige Recheneinheiten, vornehmlich im Driveboard zu verbauen, um so auch die Kosten der Kapseln entsprechend niedrig zu halten. Eine Herausforderung ist dabei die Sicherstellung einer ausreichenden Sicht trotz niedriger Bauhöhe der Driveboards.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde für eine vollständig im Fahrzeug umgesetzte Automatisierung für den Fahrbetrieb das in Abbildung 29 dargestellte Sensorkonzept beispielhaft erarbeitet. Dabei wird das Driveboard vorne mit zwei leistungsfähigen Sensormodulen ausgestattet, die die derzeit bei automatisierten Fahrzeugen üblichen Sensorprinzipien für die Umfelderkennung, nämlich Laserscanner, Video-Kameras und Radarsensoren, sowie eine Recheneinheit zur Umfeldmodellierung umfassen. Der Erfassungsbereich eines Moduls beträgt dabei 270°. Durch Anbringung der Module jeweils an den vorderen Ecken des Fahrzeugs werden dadurch sowohl beide Seitenbereiche als auch, redundant durch beide Module, der Bereich vor dem Fahrzeug erfasst. Insbesondere für den Rangierbetrieb beim Kapselwechsel wird auch eine sensorische Abdeckung nach hinten benötigt. Hier sind in jedem Schenkel des U-förmigen Driveboards jeweils ein LiDAR-Sensor sowie zentral eine Kamera im Konzept vorgesehen.

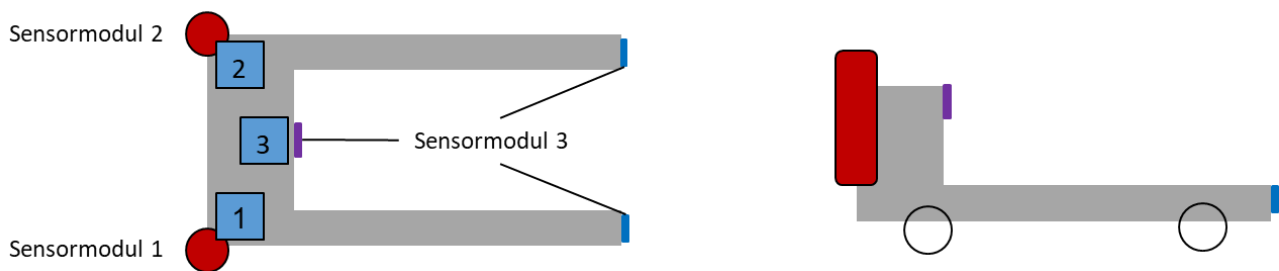
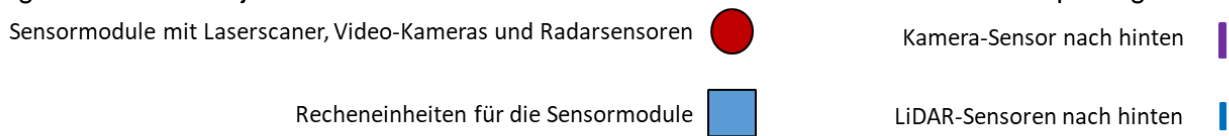


Abbildung 29: Sensorkonzept für das Driveboard

Für die rückwärtige Sicht mit aufgeladener Kapsel sind verschiedene Szenarien zu unterscheiden. Wird eine kurze Kapsel aufgeladen, so sind zumindest die rückwärtigen LiDAR-Sensoren weiterhin einsetzbar (vgl. Abbildung 30 links). Bei den längeren Versionen der Kapsel sind hingegen alle Sensoren überdeckt und das Sensormodul 3 damit nicht mehr einsatzfähig (vgl. Abbildung 30 rechts). Rückwärtsfahrten wären so zunächst nicht mehr möglich. Abhilfe kann hierbei die Anbringung von LiDAR- und/oder Kamera-sensoren an den Kapseln schaffen, die dann mit der Recheneinheit des Sensormoduls 3 zur Auswertung verbunden werden (siehe Abbildung 31). Damit muss beim Aufnehmen oder Abstellen einer solchen sensorisch ausgestatteten Kapsel das Sensormodul 3 im Betrieb umkonfiguriert werden.

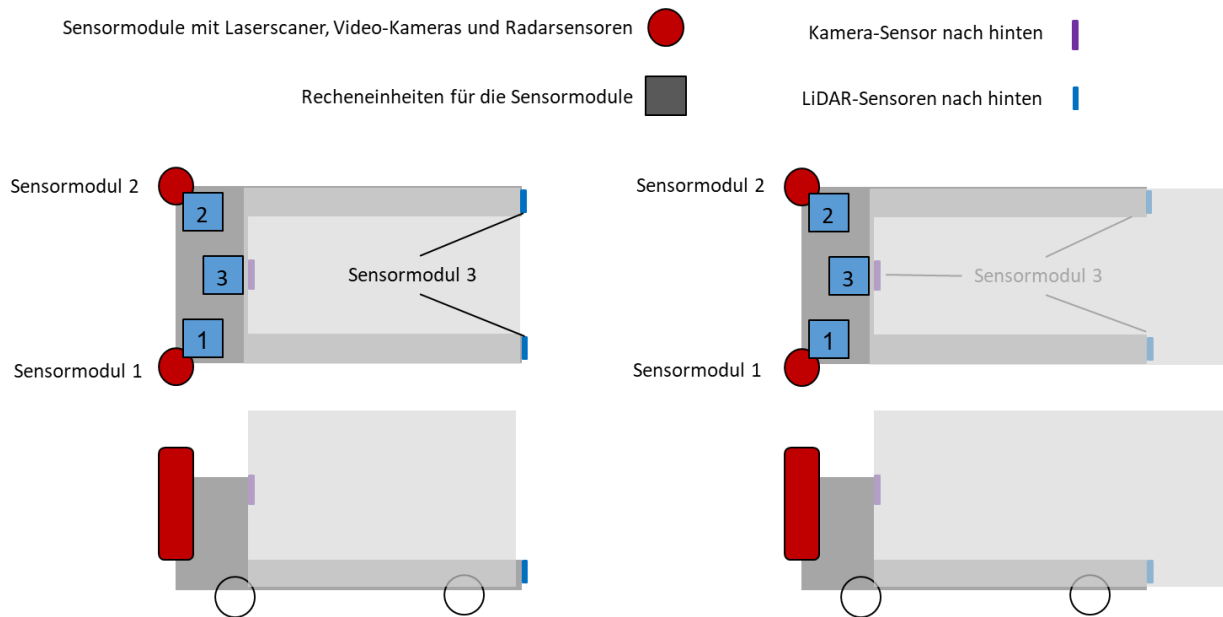


Abbildung 30 Nutzbare Sensormodule bei Kapseln ohne Sensorik

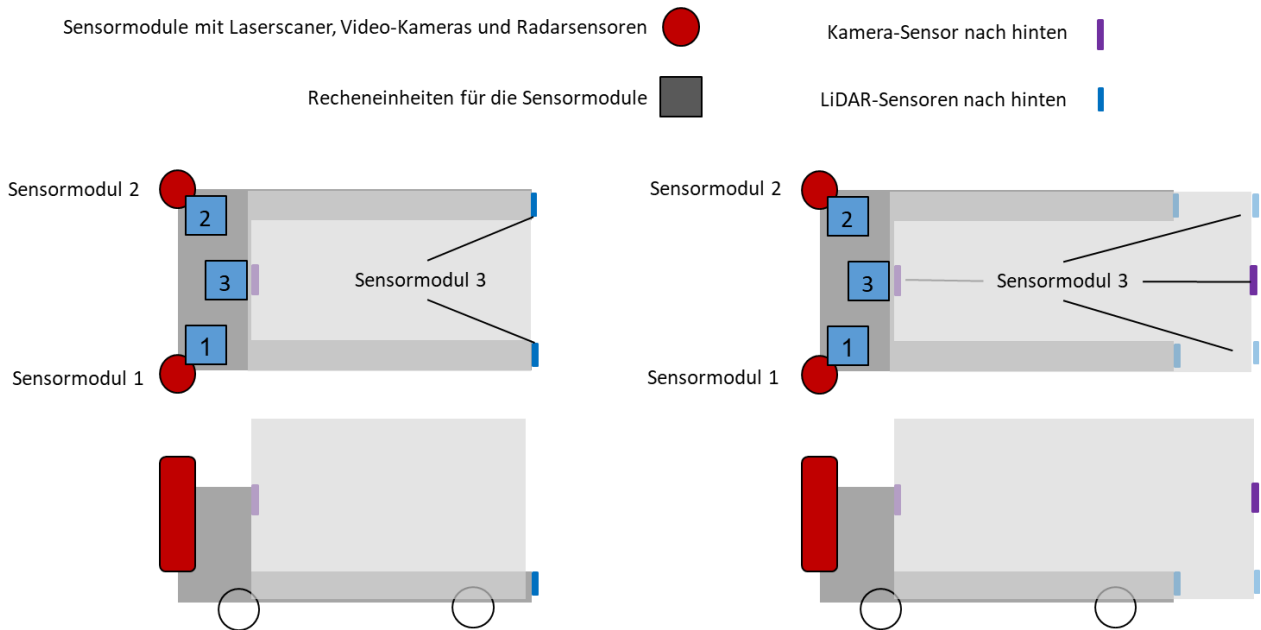


Abbildung 31: Nutzbare Sensormodule bei Kapseln mit zusätzlicher Sensorik

Alternativ oder zusätzlich können Sensoren in der Infrastruktur zum Einsatz kommen, welche die Sensormodule im Fahrzeug unterstützen. Dies erscheint insbesondere für Kapsel-Hubs (Betriebshöfe) sinnvoll, in denen viele Rangierfahrten notwendig sind und zudem aus Gründen der Platzersparnis die Kapseln sehr dicht nebeneinander abgestellt werden sollen. Hier können die externen Sensoren, insbesondere auch im Hinblick auf die bereits beschriebene erforderliche Genauigkeit der Datenverarbeitung bei der Kapselaufnahme, wertvolle zusätzliche Informationen liefern und ansonsten eventuell notwendige teure Sensorik mit hoher Auflösung in allen Fahrzeugen vermeiden.

Die von den Sensormodulen und ggf. externen Sensoren bereitgestellten Informationen werden auf den jeweiligen zugehörigen Recheneinheiten zunächst lokal verarbeitet. Aus den daraus entstehenden lokalen Umfeldmodellen wird dann auf einem Zentralrechner (vgl. auch Abschnitt 4.5) ein fusioniertes Gesamtumfeldmodell erstellt und darauf basierend die Trajektorienplanung durchgeführt. Die berechneten Trajektorien werden dann zur Umsetzung im Antriebsstrang an die Trajektorienfolgeregulierung übergeben, die die Aufteilung der notwendigen Antriebs-, Brems- und/oder Lenkmomente an die einzelnen Aktoren übernimmt.

## 5. Verwertungspotential

### 5.1. Markt

In einer vorangegangenen Marktuntersuchung ergaben sich verschiedene Schlüsselbranchen, die in Zukunft besonders betroffen von den Veränderungen in der Automobilbranche sind und für die daher neuen Lösungen benötigt werden. Betrachtet wurden dabei v.a. die Märkte in Deutschland (mit einzelnen Ausblicken auf den globalen Markt) und dabei lag der Fokus auch auf den urbanen Räumen. Der Fokus wurde auf Städte gelegt, da diese zum einen in Zukunft vor enormen Herausforderungen stehen: Megatrends wie Urbanisierung (Prognose der UN: 2/3 der Bevölkerung lebt 2050 in Städten), der Fakt, dass in nahezu allen städtischen Räumen immer noch der motorisierte Individual Verkehr (MIV) über 50% des Modal Splits ausmacht und diese MIV-Fahrzeuge ca. 95% der Zeit nicht im Betrieb sind. Zum anderen ist der Wirtschaftsverkehr in Städten sehr stark konzentriert und Phänomene wie Parken in zweiter Reihe, Verkehrskollaps und Umweltbelastung der Stadtzentren durch den Wirtschaftsverkehr sind bekannte Herausforderungen. Für die Schlüsselbranche e-Commerce sowie den damit eng verzahnten Kurier-, Express- und Paketdiensten (KEP) wird in Abbildung 32 sehr deutlich deren enormes Wachstum dargestellt. Demnach wird die Belastung in den Städten deutlich zunehmen, anstelle reduziert zu werden. Im Öffentlichen Personen Nahverkehr (ÖPNV) ist dagegen ein Wachstum der Fahrgastanzahl von 9% in 10 Jahren eine deutlich zu geringe Zahl. Neue Fahrzeugkonzepte sollten daher Lösungen zum einen für eine Entzerrung des Wirtschaftsverkehrs als auch für die Attraktivitätssteigerung des ÖPNV bieten.

+248% Onlineanteil am Einzelhandel (2008-2018)	+320% Umsatz im Online-Handel (2008-2018)	<b>e-Commerce</b>	87 Mrd. Paketzustellungen weltweit in 2018
<b>ÖPNV</b>	Ca. 9% mehr Fahrgäste von 2008 bis 2018	FMCG <sup>3)</sup> sind derzeit größter Wachstumstreiber	200 Mrd. Paketzustellungen weltweit bis 2025
10,4 Mrd. Fahrgäste im ÖPNV in 2018	12 Mio. Sendungen pro Zustelltag in 2018	7% Wachstum, im B2C <sup>1,2)</sup> Bereich	<b>KEP</b>

Abbildung 32: Kennzahlen ausgewählter Branchen

Aus der Literatur, aus der Presse und aus persönlichen Erfahrungen sind die Herausforderungen vor denen der Güter- und Personentransport in Städten steht, den meisten bekannt. Zusammen mit Experten aus Verbänden wurde in einem Stakeholder-Workshop (Kapitel 5.2) untersucht, ob diese „gefühlten“ Herausforderungen auch den tatsächlichen entsprechen. Abbildung 33 zeigt eine Auswahl der größten Herausforderungen vor denen KEP-Dienstleister, Spediteure und ÖPNV-Anbieter stehen.



Abbildung 33: Randbedingungen und Herausforderungen in den Märkten<sup>5</sup>

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden verschiedene Anwendungsfälle identifiziert, beschrieben und untersucht. Ein Geschäftsmodell wird in Kapitel 5.5 im Detail analysiert.

## 5.2. Stakeholder Workshop Anwender

Um die Bedürfnisse und Sichtweisen potentieller U-Shift Anwender abzuholen, wurde analog zu einem „Hersteller“-Workshop ein Stakeholder-Workshop speziell für Anwender konzipiert. Da die Anwendungen von U-Shift vielfältig sind und sich über viele Branchen erstrecken, wurden im ersten Schritt nicht spezifische Unternehmen eingeladen, sondern Branchenverbände. Dies hat den Vorteil, dass die Verbandsvertreter zum einen einen guten Überblick über die Probleme und Herausforderungen aller ihrer Mitglieder haben, und zum anderen dienen die Verbände als Multiplikatoren, um das Fahrzeugkonzept vielen einzelnen potentiellen Anwendern und Interessenten zugänglich zu machen. Für den Workshop wurden Vertreter folgender Verbände eingeladen:

- BIEK – Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V.
- HBW – Handelsverband Baden-Württemberg
- VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen – Landesgruppe Baden-Württemberg
- VSL – Verband Spedition und Logistik Baden-Württemberg e. V.

Neben den Herausforderungen, die die einzelnen Verbände erleben (Abbildung 33 in Kapitel 5.1), wurden außerdem verschiedene Baugrößen der U-Shift-Kapseln (schmal vs. breit, live erlebbar in einer Sitzkiste, Abbildung 34, links), verschiedene Ansätze der Automatisierung und gemeinsame, branchenübergreifende Geschäftsmodelle diskutiert. Aus der Diskussion ergab sich ein deutlicher Zuspruch zur

<sup>5</sup> Erkenntnisse aus dem Stakeholder-Workshop „Anwender“ (Kapitel 5.2), Icons: Pixabay.com (CC0-Lizenz).

breiten Fahrzeugvariante. Hinsichtlich der Automatisierung wurde ein zentral gesteuertes Automatisierungskonzept (MAD, Kapitel 3) begrüßt, allerdings auch Erfahrungen aus dem Schienenverkehr angemerkt: So setzen viele Spediteure auch deswegen stark auf den straßengebundenen Transport mit LKWs, weil im Schienenverkehr die Personenzüge stets Vorrang haben und somit Liefertermine mit LKWs zuverlässiger eingehalten werden könnten. Auch zu einem branchenübergreifenden Einsatz von U-Shift mit gemeinsamen Geschäftsmodellen kam vorwiegende positive Resonanz (v.a. hinsichtlich einem Einsatz als „mobilem Microhub“), mit der Einschränkung, dass in jedem Fall der Flächenbedarf gegenüber dem Status Quo geprüft werden muss.



Abbildung 34: Sitzkiste des U-Shifts (links) und Foto des Anwender-Workshops am DLR (rechts).

### 5.3. Stakeholder Workshop Hersteller

Analog zum Stakeholder Workshop Anwender wurde ein Stakeholder Workshop „Hersteller“ mit potentiellen Partnern für eine Industrialisierung der U-Shift Technologie durchgeführt. Im Rahmen von Veranstaltungen der e-mobil BW und des Landes Baden-Württemberg (z.B. Clustertreffen, Zuliefertag etc.) wurden erste Industrieunternehmen und KMU mit für U-Shift benötigten Kompetenzen, Produkten oder Technologien identifiziert und zum Stakeholdertreffen Hersteller eingeladen. Fokus war eine erste inhaltliche Abdeckung für ein potentielles Demonstrationsprojekt. Anwesend waren ca. 30 Teilnehmer aus Forschung und Industrie. Im Rahmen des Workshops wurden die ökologischen und ökonomischen Potentiale des Konzeptes und die potentielle Bedeutung für den Standort Baden-Württemberg dargestellt und dann zusammen mit den Forschungspartnern vorab technische Ergebnisse aus der Machbarkeitsstudie präsentiert und gemeinsam diskutiert. Final wurde das Beteiligungsinteresse der Industrie an den in Planung befindlichen Projekten U-Shift I (Mock-Up) und U-Shift II (Demonstrator) anhand erster Entwürfe einer Projektstrukturplanung abgefragt (Abbildung 35). Es hat sich gezeigt, dass alle notwendigen U-Shift Entwicklungsfelder mit kompetenten Industriepartnern/KMU abgedeckt werden können und damit auch die in ModECaP geplante Machbarkeit einer Demonstration nachgewiesen ist.



Abbildung 35 U-Shift Projektplan-Entwurf (links) und Foto des Workshops am DLR (rechts)

#### 5.4. U-Shift-Modell und weitere Kommunikation

Im Rahmen von ModECaP wurde ein erstes 1:10 Modell aufgebaut um die Handhabung und Konzeption in Workshops und weiteren Treffen mit Industrie und KMU darzustellen. Das Modell hat einen einfachen Federmechanismus im Fahrwerk um das Absenken des Driveboards und das Aufnehmen einer Güterkapsel zu demonstrieren. Das Modell wurde 2019 z.B. auf dem Stuttgarter Symposium, dem Electric Vehicle Symposium in Lyon und auch auf der Hannover Messe zu Kommunikation von U-Shift genutzt. Darüber hinaus wurde das U-Shift-Konzept auch auf der Website ModECaP-BW.de veröffentlicht, siehe Abbildung 36.

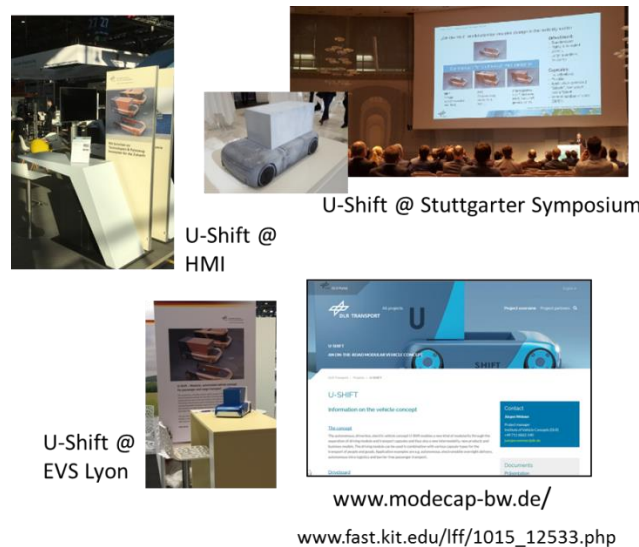


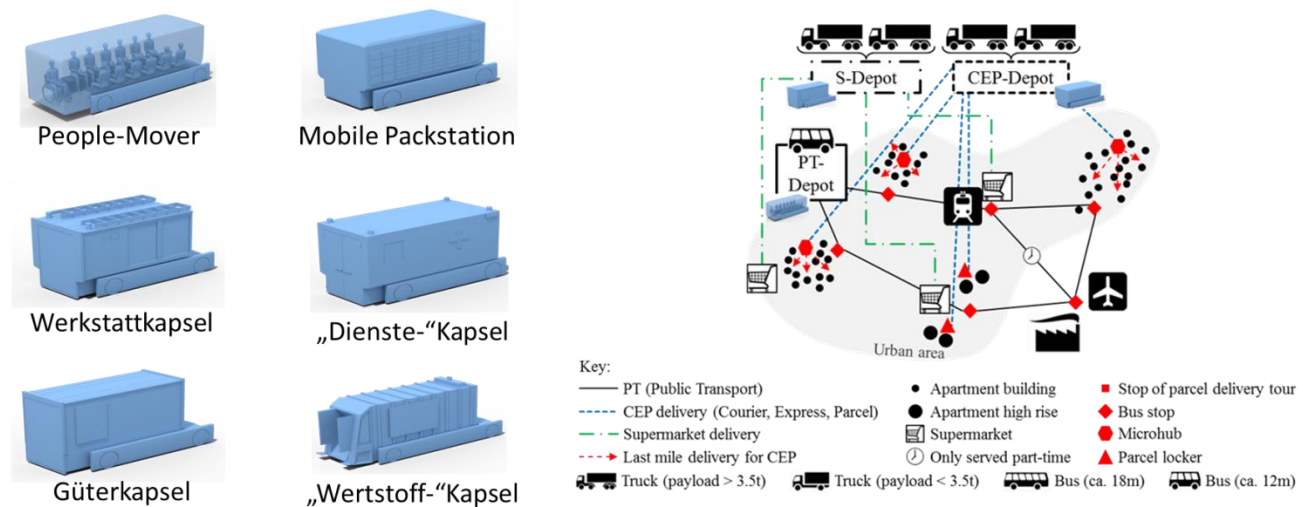
Abbildung 36 U-Shift Modell und Beispiele der Projektkommunikation

#### 5.5. Geschäftsmodelle

Ein genereller Trend ist die Abkehr vom Besitz von Fahrzeugen hin zu gemeinsame Fahrten oder gemeinsam genutzten Autos und so die Effizienz zu steigern. Mobility-as-a-Service (MaaS), bzw. Logistic-as-a-Service (Laas) sind grundlegende Elemente der im Folgenden diskutierten Geschäftsmodelle. Die Otr-Modularisierung eignet sich hervorragend für die gemeinsame Nutzung von Driveboards

(MaaS/LaaS), während die Kapseln je nach Geschäftsstrategie über einen Betreiber gemeinsam genutzt oder in Privatbesitz sein können. Für das U-Shift Konzept drängen sich viele verschiedene Einsatzmöglichkeiten auf (vgl. Abbildung 37 A und B)

- Personenbeförderung im öffentlichen Verkehr als Peoplemover / Shuttle. In diesem Fall benötigt die Kapsel einen Überhang für einen barrierefreien Seiteneinstieg und eine Klimaanlage sowie ein Fahrgastinformationssystem.
- Transport von Einzelpersonen (Ersatz für das Auto) in einer privaten oder gemeinsam-genutzten Kapsel (z.B. Büro kapsel).
- Zustellung von Paketen: Der Einsatz als Paketstation ist ebenso denkbar wie die Nutzung der Kapsel als Microhub, von dem aus die Pakete mit Lastenrädern über die Very Last Mile bis zum Endkunden ausgeliefert werden.
- Lieferung von Waren für den Einzelhandel: Einzelhändler in Stadtzentren teilen sich eine Kapsel als Microhub oder werden direkt mit einer eigenen Kapsel versorgt. Diese kann ebenerdig (ideal für bspw. Gitterrollwägen) be- und entladen werden.
- Lieferung an Supermärkte. Diese Kapseln benötigen Kühlaggregate. Durch den elektrischen Antrieb wird die Nachtlieferung zu einer wichtigen Option.
- Und vieles mehr, wie z.B. Kapseln für Handwerker, Entsorgungskapseln, Event-Kapseln oder Kapseln für den Rettungsdienst.



a) b)  
Abbildung 37: Erste Kapseldesigns für verschiedene Anwendungen (a); Visualisierung eines beispielhaft analysierten Anwendungsfall, bestehend aus verschiedenen Stakeholdern (KEP, ÖPNV, Spedition) in einer fiktiven Stadtumgebung (b)

Mit U-Shift haben die Akteure im Bereich der urbanen Mobilität unterschiedliche Geschäftsmodell-Möglichkeiten: 1) Herstellung von Driveboards und / oder Kapseln, 2) Angebot einer Flotte von Driveboards für Geschäftskunden (und Privatkunden) mit oder ohne Kapseln, 3) Ausführung von Dienstleistungen (Personen-/Güterverkehr) mit privaten oder gemeinsamen Driveboards und Kapseln, 4) Wartung der Ausrüstung oder 5) Betrieb einer zentralen Leitstelle zur Überwachung von Flotten in der Stadt. Ei-

ner der Hauptvorteile ist das autonome Fahren, das die Notwendigkeit teurer Fahrer überflüssig macht. Dies ist nicht nur finanziell von entscheidender Bedeutung, sondern auch, weil es in letzter Zeit einen anhaltenden Trend zu Fahrerengpässen gibt.

Ein möglicher Business Case wird im Folgenden ausführlich beschrieben. Das „neue Unternehmen“ vereint die Aktivitäten eines Spediteurs und eines öffentlichen Verkehrsbetreibers: Ein Unternehmen, das Transportdienstleistungen für Unternehmen des öffentlichen Verkehrs, der Paketzustellung und der Supermarktzustellung anbietet, verfügt über eine Flotte von Driveboards und einige Kapseln für den Personentransport (einschließlich 10% Ausrüstung in Reserve). Kapseln für Pakete und Warenlieferungen werden von den Geschäftskunden zur Verfügung gestellt, da diese Kapseln entweder in ihrem Zentrum oder in den Geschäften bzw. den Wohnhäusern verbleiben. a) b)

Abbildung 37 (b) visualisiert im Überblick die Einsatzzwecke dieses Geschäftsmodells.

Das öffentliche Verkehrssystem weist einige Schwächen auf. In erster Linie gibt es Spitzenphasen, in denen die Busse überlastet sind (meist während des Pendlerverkehrs) und zum anderen Zeiten, in denen die Busse fast leer fahren. In diesem Geschäftsmodell würde der Spediteur die Betreiber des ÖPNV in Spitzenzeiten mit einer People-Mover-Kapsel unterstützen und den ÖV ggf. auch ausbauen können. Diese Spitzenzeiten sind ein herausfordernder Faktor bei der Disposition der Driveboards-. Wann immer es Schwachlastphasen gibt, führen die Driveboards andere Aufgaben aus, aber in Spitzenphasen hat der öffentliche Verkehr Vorrang. Für den Einsatz im KEP-Bereich muss bei der Planung beachtet werden, dass morgens immer eine gefüllte Paketstation vorhanden sein muss. Die Bewohner müssen die Möglichkeit haben, den ganzen Tag auf die Kapsel zuzugreifen, um ihre Post zu erhalten oder Rückgaben abzuliefern. Expresslieferungen durch andere Postgesellschaften könnten in die Kapsel gelegt werden, wenn die Bewohner nicht zu Hause sind. Ein Problem ist, dass die Post zurück zum Hub transportiert wird, wenn die Bewohner sie nicht geleert haben. In dem Logistikzentrum wird es aufgefüllt und am anderen Tag wieder in die Wohnung gebracht.

Erste Schätzungen deuten darauf hin, dass eine Kapsel mit einer angenommenen Größe von 2750x1350x1250mm<sup>3</sup> 100 kleine, 22 mittlere und ein sehr großes Paketfach sowie ein Serviceterminal enthalten kann. Für die Belieferung des Supermarkts können Paletten oder Gitterboxen ebenerdig aus der Kapsel be- und entladen werden - aus logistischer Sicht die bessere städtische Lieferform. So können zukünftige Supermärkte auf Laderampen verzichten - in den Stadtgeschäften fehlt ohnehin oft ein Ladekonzept. Im Geschäftsmodell werden Supermärkte zweimal täglich bedient: einmal nachts und einmal am Tag. Nachts wird die Kapsel nur angeliefert, während das Driveboard direkt weiterfährt - die Entladung erfolgt am Morgen. Während der Tageslieferung (z.B. für eine Nachlieferung von verderblichen Gütern) verbleibt die Kapsel auf dem Driveboard. Erste Ergebnisse zeigten einen bemerkenswert hohen Bedarf an Kapseln. Im Durchschnitt kommen auf ein Driveboard in diesem Geschäftsmodell etwa acht Kapseln. Zum Vergleich: In Deutschland wurden 2018 durchschnittlich 1,6 Sattelaufleger zusammen mit einem LKW genutzt. Dies bestätigt den modularen Ansatz, Antrieb und Kapsel zu trennen und gleichzeitig die Kapseln kostengünstig zu halten. Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass die Antriebe fast 24 Stunden am Tag arbeiten. Dies wird durch die Verwendung von Batterien in den Kapseln ermöglicht, die als Reichweitenverlängerer für die Batterie in der Antriebseinheit dienen. Die Batterie des Fahrgestells wird in erster Linie benötigt, wenn das Fahrgestell ohne Kapsel oder mit einfachen



Kapseln ohne Kapselbatterie fährt. Die Batterien der Kapseln können bei niedriger Leistung batteriefreundlich aufgeladen werden, da sie die meiste Zeit in einem Hub geparkt sind.

Zwischen den Mehrkosten für Batterien und Ladeinfrastruktur und der höheren Auslastung der Antriebe muss ein anwendungsfallbezogenes Optimum gefunden werden. Mit der Vorgehensweise in Abbildung 38 wurde ein Modell erstellt, mit dem die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugkonzepts für diesen Anwendungsfall nachgewiesen wurde. Allerdings sind die Daten noch nicht hinreichend genau, da sie oftmals (v.a. Erträge) aus der Literatur / Annahmen von Experten hergeleitet werden mussten. Die Logistikoptimierung, die eine optimale Disposition und damit Auslastung der Driveboards ermöglicht, konnte bisher nur händisch erstellt werden. Softwaregestützte Optimierungsmethoden verbessern die Aussagekraft des Modells zusätzlich.



Abbildung 38: Vorgehensmodell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugkonzepts U-Shift

## 6. Literaturverzeichnis (alphabetisch)

- BMVI: Mobilität in Deutschland. 2002, 2008, 2017.
- Debruyne, V., Simonot-Lion, F., & Trinquet, Y. (2004). EAST-ADL — An Architecture Description Language. Architecture Description Languages, IFIP WCC TC2 2004, IFIP The International Federation for Information Processing, vol 176. Springer, S. 181-195.
- Datenquellen: HDE, VDV, BIEK und Logistik-Watchblog, 2019; 1) Prognosen von BIEK von 2018-2023, 2) Business to Consumer, 3) Fast moving consumer goods, v.a. Lebensmittel (14% Wachstum von 2018-2019)
- Friedrich, Horst E. et. al. (2019): New vehicle concepts for future business model in: 19. Internationales Stuttgarter Symposium, hrsgg. v. Michael Bargende et. al., Wiesbaden 2019, S. 815–829, URL: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-25939-6\\_64](http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-25939-6_64), 16.07.2019.
- Keilhoff, Dan et al.: UNICARagil - New Architectures for Disruptive Vehicle Concepts. In Michael Bargende and Hans-Christian Reuss and Jochen Wiedemann, Editor , 19th Stuttgart International Symposium - Automotive and Engine Technology Band 19, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2019.

- Meck, G.: Spediteure werben um Migranten - Interview mit Bernhard Simon. Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 09-Dec-2018.OECD - International Transport Forum: Urban Mobility System Upgrade. 2015.
- Streichert, T. et al.: Elektrik/Elektronik-Architekturen im Kraftfahrzeug - Modellierung und Bewertung von Echtzeitsystemen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-25478-9>
- Ulrich, Christian et. al. (2019): Technologies for a modular vehicle concept used in passenger and goods transport in: 19. Internationales Stuttgarter Symposium, hrsgg. v. Michael Bargende et. al., Wiesbaden 2019, S. 587–598, URL: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-25939-6\\_49](http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-25939-6_49), 16.07.2019.Ulrich, Christian et. al. (2019): A highly innovative on-the-road modular vehicle and operation concept to solve today traffic issues in: 32nd Electric Vehicle Symposium (EVS32), Lyon 2019. Ulrich, Christian et. al. (2019): A highly innovative on-the-road modular vehicle and operation concept to solve today traffic issues in: 32nd Electric Vehicle Symposium (EVS32), Lyon 2019; Icons: Pixabay.com (CC0-Lizenz). 2019.
- United Nations, 'World Urbanization Prospects: The 2018 Revision', United Nations Economic & Social Affairs, key facts, 2018.
- Vector Informatik GmbH. (04. 11 2019). PREEvision – So geht modellbasiertes E/E-Engineering. Von <https://www.vector.com/de/de/produkte/produkte-a-z/software/preevision/> abgerufen.
- Woopen, Timo et al.: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures for Agile, Automated Vehicle Concepts. 27th Aachen Colloquium, Aachen, Germany, 2018.