

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

**Methodik zur Auslegung von autonomen
Fahrzeugkonzepten**

Adrian Paul König, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitz:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

2. Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

Technische Universität Braunschweig

Die Dissertation wurde am 02.11.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 01.02.2023 angenommen.

„Mehr als die Vergangenheit interessiert mich die Zukunft, denn in ihr gedenke ich zu leben.“

Albert Einstein

Danksagung

Die Idee und der Großteil der Vorarbeit für diese Dissertation entstand während meiner Zeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München von 2018 bis 2022. Eine Zeit, die ich sehr vermissen werde, weil sie mit so vielen tollen Menschen und spannenden Themen verknüpft war. Egal ob am eigenen oder an fremden Lehrstühlen, jeder Austausch mit Kollegen war wertvoll für meine und hoffentlich auch für deren Arbeit. Ich möchte deshalb jedem dafür danken, der dazu beigetragen hat, diese Arbeit zu gestalten.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, der mir sowohl meine Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter als auch die Chance zu dieser Dissertation ermöglicht hat. Neben wertvollen fachlichen Gesprächen und einem guten Führungsstil habe ich das Arbeitsumfeld, das er für uns am Lehrstuhl geschaffen hat, sehr geschätzt. Besonders die großen Freiheiten und die damit verbundene Selbstverantwortung hat die Zeit wertvoll gemacht. Weiterhin möchte ich mich bei meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor und bei Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Meiner Forschungsgruppe Fahrzeugkonzepte möchte ich ebenfalls meinen Dank aussprechen. Fachliche und persönliche Gespräche haben mir nicht nur geholfen, die Dissertation voranzubringen, sondern mich auch persönlich weiterzuentwickeln. Ganz besonders möchte ich mich bei meinen engsten Kollegen Alexander Koch, Ferdinand Schockenhoff, Lorenzo Nicoletti und Philipp Hafemann bedanken. Egal ob im Forschungsprojekt UNICARagil oder bei der Erarbeitung der Dissertation – auf sie war immer Verlass und ich bin sehr froh, dass aus dieser erfolgreichen Zusammenarbeit auch eine gute Freundschaft entstanden ist. Ersteren drei, meinen Eltern und Stefanie Wiesmayer danke ich für das Korrekturlesen meiner Arbeit. Ein großer Dank geht auch an all meine Studenten, insbesondere Daniel Telschow, Michael Mast und Korbinian Moller, die mit ihren Studienarbeiten wertvolle Beiträge für diese Arbeit geleistet haben.

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) danke ich für die Finanzierung meines Projektes UNICARagil. Florian Biechl, Erwin Darnhofer und Peter Steger (R&R Fahrzeugtechnik) bin ich für die große Hilfe beim Prototypenbau im Projekt dankbar.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinen Eltern von ganzem Herzen bedanken. Sie haben mir die Voraussetzungen gegeben, diesen Lebensweg zu gehen und haben mich stets dabei unterstützt. Auch meinen Freunden Jakob und Georg gilt mein Dank, weil sie stets Verständnis aufgebracht haben und mich in arbeitsreichen Zeiten an die schönen Seiten des Lebens erinnert haben.

Ismaning, im November 2022

Adrian König

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Abkürzungsverzeichnis | III |
| Formelzeichen | V |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 2 |
| 1.2 Inhalt und Aufbau der Arbeit | 3 |
| 1.3 Einordnung in das Gesamtvorhaben | 4 |
| 2 Stand der Technik | 7 |
| 2.1 Autonomes Fahren | 7 |
| 2.1.1 Begriffsdefinition | 7 |
| 2.1.2 Nutzungsszenarien..... | 8 |
| 2.1.3 Verbesserungs- und Risikopotential..... | 10 |
| 2.1.4 Autonome und elektrische Fahrzeuge..... | 14 |
| 2.2 Fahrzeugkonzeptentwicklung | 21 |
| 2.2.1 Begriffsdefinition und Einordnung | 21 |
| 2.2.2 Methoden zur Konzeptauslegung und -optimierung | 22 |
| 2.3 Ableitung der Themenstellung | 26 |
| 3 Methodik zur Auslegung von autonomen Fahrzeugkonzepten | 27 |
| 3.1 Anforderungsermittlung | 28 |
| 3.1.1 Gesetzgebung..... | 28 |
| 3.1.2 Nutzungsszenarien..... | 32 |
| 3.1.3 Potentiale..... | 33 |
| 3.1.4 Zusammenfassung der Anforderungen..... | 33 |
| 3.2 Modellbildung | 34 |
| 3.2.1 Nutzereingaben | 35 |
| 3.2.2 Antriebsstrangauslegung | 36 |
| 3.2.3 Packageauslegung | 40 |
| 3.2.4 Modellierung der Nebenverbraucher | 53 |
| 3.2.5 Massemodellierung | 56 |
| 3.2.6 Kostenmodellierung..... | 57 |

| | | |
|------------|---|--------------|
| 3.3 | Validierung und Verifikation des Gesamtmodells | 60 |
| 3.3.1 | Validierung mit existierenden Fahrzeugen..... | 60 |
| 3.3.2 | Verifikation mit autonomen Konzeptfahrzeugen..... | 62 |
| 3.4 | Konzeptoptimierung | 63 |
| 3.4.1 | Optimierungsalgorithmen..... | 64 |
| 3.4.2 | Randbedingungen | 66 |
| 3.4.3 | Optimierungsparameter | 67 |
| 4 | Optimierung und Potentialanalyse von autonomen Fahrzeugkonzepten | 69 |
| 4.1 | Anwendungsoptimierte Fahrzeugkonzepte | 69 |
| 4.1.1 | Konventionelles Fahrzeug | 70 |
| 4.1.2 | Autonomes Taxi für eine Großstadt..... | 73 |
| 4.1.3 | UNICARagil - autoTAXI | 78 |
| 4.2 | Szenarienabhängige Potentiale von autonomen Fahrzeugkonzepten | 81 |
| 4.2.1 | Einfluss der Verkehrsszenarien | 81 |
| 4.2.2 | Einfluss der Geschäftsmodelle..... | 90 |
| 5 | Diskussion und Ausblick | 97 |
| 6 | Zusammenfassung | 101 |
| | Abbildungsverzeichnis | i |
| | Tabellenverzeichnis | v |
| | Literaturverzeichnis | vii |
| | Vorveröffentlichungsliste | xxvii |
| | Anhang | xxxii |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------|---|
| AC | Alternating Current – Wechselstrom |
| ASM | Asynchronmaschine (Drehstrommaschine) |
| AuVeCoDe | Autonomous Vehicle Concept Development – Name des Softwaretools |
| AV | Autonomous Vehicle – Autonomes Fahrzeug |
| BEV | Battery Electric Vehicle – Batterieelektrisches Fahrzeug |
| CoP | Coefficient Of Performance – Verhältnis Kälteleistung/Verdichterleistung |
| DC | Direct Current – Gleichstrom |
| DIN | Deutsche Industrienorm |
| EOP | End of Production – Ende der Produktion |
| EWG | Europäische Wirtschaftsgemeinschaft |
| FKE | Fahrzeugkonzeptentwicklung |
| FKEP | Fahrzeugkonzeptentwicklungsprozess |
| GPS | Global Positioning System |
| HEV | Hybrid Electric Vehicle – Hybridelektrisches Fahrzeug |
| HVAC | Heating Ventilation and Air Conditioning – Heizung, Lüftung u. Klimatisierung |
| I2X | Infrastructure-to-X – Kommunikation der Infrastruktur mit Allem |
| ICEV | Internal Combustion Engine Vehicle – Fahrzeug mit Verbrennungsmotor |
| INS | Inertial Navigation System – Trägheitsnavigationssystem |
| ISO | Internationale Organisation für Standardisierung |
| LDS | Längsdynamiksimulation |
| LiDAR | Light Detection And Ranging |
| MoD | Mobility on Demand |
| MOPSO | Multi Objective Particle Swarm Optimization |
| NCAP | New European Car Assessment Programme |
| NSGA | Non-dominated Sorting Genetic Algorithm |
| NVVT | Normen, Verordnungen und Verbrauchertests |
| OEM | Original Equipment Manufacturer – Erstausrüster |
| ÖPNV | Öffentlicher Personennahverkehr |
| PEP | Produktentwicklungsprozess |

| | |
|-------|--|
| PSM | Permanentmagnet-Synchronmaschine (Drehstrommaschine) |
| RADAR | Radio Detection And Ranging |
| RTK | Real Time Kinematic – Verfahren für Verbesserung des GPS |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| SFTP | Supplemental Federal Test Procedure |
| SL | Second Level – Zweite Ebene (-Batterie) |
| SOP | Start of Production – Beginn der Produktion |
| STL | Standard Tessellation Language – Dateiformat für 3D-Körper |
| StVG | Straßenverkehrsgesetz |
| SUV | Sport Utility Vehicle – Fahrzeug mit Geländewagenoptik |
| THG | Treibhausgas |
| UNECE | United Nations Economic Commission for Europe |
| UF | Underfloor – Unterboden (-Batterie) |
| V2X | Vehicle-to-X – Kommunikation des Fahrzeugs mit Allem |
| VDA | Verband Der Automobilindustrie |
| VW | Volkswagen |
| WLTP | Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicle Test Procedure |

Formelzeichen

| Formelzeichen | Einheit | Beschreibung |
|-----------------------|-------------------|---|
| $d_{Toleranz}$ | mm | Abstandstoleranz zwischen Batterie und Radhaus |
| $F_{X,A}$ | N | Luftwiderstandskraft |
| $F_{X,C}$ | N | Steigungswiderstandskraft |
| $F_{X,R}$ | N | Rollwiderstandskraft |
| $F_{X,T}$ | N | Kraft am Reifen |
| J_{tot} | kg·m ² | Trägheitsmoment |
| $l_{freieCl_min}$ | mm | Minimal vorhandene freie Crashlänge |
| m_{pt} | kg | Ersatzmasse für rotierende Massen |
| m_{tot} | kg | Gesamte zu beschleunigende Masse |
| m_V | kg | Fahrzeugmasse |
| r_{dyn} | m | Dynamischer Raddurchmesser |
| $x_{Batterie_SL1}$ | mm | Länge des verfügbaren Bauraums in x-Richtung für die erste Batterie in zweiter Ebene |
| $x_{Batterie_SL2}$ | mm | Länge des verfügbaren Bauraums in x-Richtung für die zweite Batterie in zweiter Ebene |
| $x_{Batterie_UF}$ | mm | Länge des verfügbaren Bauraums in x-Richtung für Batterie im Unterboden |
| $x_{Fußraum}$ | mm | Länge des Fußraums in x-Richtung |
| $x_{Rückenlehne}$ | mm | Länge der Rückenlehne in x-Richtung |
| x_{Sitz} | mm | Länge der Sitzfläche in x-Richtung |
| $x_{Überlappung}$ | mm | Länge der Fußraumüberlappung in x-Richtung |
| $x_{Wagenlänge_min}$ | mm | Minimal verfügbare Wagenlänge |
| $z_{Batterie_SL1}$ | mm | Höhe des verfügbaren Bauraums in z-Richtung für die erste Batterie in zweiter Ebene |
| $z_{Batterie_SL2}$ | mm | Höhe des verfügbaren Bauraums in z-Richtung für die zweite Batterie in zweiter Ebene |

Formelzeichen

| | | |
|-------------------------------|----|--|
| $Z_{\text{Batterie_UF}}$ | mm | Höhe des verfügbaren Bauraums in z-Richtung für Batterie im Unterboden |
| $Z_{\text{Bodenfreiheit}}$ | mm | Bodenfreiheit unterhalb des Fahrzeugs |
| $Z_{\text{Fußraum}}$ | mm | Höhe des Fußraums in z-Richtung |
| Z_{Kopfraum} | mm | Höhe des Kopfraums in z-Richtung |
| $Z_{\text{Rückenlehne}}$ | mm | Höhe Rückenlehne in z-Richtung |
| $\alpha_{\text{Rückenlehne}}$ | ° | Winkel der Rückenlehne zur Horizontalen |
| λ_m | - | Drehmassenzuschlagsfaktor |

1 Einleitung

Die vier Megatrends Digitalisierung, Automatisierung, Konnektivität und Elektrifizierung beschäftigen seit Jahren die Automobilindustrie [1, S. 50]. Der Anteil an Neuzulassungen von elektrifizierten Fahrzeugen betrug im Jahr 2021 bereits 19,2% in Europa und 15,8% in China [2], wohingegen die Automatisierung noch vor vielen technischen, gesellschaftlichen und juristischen Herausforderungen steht [3, S. 23, 4, S. 6-8, 5, S. 5, 6, S. 4]. Dabei ist der Traum vom autonomen Fahren schon fast so alt wie das Automobil selbst und wurde bereits vor vielen Jahrzehnten in Planungen und Visionen aufgenommen [7, S. 59]. Während Flugzeuge, Züge und Schiffe schon weitgehend automatisiert sind, steht das autonome Fahren im Straßenverkehr am Anfang [8, S. VI]. Nichtsdestotrotz ist durch die zunehmende Anzahl an immer besser werdenden Fahrerassistenzsystemen ein Zuwachs an Automatisierung zu erkennen [8, S. 8].

Im Gegensatz zur fortschreitenden Elektrifizierung des Antriebsstrangs, bei der zwischen Fahrzeugen mit Brennstoffzelle, hybrid- und batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) unterschieden wird, ist beim autonomen Fahren noch unklar, wann und in welchen Szenarien entsprechende Systeme eingeführt werden können [9, S. 330]. Durch die Verabschiedung eines neuen Gesetzes für das autonome Fahren [10] hat der Bundestag in Deutschland die ersten rechtlichen Rahmenbedingungen für diese Technologie geschaffen. Als Land, das den meisten Umsatz durch Fahrerassistenzsysteme pro Fahrzeug hat [11, S. 38], soll damit weiter eine Vorreiterrolle in der Automatisierung erhalten bleiben. Autonomes Fahren wird zudem als Schlüssel für die Erhaltung des Wohlstands gesehen, weil es trotz zunehmender Urbanisierung und Bevölkerungswachstum die Mobilität von Menschen und Gütern sicherstellt [12, S. 8].

Neben der Politik sind auch Privatkunden, die Öffentlichkeit, die Wirtschaft und die Automobilindustrie am autonomen Fahren interessiert [13, S. 185]. Während sich Kunden eine höhere Sicherheit und Verfügbarkeit versprechen [14, S. 4], ändert sich das Arbeitsumfeld für Ingenieure. Statt dem Streben nach hoher Verarbeitungsqualität rücken Innovationen, Agilität und die Softwareentwicklung in den Vordergrund [3, S. 32]. Das schlimmste Szenario für Automobilhersteller wäre die Transformation von einem Original Equipment Manufacturer (OEM) zu einem Zulieferer von Mobilitätsanbietern und damit der Verlust eines großen Teils der Gewinne [15, S. 21].

Die Durchdringung des Verkehrs mit autonomen Fahrzeugen (AV) kann noch Jahrzehnte dauern [14, S. 28]. Obwohl der Enthusiasmus höher ist als bei der Elektrifizierung [16, S. 8], wird das autonome Fahren die Mobilität voraussichtlich nur zusammen mit Trends wie der geteilten Nutzung von Fahrzeugen zum Positiven verändern [14, S. 6]. Nur so können die hohen Kosten durch Individualverkehr und Privatbesitz, die auch in Form von Emissionen und Verkehrsstaus von der Gesellschaft getragen werden müssen, zukünftig reduziert werden [17, S. 6]. Während in großen Städten diese Maßnahmen die Mobilität verbessern können, wird das autonome Fahren in ländlichen Regionen durch längere Strecken und geringere Bevölkerungsdichten weiterhin vor Herausforderungen stehen [18, S. 13].

1.1 Motivation

Von der Automatisierung der Fahrfunktion werden auf der einen Seite Verbesserungen in den Bereichen Sicherheit, Komfort, Leistung sowie neue Mobilitätsangebote erwartet [19, S. 7]. Auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Nachteile, die die Zukunft des autonomen Fahrens erschweren können. So könnte der Verkehr zunehmen, weil eine steigende Anzahl an Nutzern immer häufiger zu längeren Fahrten bereit ist. Der Anstieg der Nutzerzahlen lässt sich auf Gruppen ohne Fahrerlaubnis zurückführen, die bis dato nicht am Individualverkehr teilnehmen konnten [8, S. VII-VIII]. Die Zunahme der Nutzungsdauer könnte hingegen dadurch verursacht werden, dass Nutzer die Fahrzeit durch den Entfall der Fahraufgabe nicht mehr negativ wahrnehmen und deshalb längere Strecken in Kauf nehmen [4, S. 10, 20, S. 166].

Bei der Bestimmung des Einsparpotentials im Bereich der Ökologie und Ökonomie gibt es ebenfalls zahlreiche Widersprüche [21, S. 4]. Maßnahmen, die den Verbrauch senken (Eco-Driving [16, S. 20, 21, 5–8] und intelligente Infrastruktur [22, S. 32]) stehen Veränderungen entgegen, die zu einer Erhöhung des Verbrauchs führen (erhöhter Energiebedarf durch Rechner und Infrastruktur [23, S. 3254, 24, S. 3] und mehr Leerfahrten [24, S. 6]). Nur eine möglichst genaue und quantitative Ermittlung von möglichst vielen Effekten kann Abhilfe schaffen und diese gegeneinander aufwiegen.

Für Unternehmen in der Automobilindustrie ist es wichtig, rechtzeitig Trends zu erkennen, die das Auto in Zukunft verändern werden [9, S. 322]. Im Entwicklungsprozess müssen diese neuen Trends frühzeitig in das Fahrzeugkonzept einfließen, damit sie technisch und wirtschaftlich bewertet und gegebenenfalls umgesetzt werden können [25, S. 4]. Beispiele dafür sind die Automatisierung in Kombination mit Innovationen im Bereich der Geschäftsmodelle [26, S. 572] und die schon länger geforderte Spezialisierung von Fahrzeugen auf einzelne Nutzungsszenarien zur Steigerung der Effizienz [27, S. 2].

Durch die genannten Herausforderungen und neuen Randbedingungen ergibt sich der Bedarf nach Werkzeugen, die sowohl die gestiegene Komplexität in der Entwicklung beherrschbar machen als auch Interessensgruppen helfen, die Potentiale des autonomen Fahrens abzuschätzen. Virtuelle Entwicklungswerkzeuge haben sich für diese Aufgaben in den letzten Jahren bewährt und konnten den Entwicklungsprozess beschleunigen [28, S. 670]. Führen neue Technologien wie die Elektrifizierung oder Automatisierung zu einer Veränderung der Fahrzeugarchitektur, müssen bestehende Werkzeuge jedoch auf deren Eignung überprüft und bei Bedarf angepasst werden [29, S. 5].

Diese Arbeit entstand parallel zu der Mitarbeit in dem Projekt UNICARagil [30]. Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung einer disruptiven und modularen Architektur für die Hard- und Software von AV. Eine skalierbare Plattform bildet die Basis für vier Prototypen, die im Rahmen des Projektes aufgebaut werden. Alle Fahrzeuge verfügen über keinen Fahrerarbeitsplatz mehr und wurden nach einer kurzen Konzeptphase bereits in die Komponentenentwicklung überführt, was in einer unzureichenden Ausarbeitung des Fahrzeugkonzepts resultierte. Dieser Umstand und die Verwendung von großvolumigen Komponenten aus dem Consumer-Bereich erschweren die Übertragbarkeit der entwickelten Fahrzeuge auf eine Serienlösung. Diese Ausgangssituation bietet eine weitere Motivation, ein Werkzeug zu schaffen, das die Entwicklung von autonomen Fahrzeugkonzepten schnell und effizient unterstützt.

1.2 Inhalt und Aufbau der Arbeit

Im vorherigen Kapitel wurde der Bedarf an einem Werkzeug identifiziert, das die neuen Herausforderungen bei autonomen Fahrzeugen bereits in der frühen Entwicklungsphase beherrschbar macht. Weiterhin ist es wichtig, die noch unklaren Szenarien in Zukunft bewerten zu können, um Interessensgruppen eine Entscheidungsgrundlage hinsichtlich der Automatisierung zu liefern. Die folgende Arbeit beschreibt deshalb die Entwicklung einer Methodik, die diese Anforderungen erfüllen soll und somit einen Beitrag zum Erfolg des autonomen Fahrens leisten kann. Der Aufbau der Arbeit (Abbildung 1.1) wird im Folgenden vorgestellt.

Nach Einordnung dieser Arbeit in die Forschungsvorhaben des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München soll im Kapitel 2.1 zunächst der Begriff autonomes Fahren präzisiert und für diese Arbeit definiert werden. Danach werden mögliche Nutzungsszenarien und Potentiale aus der Literatur gesammelt und ausgewertet. Eine Analyse der Prognosen, wie die Automatisierung das Fahrzeug verändern könnte, liefert einen ersten Einblick über die notwendigen Anpassungen und Neugestaltung von Simulationsmodellen.

Die Fahrzeugkonzeptentwicklung (FKE) ist ein wichtiger Teil des frühen Entwicklungsprozesses und hilft, neue Technologien rechtzeitig einzubinden und die wichtigsten Parameter festzulegen. Die FKE wird neben bereits umgesetzte Methoden in Kapitel 2.2 vorgestellt und im Anschluss die Themenstellung abgeleitet (Kapitel 2.3).

Die Methodik in der vorliegenden Arbeit beginnt mit der Formulierung der Anforderungen (Kapitel 3.1). Diese stellen die Grundlage für die folgende Anpassung und Entwicklung von Komponenten- und Gesamtfahrzeugmodellen (Kapitel 3.2) dar, die im Anschluss validiert bzw. verifiziert werden (Kapitel 3.3). Zur Vermeidung einer zeitaufwändigen manuellen Suche nach optimalen Lösungen wird anschließend die Implementierung eines Optimierungsalgorithmus beschrieben, der eine automatische Lösungssuche ermöglicht (Kapitel 3.4).

Die Methodik, die in dieser Arbeit in einem Software-Tool umgesetzt wird, wird im anschließenden Kapitel beispielhaft an drei Fahrzeugen angewendet (Kapitel 4.1) und erste Potentiale durch die Anpassung dieser Fahrzeugkonzepte werden gezeigt. Im Anschluss soll die Variation von Anforderungen die Auswirkungen von unterschiedlichen Nutzungsszenarien auf das Gesamtfahrzeug demonstrieren (Kapitel 4.2). Das Aufzeigen von daraus resultierenden Einsparpotentialen soll helfen, mögliche Einführungsszenarien zu bewerten und dafür passende Fahrzeugkonzepte zu bestimmen.

Die Diskussion der Ergebnisse und ein Ausblick für zukünftige Arbeiten findet im darauffolgenden Kapitel 5 statt. Insbesondere die Einschränkungen durch Modellgrenzen sollen diskutiert und Empfehlungen für die Weiterentwicklung formuliert werden. Die Zusammenfassung in Kapitel 6 präsentiert abschließend die wichtigsten Aspekte der Arbeit.

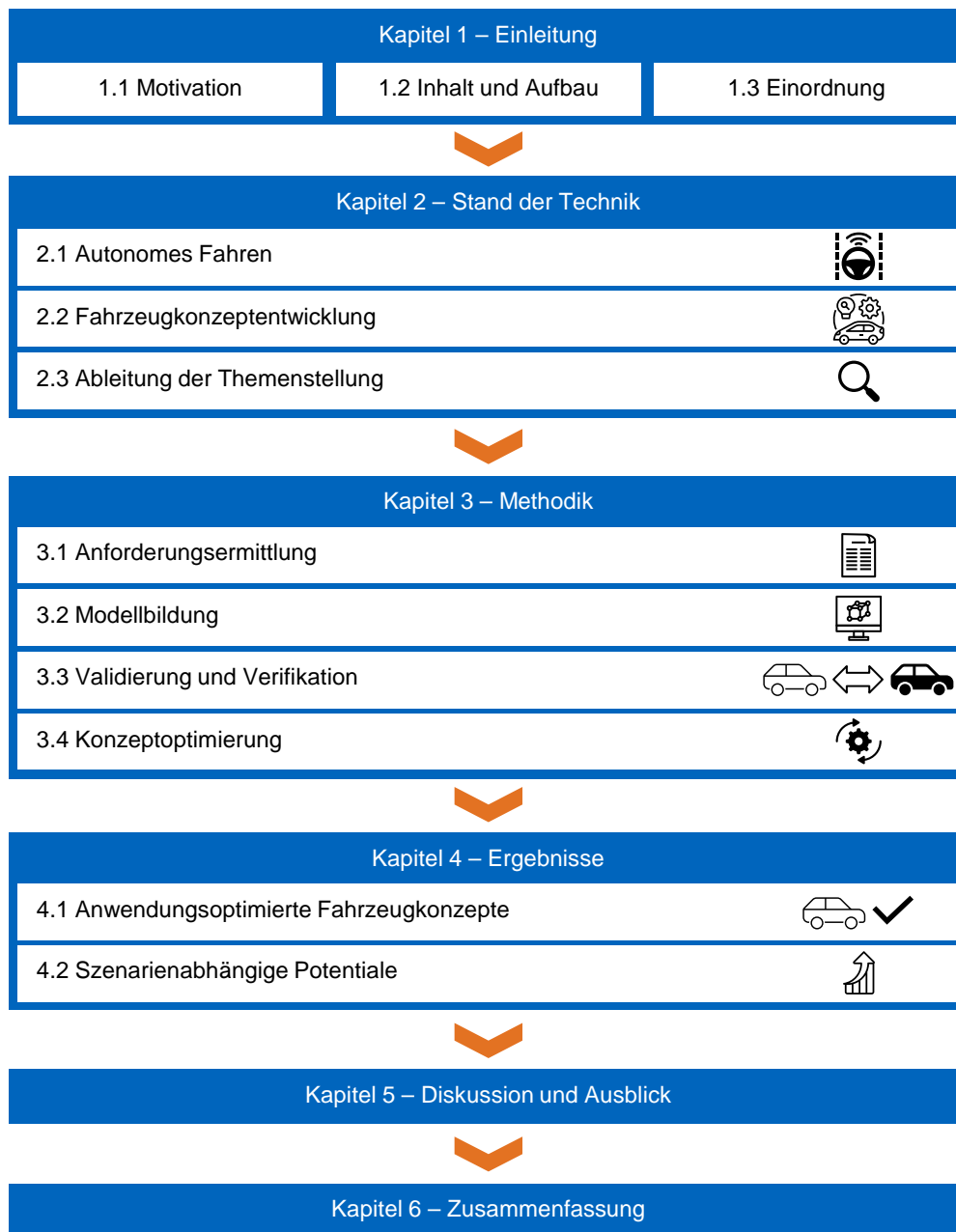


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

1.3 Einordnung in das Gesamtvorhaben

Während dieses Dissertationsvorhabens waren am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik weitere Kollegen in ähnlichen Themenfeldern in der FKE tätig (Abbildung 1.2). Die Forschungsvorhaben können sowohl nach Technologietrend als auch Entwicklungsbereich eingeteilt werden. Während bei dem Technologietrend zwischen elektrisch, autonom und geteilt unterschieden wird, kann bei der Entwicklungsstufe zwischen der Hardware (einschließlich Package und Komponenten), der Software und dem übergreifenden Entwicklungsprozess differenziert werden. Für einen größtmöglichen Nutzen der Forschungsergebnisse wurde darauf geachtet, dass Überschneidungen genutzt und dennoch möglichst viele neue Ergebnisse erarbeitet werden konnten.

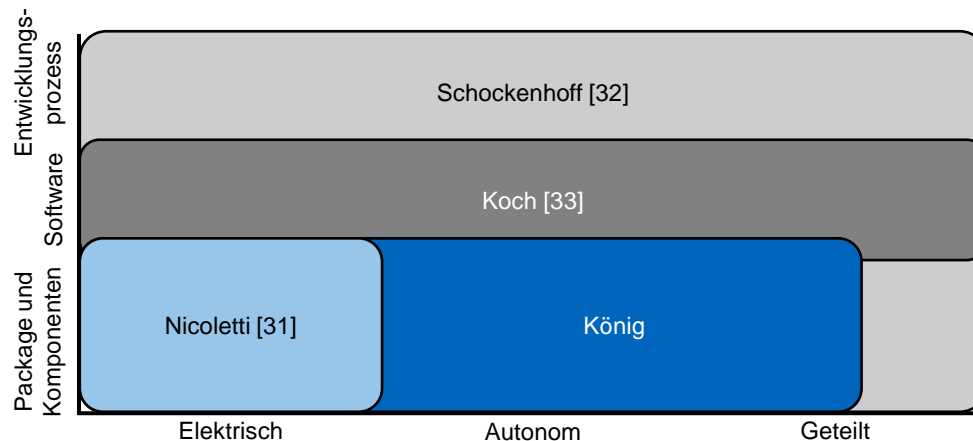


Abbildung 1.2: Einordnung der Arbeit in das Gesamtvorhaben am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München

Nicoletti [31] hat die Konzeptauslegung und -optimierung für konventionelle BEV verbessert und neben gravimetrischen auch volumetrische Sekundäreffekte in hohem Detaillierungsgrad modelliert. Seine validierten Modelle für die Komponentengeometrien und -massen konnten in dieser Arbeit größtenteils integriert und angewendet werden. Weiterhin wurden Modelle wie die Längsdynamiksimulation (LDS) gemeinsam mit ihm entwickelt.

Neue Technologien können eine Veränderung der Kunden- und Nutzerstruktur bedeuten. Der Konzeptentwicklungsprozess muss angepasst werden, damit diese Veränderungen berücksichtigt werden können. Schockenhoff [32] beschäftigt sich deshalb in seiner Dissertation mit der Anpassung dieses Prozesses für autonome, geteilte und elektrische Fahrzeuge. Damit die vorliegende Arbeit für sein Vorhaben verwendet werden kann, wurde darauf geachtet, dass die Methodik und das daraus resultierende Auslegungstool über geeignete Schnittstellen zu seiner Arbeit verfügt.

Koch [33] beschäftigt sich mit dem Aufbau eines Algorithmus zum energieeffizienten Fahren für BEV. Auf Basis des Algorithmus soll der Antriebsstrang ausgelegt werden. Er zeigt damit Möglichkeiten auf, wie die Software von AV das Fahrverhalten optimieren können und welche Auswirkungen sich daraus auf die Auslegung der Komponenten des Antriebsstrangs ergeben.

Die vorliegende Arbeit beschreibt den Aufbau einer Methodik zur Entwicklung von elektrischen und autonomen Fahrzeugen. Neue Geschäftsmodelle in Form von geteilter Mobilität werden ebenfalls auf Fahrzeugebene berücksichtigt. Die Veränderung der Komponenten und des Gesamtfahrzeugs durch Software wie Eco-Driving Algorithmen sind in dieser Arbeit nicht direkt implementiert. Sie kann aber indirekt über die Einsteuerung von optimal angepassten Fahrzyklen, wie sie Koch in seiner Arbeit ermittelt, betrachtet werden.

2 Stand der Technik

Das autonome Fahren als einer der großen Trends in der Mobilität zeigt anhand vieler Prognosen und Visionen eine vielversprechende, aber auch unklare Zukunft auf. Ausgangspunkt dieser Arbeit ist deshalb die Untersuchung, wie autonomes Fahren definiert werden kann und welche Auswirkungen es auf die Mobilität und insbesondere das Fahrzeug hat (Kapitel 2.1). Weil die FKE die Möglichkeit bietet, solch neue Trends bereits in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses zu berücksichtigen, werden im Anschluss bestehende Arbeiten auf Eignung für die Entwicklung von AV geprüft (Kapitel 2.2). Auf dieser Basis wird schließlich die Themenstellung für diese Arbeit abgeleitet (Kapitel 2.3).

2.1 Autonomes Fahren

Der Begriff *Autonomes Fahren* wird in der Gesellschaft vielseitig verwendet und ist oft nicht eindeutig beschrieben. Für diese Arbeit soll deshalb zu Beginn eine einheitliche Definition dieses Begriffs erfolgen (Kapitel 2.1.1). Die in der Literatur diskutierten Nutzungsszenarien (Kapitel 2.1.2) und Potentiale (Kapitel 2.1.3) durch autonomes Fahren werden im Anschluss gesammelt und schließlich daraus folgende Veränderungen am Fahrzeug beschrieben (Kapitel 2.1.4).

2.1.1 Begriffsdefinition

In der Automobilbranche und Wissenschaft hat sich die Einteilung des Automatisierungsgrades in Stufen bzw. Level durchgesetzt. Die Society of Automotive Engineers (SAE) hat 2014 die Norm J3016 [34] eingeführt, die die Automatisierung der Fahrfunktion von Straßenfahrzeugen in sechs Level einteilt (Tabelle 2.1). Die Level 0 bis 4 sind im Gegensatz zu Level 5 in ihrem Betriebsbereich eingeschränkt und folglich nicht für alle Einsatzorte oder Situationen geeignet.

Der Verband der Automobilindustrie (VDA) in Deutschland hat eine ähnliche Einteilung gewählt [12, S. 14]. Aktive Sicherheitssysteme wie ein Notbremsassistent sind von dieser Einteilung ausgenommen, weil diese nicht dauerhaft die Fahraufgabe übernehmen, sondern nur kurzzeitig in Gefahrensituationen eingreifen [34, S. 2].

Diese Level klassifizieren in der SAE-Norm entgegen der verbreiteten Verwendung die aktuell aktivierte, automatische Fahrfunktion und nicht das Fahrzeug selbst. Eine Ausnahme stellen die in dieser Arbeit betrachteten Fahrzeuge dar, die einen fahrerlosen Betrieb ermöglichen. Diese werden nach der SAE J3016 Norm als Automated-driving-system-dedicated Vehicles (ADS-DV) bezeichnet [34, S. 4] und müssen über eine dauerhaft automatisierte Fahrfunktion verfügen, die mindestens als Level 4 kategorisiert wird. Ein Level 5-ADS-DV muss alle kartierten Straßen, die von einem menschlichen Fahrer befahrbar sind, erreichen können. Ein Level 4-ADS-DV kann

hingegen auf ein geografisches Gebiet eingeschränkt werden. In der folgenden Arbeit werden diese Level 4- oder Level 5-ADS-DVs als AV bezeichnet.

Tabelle 2.1: Level der Automatisierung nach SAE J3016 [34]

| Level | Titel des Levels | Rückfallebene | Fahrzeugsteuerung | Betriebsbereich |
|-------|--------------------------|--|-------------------|-----------------|
| 0 | Keine Automatisierung | Fahrer | Fahrer | - |
| 1 | Assistenzsystem | Fahrer (permanente Überwachung) | Fahrer und System | Eingeschränkt |
| 2 | Teilautomatisierung | Fahrer (permanente Überwachung) | System | Eingeschränkt |
| 3 | Bedingte Automatisierung | Fahrer (übernahmebereit bei Ausfällen) | System | Eingeschränkt |
| 4 | Hochautomatisierung | System | System | Eingeschränkt |
| 5 | Vollautomatisierung | System | System | Uneingeschränkt |

AV können theoretisch mit jeder Antriebsart ausgestattet werden [35, S. 274]. Barth et al. [36, S. 111] und Wadud et al. [21, S. 11] sehen die Elektrifizierung des Antriebsstrangs als wichtige Ergänzung zur Automatisierung. Nach Lang et al. [4, S. 10] erwarten bereits heute die meisten Kunden bei einem AV einen elektrischen oder hybriden Antrieb. Die Automatisierung kann Nachteile dieser Antriebe wie Diskomfort beim Laden oder Reichweitenangst durch die Übernahme der Planung und des Ladevorgangs überwinden [21, S. 11]. In dieser Arbeit wird deshalb, und weil ein emissionsfreier Betrieb im Rahmen der Elektrifizierung angestrebt wird, ein batterieelektrischer Antrieb für AV angenommen. Im folgenden Text ist daher für alle AV von einem batterieelektrischen AV auszugehen.

Als konventionelles Fahrzeug wird in dieser Arbeit analog zur SAE J3016 [34, S. 4] ein Fahrzeug bezeichnet, das für jede Einzelfahrt einen menschlichen Fahrer benötigt. Diese Fahrzeuge können über Systeme von Level 1 bis Level 4 verfügen, benötigen aber für jede Einzelfahrt teilweise die Übernahme eines menschlichen Fahrers. Weil im Folgenden nur der Unterschied zwischen einem konventionellen Fahrzeug und einem AV, ungeachtet der Einflüsse durch die Elektrifizierung, Betrachtung finden, werden für die konventionellen Fahrzeuge BEV angenommen.

2.1.2 Nutzungsszenarien

Zu Beginn werden zur Erhaltung der hohen Verkehrssicherheit als Einsatzort voraussichtlich einfache Szenarien wie Autobahnfahrten oder halböffentliche Gelände für autonomes Fahren gewählt [37, S. 65]. In den nächsten Dekaden kann autonomes Fahren in weiteren, vielfältigeren Nutzungsszenarien Einzug halten, die durch verschiedene Kategorien klassifiziert werden können. Wachenfeld et al. [38, S. 20] definieren vier stellvertretende Nutzungsszenarien (Autobahnpilot, Autonomes Valet-Parken, Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer, Vehicle-on-Demand) und legen selbstgewählte Merkmalsausprägungen zur Unterscheidung fest. Sie wählen für alle genannten Szenarien einen Betrieb im Mischverkehr und schließen damit Szenarien mit separater Infrastruktur nicht mit ein. Eine ähnliche Einteilung wählen auch Mosquet et al. [16, S. 6]. Die genannten Beispielszenarien decken somit nicht jeden Fall ab und stellen nur eine Teilmenge an vorstellbaren Szenarien für AV dar.

In dieser Arbeit wurden die vier Kategorien Verkehr, Infrastruktur, Geschäftsmodell und Automatisierung aufgrund einer Literaturrecherche abgeleitet (Tabelle 2.2) und sind im Folgenden detailliert beschrieben. Je nach Nutzungsszenario und resultierender Ausprägung der vier Kategorien ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Auslegung von AV, die in Kapitel 3.1.2 auf Basis der folgenden Literatur abgeleitet werden.

Tabelle 2.2: Kategorien zur Einteilung der Nutzungsszenarien von AV

| Verkehr | Fahrzeugintelligenz | Geschäftsmodell | Automatisierung |
|-------------------------------------|--|---------------------------------------|----------------------|
| Betrieb im Mischverkehr | Unabhängiger Betrieb | Privatbesitz | Level 4-5 mit Fahrer |
| Betrieb auf separater Infrastruktur | Kommunikation mit Infrastruktur (I2X) und anderen Fahrzeugen (V2X) | Carsharing (MoD) Ridesharing (MoD) | Level 4-5 fahrerlos |

Verkehr

Die Einbindung von AV in den bestehenden Verkehr hat einen bedeutenden Einfluss auf das Fahrzeug und dessen Rückkopplung auf den Verkehr. Neben einem gemeinsamen Betrieb mit konventionellen Fahrzeugen im sogenannten Mischverkehr kann ein Fahrzeug auch auf einer abgetrennten Infrastruktur verwendet werden [39, S. 139-140]. Okumura [40, S. 43-44] sieht die anfängliche Verwendung von AV auf einer separaten Fahrspur als ersten Schritt der Kommerzialisierung an. Wird ein Fahrzeug im Mischverkehr eingesetzt, muss es den Gesetzmäßigkeiten und Regeln entsprechen, um durch beispielsweise eine zu niedrige Geschwindigkeit kein Verkehrshindernis darzustellen [20, S. 173]. Die Verkehrsumgebung kann zuletzt die Anforderungen an die Automatisierung verändern, weil komplexe Umgebungen wie städtische Gebiete mit verschiedensten Verkehrsteilnehmern andere Anforderungen zur Folge haben als Autobahnfahrten [16, S. 14].

Fahrzeugintelligenz

Die Automatisierung der Fahrfunktion benötigt Sensoren und Rechner zur Wahrnehmung der Umwelt und sicheren Trajektorienplanung. Diese Abläufe finden entweder ausschließlich im Fahrzeug oder teilweise außerhalb des Fahrzeugs statt [8, S. 22]. Informationen außerhalb des Fahrzeugs können entweder von der Infrastruktur (I2X), oder von anderen AV (V2X) gesendet werden. Barth et al. [36, S. 107] sehen die Interaktion über I2X und V2X als Voraussetzung an, um überhaupt einen Vorteil gegenüber einem menschlichen Fahrer zu erreichen. Mosquet et al. [16, S. 14] und Peters [22, S. 28] sehen V2X als Verbesserung der Leistungsfähigkeit, weil Nachteile wie eine reduzierte Höchstgeschwindigkeit aufgrund von unzureichender Sensorreichweite [41, S. 146] überwindbar werden. Die Wahl des passenden Sensorsetups muss folglich unter Berücksichtigung der vorliegenden Rahmenbedingungen, wie dem oben genannten Verkehrsszenario, und Erweiterungen außerhalb des Fahrzeugs, wie der Kommunikation mit anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur, getroffen werden.

Geschäftsmodell

Neben der Nutzung eines AV als Privatfahrzeug beschreibt die Literatur den Einsatz von AV im Rahmen von Car-Sharing oder Ride-Sharing [4, 17ff, 19, S. 10, 20, S. 159]. In diesen Fällen werden die Fahrzeuge meist im Zusammenhang mit dem Geschäftsmodell Mobility on Demand (MoD) betrieben, in dem der Kunde zum Zurücklegen einer Strecke ein Fahrzeug anfordert, das er in den meisten Fällen nicht besitzt [26, S. 541]. Aus der Verwendung eines Fahrzeugs als Privatfahrzeug oder im Rahmen von MoD resultieren unterschiedliche Anforderungen an die Auslegung. Während eine Privatperson heutzutage nahezu 100 % seiner Fahrten mit seinem Fahrzeug abdecken möchte, was in Deutschland einer Reichweite von bis zu 690 km und fünf Sitzplätzen entspricht, kann ein MoD-Betreiber sich auf nur 90 % der Fahrten spezialisieren, was nur noch eine Reichweite pro Fahrt von 14 km und zwei Sitzplätze zur Folge hat [20, S. 173].

Die Überdimensionierung heutiger Privatfahrzeuge [42, S. 69] kann folglich bei Modellen, die für MoD entwickelt werden, reduziert und die Fahrzeuge für den Anwendungsfall spezialisiert werden [27, S. 2]. Neben dem Antriebsstrang betrifft die Spezialisierung auch den Innenraum, der beispielsweise für ein Langstreckenfahrzeug komfortabler gestaltet werden kann als für ein Kurzstreckenfahrzeug [42, S. 83]. Die ermöglichten Nebentätigkeiten haben wiederum Einfluss auf die Sitzkonfiguration [43, S. 4], wodurch ein Fahrzeug, das dem Kunden Arbeiten oder Schlafen ermöglichen soll, dementsprechend anzupassen ist.

Automatisierung

Die SAE-Level (Tabelle 2.1) charakterisieren die Automatisierung, die ein System im Fahrzeug erreicht. Wurde ein Fahrzeug der Kategorie Level 5 zugeordnet, bedeutet das, dass es nahezu an jeden Ort ohne Fahrer selbst steuern kann. Es schließt jedoch nicht aus, dass ein Fahrer freiwillig das Fahrzeug aus Gründen wie Fahrspaß manuell übernehmen kann. Becker et al. [44, S. 52] gehen davon aus, dass die Automatisierung vor allem langweilige und überfordernde Situationen übernehmen soll, bei den restlichen Szenarien ein manuelles Fahren aber noch möglich sein soll. Während damit überwiegend Fahrzeuge im Privatbesitz gemeint sind, ist davon auszugehen, dass diese unabhängig von dem Automatisierungs-Level weiterhin über einen Fahrerarbeitsplatz verfügen [20, S. 164]. Das größte Einsparpotential von AV kann jedoch nur in Kombination mit geeigneten Geschäftsmodellen wie z.B. Ride-Sharing erreicht werden (Kapitel 2.1.3), wobei hier mit dem Entfall eines Fahrers zu rechnen ist [26, S. 583].

Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass es Level 4 und Level 5 Fahrzeuge sowohl mit als auch ohne Fahrerarbeitsplatz geben wird. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik sollte damit weiterhin die Anforderungen berücksichtigen können, die aus einem Fahrerarbeitsplatz resultieren, es aber auch ermöglichen, die neuen Freiheitsgrade bei dessen Entfall zu nutzen.

2.1.3 Verbesserungs- und Risikopotential









In der nachfolgend vorgestellten Literatur gibt es zahlreiche Autoren, die entweder ein Verbesserungs- oder ein Risikopotential im autonomen Fahren sehen. Eine solche Abschätzung ist nicht nur wichtig für Investoren, OEM und Flottenbetreiber [12, S. 16], sondern auch für die Politik, damit beispielsweise ein negativer Einfluss von AV auf die Erreichung der Klimaziele im Transportsektor ausgeschlossen werden kann [37, S. 1]. Verbesserungs- und Risikopotentiale des autonomen Fahrens werden basierend auf der folgenden Literatur jeweils in die Bereiche Sicherheit, Kosten/Verbrauch, Verkehr und Komfort eingeteilt (Tabelle 2.3). Die Potentiale können

sich auch gegenseitig beeinflussen und eine primäre Veränderung innerhalb eines Bereichs kann zu einer sekundären Veränderung in anderen Bereichen führen [37, S. 124]. So kann beispielsweise eine Reduktion der Kosten eine erhöhte Nachfrage zur Folge haben, was wiederum im Bereich Verkehr zu mehr Staus führt. Für eine Aussage, ob in einem Bereich das Verbesserungspotential das Risikopotential überwiegt, muss eine quantitative Abschätzung vorliegen. Untersuchungen, bei denen die Autoren eine solche Abwägung durchgeführt haben, werden am Ende dieses Abschnitts vorgestellt. In welchem Umfang die Methode dieser Arbeit zu einer quantitativen Abschätzung der Potentiale beitragen kann wird in Kapitel 3.1.3 erläutert.

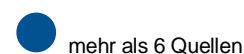
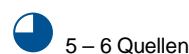
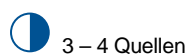
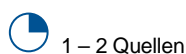
Die Potentiale von AV, die für jede Kategorie im Anschluss an Tabelle 2.3 vorgestellt werden, können je nach gewähltem Szenario unterschiedliche Ausmaße haben [21, S. 11, 37, S. 1]. Litman [14, S. 32] unterscheidet nach Fahrzeugtyp und prognostiziert für ein privates AV die Steigerung des Komforts, während ein geteiltes AV insbesondere die Kosten reduzieren soll. Trommer et al. [8, S. 36], Brown et al. [39, S. 143], Atkins [45, S. 9] und Fagnant und Kockelman [46, S. 8] nennen die Durchdringungsrate von AV als wichtigen Einfluss. Letztere schätzen, dass bei einer Erhöhung des Anteils von AV im Mischverkehr von 10 % auf 50 % die durch Unfallvermeidung entstehende Kosteneinsparung für Gesellschaft und Fahrzeugbesitzer fast verzehnfacht werden könnte und von 50 % auf 90 % nochmals verdoppelt werden könnte. Bei Annahme der erwähnten Erhöhungen der Durchdringungsrate prognostizieren sie für beide Fälle des Weiteren jeweils eine Verdopplung der Einsparungen in den Betriebskosten durch reduzierte Verkehrsstaus.

Für die Erhöhung der Durchdringungsrate in einem Szenario mit Mischverkehr muss eine Markteinführung viele Jahre zuvor stattgefunden haben, weil der Anstieg des Flottenanteils deutlich zeitverzögert einem Anstieg der Verkaufszahlen folgt [8, S. 49]. Atkins [45, S. 45] schlägt einen AV-Anteil von 50 % bis 70 % vor, um durch die Automatisierung der Fahraufgabe einen Vorteil im Verkehrsfluss zu erreichen. Krail et al. [37, S. 3] prognostizieren jedoch für das Jahr 2050 lediglich eine Durchdringungsrate von maximal 41 % von Level 4 und 5 Systemen, was demnach eine deutliche Limitierung der Potentiale zur Folge darstellt. Grund für die niedrige Durchdringungsrate ist deren Annahme, dass Kunden in niedrigpreisigen Fahrzeugsegmenten auch in Zukunft kaum Bereitschaft zeigen werden, einen Aufpreis für autonome Systeme zu bezahlen [37, S. 120]. Für die in Tabelle 2.3 gezeigten Potentiale wird in nur wenigen Quellen eine Angabe der Durchdringungsrate gemacht und wird deshalb im Folgenden nicht erwähnt.

Tabelle 2.3: Verbesserungs- und Risikopotentiale vom autonomen Fahren

| | Sicherheit | Kosten/Verbrauch | Verkehr | Komfort |
|--------------|---|---|--|---|
| Verbesserung |  |  |  |  |
| Risiko |  |  |  |  |

Legende:



Für die Abschätzung, in welchen der Bereiche (Sicherheit, Kosten/Verbrauch, Verkehr und Komfort) autonomes Fahren eine Verbesserung und in welchen ein Risiko darstellt, wurden Quellen gesucht, die dessen Einfluss ganzheitlich abschätzen. Die Anzahl der Nennungen in diesen Veröffentlichungen (Tabelle 2.3) gibt eine Übersicht, welche Trends in der Literatur prognostiziert werden. Die Teilbereiche werden im Folgenden im Detail erläutert.

Sicherheit

Im Bereich Sicherheit soll autonomes Fahren durch Vermeidung menschlicher Fehler eine Reduktion von Unfällen und damit eine Erhöhung der Verkehrssicherheit zur Folge haben [12, S. 16, 14, S. 4, 19, S. 7, 40, S. 42-43, 45, S. 10, 47, S. 72-73, 48, S. 240, 49, S. 364]. Falls ein autonomes System an Grenzen stößt oder ausfällt besteht die Gefahr, dass Fehler bei der dann benötigten Übernahme durch den Menschen passieren [6, S. 4]. Bei Level 4 und Level 5 Systemen ist dieses Risiko jedoch gering, weil die Systeme das Fahrzeug in einen Zustand mit minimalem Risiko bei der Übergabe überführen müssen [34, S. 22-23].

Weil bei neuartigen Sitzkonzepten die vorhandenen Rückhaltesysteme und deren Erprobung noch nicht ausreichend erforscht sind [43, S. 3, 50, S. 32] und Insassen ungünstige Haltungen einnehmen (Out-of-Position), kann das Verletzungsrisiko bei nicht verschuldeten Unfällen höher ausfallen [50, S. 33].

Kosten/Verbrauch

Der Energiebedarf und die damit verbundenen Kosten und Emissionen von AV können nach Krail [24, S. 17] in die Bereiche Fahrbetrieb, Nebenverbrauch, Mobilfunk und Backend bzw. Infrastruktur unterteilt werden. In der Literatur wird überwiegend der Fahrbetrieb und die dort möglichen Einsparungen betrachtet [4, S. 3, 37, S. 6, 40, S. 42-43, 46, S. 4, 47, S. 72-73]. Effizientere Fahrweisen können beispielsweise durch Platooning, Eco-Driving, oder als Folge reduzierter Verkehrsstaus erreicht werden [21, 5–8, 39, S. 140]. Die größte Verbesserung der Kosten und des Verbrauchs sehen Krail et al. [37, S. 52] in Kombination mit neuen Geschäftsmodellen wie Ridesharing, weil zusätzlich zur Einsparung pro Fahrzeug dessen Kosten auf mehrere Personen verteilt werden. Zuletzt können bei Taxis und anderen Fahrdiensten durch den Entfall eines bezahlten Fahrers weitere Kosten eingespart werden [3, S. 11, 8, S. 16, 14, S. 4].

Konträr dazu weisen Wadud et al. [21, S. 4], Lee und Kockelman [51, S. 5] und Gawron et al. [23, S. 3254] auf den erhöhten Nebenverbrauch durch Sensorik, Recheneinheiten und zusätzliche Angebote aus dem Bereich Infotainment hin. Die für den Betrieb von AV nötige Infrastruktur, insbesondere im Bereich Vernetzung und Cloud-Dienste, erhöht weiterhin den Energiebedarf. Krail et al. [24, S. 6] begründen die Erhöhung des Verbrauchs auf der einen Seite durch Leerfahrten, auf der anderen Seite durch erhöhten Stromverbrauch in der Infrastruktur [24, S. 3]. Gesellschaftlich betrachtet kann ein Abbau von Fahrerarbeitsplätzen zu erhöhten volkswirtschaftlichen Kosten führen [18, S. 16, 52, S. 63]. Weiterhin müssen trotz Entfall des Fahrers Kosten für die Reinigung des Innenraums aufgewendet werden [14, S. 10].

Verkehr

Vernetztes und autonomes Fahren soll Verkehrsstaus reduzieren [14, S. 4, 21, S. 2] und die Nutzung der Verkehrsfläche durch z.B. Platooning [45, S. 10] oder angepasstes Spurwechsel- und Einfädelverhalten [45, S. 17] verbessern. Diese Annahme ist erneut abhängig vom Nutzungsszenario. Vander Laan et al. [53, S. 51] zeigen das beispielhaft an einer ausschließlich für AV zugelassenen Fahrspur auf. Mit der abgetrennten Fahrspur, die zuvor von allen Verkehrsteilnehmern werden konnte, kann erst ein global besserer Verkehrsfluss erreicht werden, wenn mindestens 20% aller Fahrzeuge AV sind. Litman [14, S. 5] nennt ebenfalls eine abgetrennte Fahrspur als Voraussetzung für Verbesserungen hinsichtlich des Verkehrsflusses. Atkins [45, S.

45] prognostiziert ein deutlich höheres Optimierungspotential durch AV im dichten städtischen Straßenverkehr im Vergleich zu weniger dicht befahrenen, freien Streckenabschnitten, wo teilweise keine Verbesserung erreicht wird. Die noch wenig erforschte Interaktion zwischen AV und konventionellen Fahrzeugen kann nach Talebpour und Mahmassani [41, S. 145] zusätzliche negative Auswirkungen auf den Verkehrsfluss haben.

Krail et al. [37, S. 57] sagen aufgrund der niedrigen Durchdringungsraten bis 2050 zunächst eine Verschlechterung der Verkehrskapazität voraus. Grund dafür ist die Einhaltung von gesetzlichen Sicherheitsabständen durch AV im Gegensatz zu menschlichen Fahrern. Erst bei einer ausreichend hohen Durchdringungsrate und der Umsetzung von Maßnahmen wie Platooning zwischen AV soll eine Verbesserung auftreten. Im Mischverkehr können Leerfahrten wiederum zu vermehrten Staus führen [24, S. 6]. Weiterhin kann ein zunehmender Umstieg auf AV von anderen Verkehrsmitteln zu einem allgemeinen Anstieg des Verkehrsaufkommens führen und den positiven Effekten entgegen wirken [37, S. 65, 45, S. 10, 51, S. 3, 54, S. 384].

Komfort

Beim Komfort werden vor allem die freie Zeit und die Entlastung durch die Übernahme der Fahraufgabe als Komfortsteigerung bzw. Reduktion des Diskomforts wahrgenommen [12, S. 16, 16, S. 11, 20, S. 166, 40, S. 42-43]. Ein automatisierter Ladevorgang, der vom Fahrzeug übernommen wird, kann ebenfalls dazu beitragen [21, S. 11].

Für neuartige Sitzkonzepte wie das Vis-à-vis-Layout, bei denen die vordere Sitzreihe entgegen der Fahrtrichtung ausgerichtet ist, befürchten Autoren eine Zunahme von Reisekrankheiten. Salter et al. [55, S. 59] zeigen in einem Probandenversuch, dass rückwärtiges Sitzen schneller zum Unwohlsein führt. Nebentätigkeiten wie Lesen, die durch Wegfall der Fahraufgabe besonders attraktiv werden, führen in einer Studie von Jones et al. [56, S. 1366] bei Probanden ebenfalls schneller zu Reisekrankheit.

Quantitative Abschätzungen

Trotz der widersprüchlichen Potentiale (Tabelle 2.3) gibt es einige Autoren, die in einer quantitativen Abschätzung die Auswirkungen gegeneinander aufwiegen. Deren wichtigste Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst.

Krail [24] betrachtet AV als Teil eines Mobilitätssystems und schätzt neben der Erhöhung des Verbrauchs im Fahrzeug auch die Energie, die durch Vernetzung und Infrastruktur benötigt wird, ab. In der Studie werden zwei Szenarien betrachtet, in denen das Fahrzeug entweder minimal oder vielseitig mit seiner Umwelt vernetzt ist. In Abhängigkeit von diesen Szenarien reichen die Potentiale des autonomen Fahrens von einer Einsparung von 125 Wh/100km bis zu einem Mehrverbrauch von 2.532 Wh/100km im Jahr 2020. Ab dem Jahr 2040 soll für beide Szenarien eine Einsparung von 1.581 Wh/100km und 579 Wh/100km möglich sein.

Krail et al. [37] beschreiben in einer weiteren Arbeit, in welchem Umfang AV zur Reduktion der Treibhausgas (THG)-Emissionen und des Energieverbrauchs beitragen können. Das Einsparpotential ist abhängig von Fahrzeugklasse, Szenario und betrachtetem Jahr. Weiterhin wurden neben primären Effekten (z.B. Eco-Driving) auch sekundäre Effekte (z.B. veränderte Verkehrsmittelwahl) gezeigt, die je nach Szenario auch gegensätzliche Auswirkungen haben können. Dennoch werden Einsparungen bei den THG-Emissionen von 4,2% bis 6,1% im Jahr 2030 und

7,6 % bis 11,1 % im Jahr 2050 prognostiziert. Größtes Potential sehen die Autoren in der Automatisierung des Güterverkehrs.

Lee und Kockelman [51] sammeln in den Bereichen Nachfrage, Fahrweise, Flottenbetrieb und Antriebsstrang von AV Abschätzungen aus der Literatur und leiten daraus einen Gesamttrend ab. Trotz Erhöhung des Nebenverbrauchs prognostizieren sie eine Reduktion des Energiebedarfs von 11% bei AV mit konventionellem Antriebsstrang und bis zu 55% bei einer Elektrifizierung des Antriebsstrangs aller Fahrzeuge.

Wadud et al. [21] stellen mehrere Szenarien für die Entwicklung des autonomen Fahrens auf. Diese reichen von einem optimistischen Szenario, bei denen alle möglichen Potentiale realisiert werden können, bis zu einem dystopischen Szenario, bei dem alle Vorteile durch eine Zunahme des Verkehrs und fehlende Regulatorik zunichte gemacht werden. Entsprechend bewegt sich ihre Vorhersage zwischen einer optimistischen Reduktion des Energiebedarfs im Transportsektor um über 40% und einer pessimistischen Verdopplung des Energiebedarfs.

Besonders bei der letzten Arbeit wird deutlich, dass eine hohe Unsicherheit mit der Prädiktion der Auswirkungen durch autonomes Fahren einhergeht. In der vorliegenden Arbeit soll deshalb ein Beitrag zur Auflösung dieser Unsicherheit geleistet und die dafür nötigen Anforderungen an die Methodik abgeleitet werden (Kapitel 3.1.3).

2.1.4 Autonome und elektrische Fahrzeuge

In den vorherigen Kapiteln wurden mögliche Nutzungsszenarien und voraussichtliche Potentiale durch AV gezeigt. In diesem Abschnitt sollen Prognosen über die Veränderungen des Fahrzeugs durch autonomes Fahren gesammelt werden. Die wichtigsten Erkenntnisse fließen später in die Ableitung der Anforderungen an die Methodik in Kapitel 3.1 ein.

Ähnlich zur Elektrifizierung stellt die Automatisierung einen Technologiesprung in der Automobilindustrie dar. Bei solchen Veränderungen kann zwischen zwei Lösungen unterschieden werden [57, S. 4, 58, S. 140-141]:

- Conversion Design: Integration der neuen Technologie in ein bestehendes Fahrzeug (z.B. Volkswagen (VW) eGolf als BEV im Conversion Design)
- Purpose Design: Neuentwicklung unter Berücksichtigung der neuen Technologie (z.B. VW ID.3 als BEV im Purpose Design)

Während bei einem bestehenden Fahrzeug die Entwicklung eines Conversion Designs günstiger ist, hat ein mit Purpose Design entwickeltes Fahrzeug meist das bessere Package und bietet mehr Innenraum bei gleichen Außenabmessungen [58, S. 140-141]. Für die in Kapitel 2.1.1 definierten AV fehlte bis vor kurzem noch die rechtliche Grundlage für den Betrieb auf öffentlichen Straßen (Kapitel 3.1.1). AV konnten deshalb noch nicht in ihrer eigentlichen Funktion genutzt werden, für die Wissenschaft und Industrie gibt es aber zwei Möglichkeiten, mit der die Entwicklung und Präsentation dieser Fahrzeuge bereits heute möglich sind:

- AV im Conversion Design: Konventionelles, zugelassenes Fahrzeug mit Sensorik und Rechner eines AV
- AV im Purpose Design: Prototypen von AV zur Nutzung auf Messen und Testgeländen ohne Straßenzulassung oder Sonderzulassungen für die Erprobung

Lange waren nur AV im Conversion Design und Level 3 Betrieb mit einem menschlichen Fahrer als Rückfallebene auf öffentlichen Straßen nutzbar, jedoch nicht im Betrieb mit Level 4 bis 5 (Kapitel 3.1.1). Unternehmen wie Waymo und Uber, die vor allem die Automatisierungsfunktion entwickeln und das Fahrzeug als notwendige Hardware zukaufen, verwenden diese Möglichkeit, um Daten und Erfahrungen für die Entwicklung aktueller und zukünftiger Systeme zu sammeln. Automobilhersteller und Forschungseinrichtungen zeigen oft zusätzlich mit Prototypen und Showcars im Purpose Design wie ein mögliches Fahrzeug in Zukunft aussehen könnte und erforschen die potenzielle Nutzung und Akzeptanz solcher Fahrzeuge. Anhang A (Tabelle A.1) zeigt eine Liste von möglichen AV im Conversion Design und Purpose Design.

Eine Sonderform von Purpose Design AV sind Fahrzeuge, die dynamisch konfigurierbar sind. Münster [59] beschreibt mehrere Ansätze aus der Literatur mit Wechselpattformen und einen eigenen Ansatz. Bei dieser Art der Fahrzeugteilung kann eine Fahrplattform, die Antrieb und Sensorik enthält, unterschiedliche Aufbauten, wie beispielsweise eine Passagierkabine oder ein Transportmodul, tragen. Raulf et al. [60] beschreiben ein weiteres Konzept, bei dem dynamisch konfigurierbare AV untersucht werden. Sie nennen vor allem Vorteile hinsichtlich einer effizienteren Nutzung der Fahrzeugflotten, weil diese für mehrere Transportaufgaben verwendet werden können. Diese Ansätze sind jedoch wenig erprobt und haben auch mehrere Nachteile: Sie haben mehr Probleme im Bereich Masse und Zuladung [61, S. 30] und eine hohe Platzierung der Sensorik ist durch niedrige Fahrplattformen nicht möglich. Weil es noch keine dynamisch konfigurierbare, konventionelle Serienfahrzeuge gibt, existieren keine technischen Daten, die als Grundlage für die spätere Modellierung verwendet werden können. Aus diesen Gründen werden sie in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Die Literatur beschreibt zahlreiche Veränderungen der Fahrzeugkomponenten eines AV gegenüber konventionellen Fahrzeugen. Die Fahrzeugkomponenten werden im Folgenden in ähnliche Baugruppen eingeteilt, wie auch bei andere Autoren [31, 57, 62]: Interieur, Karosserie, Antriebsstrang, Fahrwerk, Komponenten für die Automatisierung und Nebenverbraucher. Die meisten Veränderungen beziehen sich auf AV im Purpose Design, ohne dass eine konkrete Unterscheidung zu AV im Conversion Design genannt wird. Daher findet keine Unterscheidung zwischen den Designarten statt. Die möglichen Veränderungen des Fahrzeugs werden gesammelt für jede Baugruppe aufgeführt.

Interieur

Der Innenraum hat wegen seiner starken Wechselwirkung mit den Außenabmessungen eine bedeutende Rolle für das Gesamtfahrzeug [28, S. 679]. Der Einstieg bildet dabei eine Schnittstellenfunktion zwischen Interieur und Exterieur und kann oft widersprüchliche Anforderungen in beiden Bereichen zur Folge haben [63, S. 162]. Für die Platzierung von neun Insassen über drei Reihen in einem Fahrzeug mit Fahrer entstehen theoretisch 258 Kombinationsmöglichkeiten, wie die Sitze angeordnet werden können [64, S. 24]. Nur wenige von diesen Topologien wurden bisher in Fahrzeugen genutzt, weil bei konventionellen Fahrzeugen der Beifahrersitz aufgrund der symmetrischen Konstruktion oft nur ein Fahrersitz ohne Pedaliere und Lenkrad ist [64, S. 32]. Bei AV können hingegen mehr Kombinationen verwendet werden, weil ohne Fahrerarbeitsplatz die Loslösung von ergonomischen Restriktionen neue Freiheiten im Innenraum ermöglicht [42, S. 63, 43, S. 1, 65, S. 18].

Für fahrerlose AV werden in aktuellen Prototypen überwiegend vier Sitzkonfigurationen und Kombinationen daraus verwendet (Tabelle 2.4). Nach Grünen [64, S. 30] kann jede dieser Konfiguration zu unterschiedlichen Schwerpunkten in der Entwicklung führen. Bei der

konventionellen Sitzanordnung ist die Gestaltung der vorderen Sitzlehnen für die hintere Sitzreihe wichtig, während bei einer Vis-à-vis Anordnung die Auslegung des gemeinsamen Fußraums von großer Bedeutung ist. Vereinzelt Fahrzeuge verfügen über verschiedene Sitzpositionen innerhalb des Fahrzeugs und erlauben damit mehrere Konfigurationen. So lassen sich die Vordersitze bei dem Mercedes F015 in oder entgegen der Fahrtrichtung ausrichten und im Renault EZ-GO befinden sich neben einer in Fahrtrichtung orientierten Sitzbank noch zwei seitlich angeordnete, gegenüberliegende Bänke. Eine solche Variabilität in der Sitzposition führt zu einem Bedarf an Bauraum [66, S. 43] und neuen Gurtsystemen mit erhöhter Festigkeit in der Sitzstruktur, weil Kräfte aus allen Richtungen aufgenommen werden müssen [50, S. 31].

Tabelle 2.4: Sitzkonfigurationen von verschiedenen autonomen Konzeptfahrzeugen [67]

| Mercedes F015 | | Renault EZ-GO | |
|---------------|-----------------------|--------------------|--|
| Audi Aicon | VW Sedric | Google-Car | |
| VW ID.VIZZION | Volvo 360c | Rolls-Royce 103 EX | |
| | autoTAXI (UNICARagil) | Smart Vision EQ | |

Unkonventionelle Sitzpositionen benötigen eine Anpassung der passiven Sicherheitssysteme [48, S. 243]. Golowko et al. [50, S. 32] identifizieren deshalb einen Bedarf an zusätzlicher Sensorik für den Innenraum. Diese soll Positionen von Insassen erkennen und im Falle eines Unfalls die Auslöseentscheidung der passiven Sicherheitssysteme unterstützen. Moon et al. [68, S. 168] beschreiben erste Ansätze, wie die Kräfte für einen rückwärtig sitzenden Insassen bei einem Frontalcrash reduziert werden können. Eine seitliche Anordnung der Sitze erfordert ebenfalls veränderte Gurtsysteme, weil ein erhöhtes Verletzungsrisiko besteht [69, S. 103].

Ein weiteres Problem von unkonventionellen Sitzpositionen ist das Auftreten von Reisekrankheit. In AV sollte deshalb eine Erkennung von Anzeichen einer Reisekrankheit bei Passagieren über Innenraumsensoren stattfinden [70, S. 366], um dann entsprechende Gegenmaßnahmen in der Fahrweise einzuleiten [71, S. 2]. Weil in Zügen rückwärtiges Sitzen seit vielen Jahren Anwendung findet, ist davon auszugehen, dass bei geringen Quer- und Längsbeschleunigungen eines AV auf z.B. Langstrecke auch hier eine Akzeptanz aufgebaut werden könnte [55, S. 60]. Nebenaufgaben können Reisekrankheiten weiter verstärken, weshalb auch hier mit niedrigeren Beschleunigungen entgegen gewirkt werden sollte [56, S. 1366].

Neben neuen Sitztopologien unterscheiden sich AV auch durch andere Sitzhaltungen. Während bei einem Fahrersitz das Erledigen der Fahraufgabe wichtig ist, kann bei einem AV die Nutzung der Zeit für Nebenaufgaben im Vordergrund stehen [35, S. 283]. Dadurch sind aufrechtere Haltungen ähnlich wie in Zügen oder Bussen wahrscheinlicher [64, S. 31]. Bei neuen Nutzungsfällen, bei denen ein Fahrzeug geteilt wird, sollte weiterhin darauf geachtet werden, dass ein Passagier das Fahrzeug verlassen kann, ohne Andere dafür zum Aufstehen zu zwingen [42, S. 62].

Karosserie

Im Folgenden sollen zuerst die Veränderungen der Karosserie von BEV im Vergleich zu ICEV erläutert und anschließend die zusätzlichen Anpassungen bei AV ergänzt werden. Tomforde [72, S. 7] beschreibt die Karosserie aktuell in ihrer vierten Revolution, in der vor allem Leichtbau-

Plattformen und variable Innenraum-Architekturen eine zentrale Rolle spielen. Er beschreibt analog zu Tzivanopoulos et al. [28, S. 679], dass vor allem neuartige Innenräume einen Einfluss auf die Gestaltung der Karosserie haben.

Neben dem Innenraum haben die Anordnung der Fahrzeugkomponenten [73, S. 159] und besonders der Antriebsstrang einen starken Einfluss auf die Karosserie [74, S. 79]. So besitzen BEV oft einen kürzeren Überhang und einen erhöhten Radstand, weil die Batterie Platz zwischen den Rädern benötigt und ein großer Verbrennungsmotor im Vorderwagen entfällt [75, S. 581]. Bei BEV ist die Batterie neben den Insassen weiterhin besonders schützenswert, um eine folgenschwere Beschädigung im Crashfall zu vermeiden. Deswegen werden bei der Elektrifizierung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEV) insbesondere die Karosseriebereiche rund um die Batterie verstärkt [76, S. 38]. Haberkorn et al. [77] und Beeh und Friedrich [74, S. 79] beschreiben die nötige Veränderung des Vorderwagens von BEV durch den Entfall des blockbildenden Verbrennungsmotors und die zunehmende Gesamtfahrzeugmasse. Die Folgen sind auf der einen Seite eine mögliche Verkürzung des Vorderwagens durch die gewonnene freie Crashlänge, auf der anderen Seite eine nötige Neuauslegung der Lastpfade durch die schwere Batterie im Unterboden.

Ähnlich zu BEV soll der Radstand von AV ebenfalls wachsen und die Fahrzeuge durch neue, größere Innenräume insgesamt höher werden [66, S. 43]. Wenn AV im Mischverkehr (Kapitel 2.1.2) eingesetzt werden, muss das Fahrzeug gesetzliche Crashtests bestehen [78, S. 44]. In diesem Fall gelten die gleichen genannten Veränderungen in der passiven Sicherheit wie für konventionelle BEV [35, S. 273]. Eine wichtige Voraussetzung ist ein ausreichender Deformationsraum, damit die Energie abgebaut werden kann [78, S. 46]. Falls AV Unfälle zukünftig nicht mehr selbst verursachen, aber noch von Fahrzeugen mit menschlichen Fahrern getroffen werden, prognostiziert Unselt et al. [48, S. 239] eine Verschiebung der Unfallhäufigkeit auf Unfalltypen mit seitlicher Kollision. Eine Verlagerung des Schwerpunktes auf die Auslegung für Seitencrashes könnte eine daraus resultierende Folge sein [48, S. 241].

Die Form der Karosserie wird bisher vor allem durch Anforderungen vom Design bestimmt [79, S. 1]. Bei AV könnte je nach Besitzverhältnis die Raumnutzung im Vordergrund stehen und ein One-Box-Design gewählt werden [35, S. 273]. Bei diesem Design, nach dem auch Busse gestaltet sind, wird auf lange Hauben im Vorder- und Hinterwagen verzichtet. Steigende Anforderungen an den Einstiegscomfort können weiterhin die seitliche Öffnung der Karosserie beeinflussen. Bubb nennt als Einflussfaktoren die A- und B-Säule, sowie die Lage und Höhe des Schwellers [80, S. 356], weshalb auch bei zahlreichen autonomen Konzeptfahrzeugen beispielsweise keine B-Säule vorgesehen wird.

Antriebsstrang

Die Auslegung eines konventionellen Antriebsstrangs ist von den Anforderungen durch Ökonomie bzw. Ökologie und Längsdynamik geprägt. Die wichtigsten Kriterien für einen Motor sind Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen, Leistung bei hohen Geschwindigkeiten, Wirkungsgrad, Kosten und benötigter Packageraum [81, S. 42]. Für Beschleunigungsvorgänge und das unterschiedliche Fahrverhalten wechselnder menschlicher Fahrer muss ein Motor eines herkömmlichen Fahrzeugs über ausreichend Leistungsreserven verfügen. Brown et al. [39, S. 145] sehen hier einen Vorteil bei computergesteuerten AV ohne menschlichen Fahrer, weil deren Antrieb präziser auf die Anforderung ausgelegt werden kann.

Wie in Kapitel 2.1.1 begründet werden in dieser Arbeit nur batterieelektrische AV betrachtet. Diese stehen vor ähnlichen Herausforderungen wie BEV: die sichere Unterbringung aller Hochvoltkomponenten [78, S. 43], Massesteigerungen [74, S. 79] und Veränderungen im Package [75, S. 581]. Während die Leistungsdichte bei einer elektrischen Maschine deutlich höher ist als bei ICEV [82, S. 10], stellt die Platzierung der Batterie Ingenieure vor Herausforderungen, weil vielfältige Anforderungen aus der Crashesicherheit, dem Thermomanagement und dem Packaging erfüllt werden müssen [82, S. 7]. Ein weiteres Problem der Traktionsbatterie ist neben dem großen Volumen vor allem ihre hohe Masse. Neue Technologien wie Solid State, bei denen statt flüssigem Elektrolyt festes verwendet wird, sollen Abhilfe schaffen [9, S. 327]. Während die gravimetrische Dichte bei dieser Technologie eine weitere Steigerung erfahren soll, ist die volumetrische Dichte aber kaum betroffen [9, S. 328]. Demnach wird die Platzierung der großvolumigen Batterie in naher Zukunft weiterhin ein Problem von BEV bleiben.

Für die Auslegung des Energiespeichers von BEV wird der elektrische Verbrauch benötigt. Dieser wird durch das Abfahren standardisierter Fahrzyklen wie der Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure (WLTP) ermittelt [83, S. 34]. Wadud et al. [21, S. 12] zeigen für AV den Bedarf an neuen Fahrzyklen auf, weil aktuelle Zyklen für AV keine gute Vergleichsbasis darstellen. Grund dafür sind Methoden wie Eco-Driving [46, S. 4], die dazu führen, dass ein AV im Realbetrieb ein optimiertes Geschwindigkeitsprofil statt dem originalen Zyklusverlauf abfahren würde. Weiterhin hat die Wahl des Fahrzyklus einen großen Einfluss auf die Reichweite [84, S. 15] und sollte deshalb bei der Auslegung möglichst anwendungsnah gestaltet werden [85].

Fahrwerk

Die Anforderungen an die Fahrdynamik und damit das Fahrwerk wird sich nach Wimmer und Wachenfeld [35, S. 275] bei AV kaum ändern. Sie prognostizieren ähnliche Anforderungen an die Verzögerungs- und Ausweichfähigkeit, auch wenn durch eine bessere Manöverplanung des Computers die gegebene Fahrdynamik optimaler ausgenutzt werden kann. Der Einfluss auf die Reisekrankheit muss analog zum Sitzlayout auch im Fahrwerk beachtet werden. Gegenläufig zum Komfortempfinden kann ein härteres Fahrwerk bei Passagieren weniger schnell zu einer Reisekrankheit führen [80, S. 497].

Neue Ansätze in der Lenkung, wie eine radindividuelle Verstellbarkeit, bewerten Winner und Wachenfeld [35, S. 279] nur für AV auf Rennstrecken als sinnvoll, weil dort eine leichte Verbesserung der Fahrdynamik erreicht werden kann. Für normale AV bewerten sie den Aufwand zu hoch. Steer-by-Wire bietet durch den Entfall der mechanischen Kopplung wiederum Packagevorteile [28, S. 673]. Für diesen Fall muss aber auf eine fehlertolerante und redundante Auslegung geachtet werden [86, S. 457].

Komponenten für die Automatisierung

Aktuelle Fahrerassistenzsysteme sind die Basis für das automatisierte Fahren [11, S. 19]. Für den automatisierten Betrieb werden nach Jo et al. [87, S. 7132] die Funktionen Wahrnehmung, Lokalisierung, Planung, Regelung und Systemmanagement benötigt. AV benötigen zur Erfüllung dieser Funktionen zusätzliche oder eine erhöhte Anzahl an bestehenden Komponenten. Verschiedene Sensoren dienen der Wahrnehmung, Kommunikationsmodule ermöglichen den Zugang zu Cloud-Diensten und helfen bei der Lokalisierung, Recheneinheiten verarbeiten die Daten und planen die Bewegungen des Fahrzeugs [11, S. 32]. Im Gegensatz zur Software, die nachträglich über Updates noch verbessert werden kann [11, S. 33], sollte die Hardware bereits

bei Auslieferung festgelegt werden. Ein optimales Sensorsetup gibt es allerdings noch nicht. Hersteller und Forscher verwenden meist voneinander abweichende Konfigurationen [16, S. 13, 88, S. 57].

Sensoren, GPS und Trägheitsnavigationssysteme (INS) erfüllen bei AV die zwei Aufgaben Wahrnehmung der Umgebung und Lokalisierung. Für die Wahrnehmung werden überwiegend LiDAR-, RADAR-, Ultraschall- und Kamerasensoren eingesetzt. [89, S. 117] LiDAR wird aufgrund des hohen Preises noch selten verwendet. Durch eine höhere Marktdurchdringung [16, S. 17] und die Verwendung von Solid-State LiDAR ohne mechanisch drehende Teile sinken aber die Kosten [90, S. 31].

In Tabelle 2.5 sind aktuelle Sensorkonfigurationen von Forschungs- oder Konzeptfahrzeugen aufgelistet. Während die Anzahl an RADAR-Sensoren bei den meisten Fahrzeugen in einem ähnlichen Bereich ist, zeigt sich besonders bei LiDAR- und Kamera-Sensoren eine hohe Varianz. Weil viele dieser Fahrzeuge noch für die Erprobung genutzt werden und damit voraussichtlich mehr Sensorik als nötig tragen, wird sich erst mit beginnender Serienfertigung von AV zeigen, was die notwendige Mindestausstattung ist. Weiterhin gibt es innerhalb eines Sensortyps deutlich unterschiedliche Ausführungen, die meist nicht angegeben sind. Krail [24, S. 19] leitet für jedes Automatisierungs-Level ebenfalls eine Anzahl an Sensoren her, hat aber besonders bei den LiDAR-Sensoren eine deutlich niedrigere Anzahl als die meisten unten stehenden Fahrzeuge angegeben.

Tabelle 2.5: Anzahl der Sensoren für verschiedene Konzept- und Prototypenfahrzeuge

| Fahrzeug | LiDAR | RADAR | Kamera |
|--|-------|-------|--------|
| Apple – Lexus RX450h [91] ¹ | 14 | 8 | 7 |
| Aurora Driver [92] | 7 | 5 | 8 |
| Bertrandt HARRI [1] | 5 | - | 12 |
| Uber – Volvo XC90 [93] | 1 | 10 | 7 |
| UNICARagil autoTAXI [94] | 4 | 10 | 16 |
| VW Sedic [95] ² | 11 | 7 | 14 |
| Waymo Driver [96] | 5 | 6 | 29 |
| Yandex – Toyota Prius [97] | 3 | 8 | 5 |
| Zoox [98] | 8 | 10 | 14 |

¹ Auf Basis von Fotos ermittelt

² Gleiches Setup für Erprobung auf VW eGolf wie bei VW Sedic

Obwohl in heutigen Fahrerassistenzsystemen bereits Sensorik und Rechner verbaut sind, muss deren Systemarchitektur für AV angepasst werden. Becker et al. [44, S. 56] beschreiben eine Veränderung von einer Fail-Safe-Architektur zu einer Fail-Operational-Architektur. Während bei der Ersten der Fahrer als Rückfallebene dient, müssen bei einem AV im Fehlerfall Grundfunktionen weiterhin von der Recheneinheit übernommen werden. Eine solche Anforderung kann mit erhöhter Rechenleistung und Redundanz der Komponenten erreicht werden. Proff et al. [3, S. 31] beschreiben zudem einen Trend zu zentralen Recheneinheiten anstatt einer Vielzahl an Steuergeräten.

Die zunehmende Anzahl an Sensorik und höhere Anforderungen an die Recheneinheiten führen zu einem steigenden Strombedarf im Fahrzeug [24, S. 5]. In der Rolle als Nebenverbraucher soll das autonome System deshalb gemeinsam mit der Klimatisierung im nächsten Abschnitt betrachtet werden.

Nebenverbraucher

Nebenverbraucher beeinflussen bei der aktuellen Fahrzeugauslegung nur in einem geringen Maße die Antriebsstrang- und die Energiespeicherdimensionierung und wurden deshalb bisher nicht als separate Baugruppe betrachtet. Während im NEFZ Komponenten wie Klimaanlage und Heizung unberücksichtigt blieben, wird im WLTP nur deren zusätzliche Masse miteinbezogen. Diese in der UNECE R154 genannten „Hilfseinrichtungen“ sind aber weiterhin während der Messung auszuschalten, außer sie müssen wegen Rechtsvorschriften betrieben werden [99, S. 359]. Damit gehen sie sowohl in die Verbrauchs- als auch Reichweitenbestimmung im WLTP nur indirekt über ihre zusätzliche Masse ein. In der Europäischen Union werden Nebenverbraucher nur über „Eco-Innovationen“ indirekt über ein separates Testverfahren berücksichtigt [100, S. 1]. Diese beschränken sich aber aktuell hauptsächlich auf Lichtmaschinen, Scheinwerfertechnik und Solardächer [100, S. 5]. Weil ab 2025 jedoch auch Klimaanlagen zu diesen CO₂-reduzierenden Maßnahmen gezählt werden [100, S. 8], sollte zukünftig auch deren Verbrauch betrachtet werden.

Grube und Stolten [84, S. 17] zeigen, dass elektrische Fahrzeuge besonders empfindlich gegenüber dem Einfluss von Nebenverbrauchern sind. Vor allem Fahrten mit niedrigen Geschwindigkeiten wie z.B. im urbanen Umfeld führen zu einem anteilig hohen Nebenverbrauch [101], weil die Nebenverbraucher nahezu unabhängig von der zurückgelegten Strecke, jedoch abhängig von der Betriebszeit Energie benötigen. Bei Fahrzyklen mit hohen Geschwindigkeiten nimmt der anteilige Nebenverbrauch pro Kilometer wiederum ab [84, S. 15].

Durch Sensorik und Rechner kann die Reduktion der elektrischen Reichweite zwischen 12 % und 25 % betragen [102, S. 9]. Dieser Anteil hängt aber stark von der gewählten Konfiguration des autonomen Systems ab, was wie oben genannt teilweise unterschiedlich ausfällt. Im Folgenden soll vor allem die Klimatisierung, auch Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) genannt, als größter Nebenverbraucher betrachtet werden. Insbesondere bei Stadtfahrten kann bei elektrischen Fahrzeugen der Verbrauchsanteil des HVAC-Systems in der gleichen Größenordnung wie der des Antriebsstrangs liegen [83, S. 85]. Bei aktuellen BEV kann durch den erhöhten Verbrauch beim Kühlen die Reichweite um bis zu 20 %, beim Heizen um bis zu 40 % absinken [103, S. 19].

Der Kühlmittelverdichter, der im Kühlbetrieb der Klimaanlage am meisten Energie benötigt, kann eine Leistung von bis zu 5 kW [83, S. 85, 103, S. 19] benötigen. Die Heizung des Fahrzeugs kann bei niedrigen Temperaturen zu einem Heizbedarf von 4,5 kW bis 7 kW [83, S. 85, 103, S. 19, 104, S. 397] führen, weil Konvektion, thermische Strahlung und Abluft über die Fahrzeugentlüftung zu Verlusten führt [104, S. 397]. Obwohl nach Haug [105, S. 8] und Seeck et al. [83, S. 87] eine Reduktion dieser Leistung durch die Verwendung des Kältemittelverdichters als Wärmepumpe möglich ist, kann diese Maßnahme nur eingeschränkt umgesetzt werden, weil zu niedrige Temperaturen zur Vereisung und resultierenden Funktionsstörungen führen [104, S. 398]. Myaji [106] beschreibt eine Möglichkeit, bereits erwärmte Innenraumluft über die Entlüftungsklappen erneut für den Wärmepumpenkreislauf zu nutzen und weitere 0,77 kW bis 1,43 kW einzusparen. Dies gilt allerdings nur für Fahrzeuge mit zweitem Verdampfer wie es bei großen Limousinen der Fall ist. Zukünftige, intelligente Lösungen unter Verwendung von Technologien wie Flächenheizungen sollen vor allem bei Teilbesetzung des Fahrzeugs bis zu 50 %, bei Vollbesetzung bis zu 25 % einsparen [103, S. 19-20].

Zusammenfassend hat sich in diesem Kapitel gezeigt, dass autonomes Fahren in fast jeder Baugruppe zu einer Veränderung führen kann. Solche Veränderungen müssen im Entwicklungsprozess frühzeitig berücksichtigt werden, um teure und späte Anpassungen zu vermeiden. Die

FKE im nächsten Kapitel bietet eine gute Möglichkeit, frühzeitig die wichtigsten Parameter des Fahrzeugs festzulegen und eine Basis für die weitere Entwicklung zu schaffen.

2.2 Fahrzeugkonzeptentwicklung

Der Fahrzeugkonzeptentwicklungsprozess (FKEP) hat zum Ziel, ein bestmöglichstes Gesamtfahrzeug zu erreichen [57, S. 10]. Während der FKEP lange auf ICEV ausgelegt war, wurde bereits durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs eine Anpassung des Prozesses benötigt [57, S. 3]. Durch die Veränderungen, die mit AV und neuen Geschäftsmodellen einhergehen, muss der FKEP erneut angepasst werden [26, S. 541]. Schockenhoff behandelt diese Veränderungen in seiner Dissertation [32] und Vorveröffentlichungen [107, 108], weshalb im Folgenden nur kurz darauf eingegangen wird.

2.2.1 Begriffsdefinition und Einordnung

Der FKEP ist Teil des Produktentstehungsprozesses (PEP), der die Entwicklung eines Fahrzeugs von der Forschung bis zur Serienbetreuung beschreibt [109, S. 51, 110, S. 1272] und mit dem Ende der Produktion (EOP) abgeschlossen wird (Abbildung 2.1). Es gibt dafür zahlreiche herstellerabhängige Prozessbeschreibungen, die alle ähnlich aufgebaut sind. Macey [111, S. 23] nennt statt der Produktentstehung in Abbildung 2.1 eine Produktionsauslegung und -planung, die aber den gleichen Inhalt beschreibt und mit dem Start der Produktion (SOP) endet. Rossbacher bezeichnet die erste Phase der Produktdefinition (Abbildung 2.1) als Definitionsphase [25, S. 18].

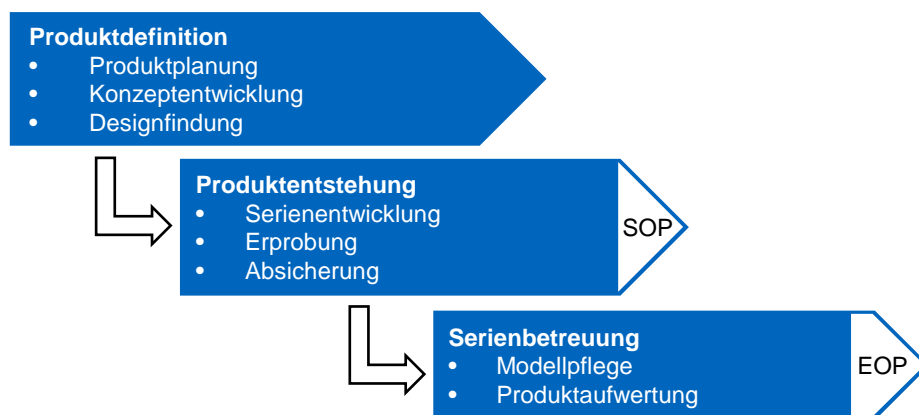


Abbildung 2.1: Produktentstehungsprozess (PEP) nach Widmann et al. [110, S. 1272]

Der FKEP wird als Teil der Konzeptentwicklung in der frühen Phase des PEP durchlaufen. Das FK, das Ergebnis dieser Phase ist, ist nach Wolff et al. [73, S. 134] als ein realisierbarer, konstruktiver Entwurf einer Produktidee definiert. Nach Prinz [109, S. 55] ist ein Konzept, das der Serienentwicklung dienen soll, von Forschungskonzepten zu unterscheiden. Während ein Serienkonzept bereits Aspekte der späteren Produktion beinhaltet, dient ein Forschungskonzept nur der Überprüfung einer allgemeinen Realisierbarkeit. Wolff et al. [73, S. 134] nennen für das Konzept nur wenige, wesentliche Eigenschaften, die es beschreiben. Beispiele dafür sind die Aufbauausprägung, die Anzahl der Sitzplätze und der Raumbedarf im Interieur, der Stauraum und Volumina für Energiespeicher, die Hauptabmessungen und das Motor- und Antriebskonzept.

Für den FKEP gibt es ähnlich wie beim PEP unterschiedliche Ansätze, wie die von Rossbacher [25, S. 17] und Macey [111, S. 22]. In dieser Arbeit wird der FKEP nach Nicoletti et. al [112] verwendet (Abbildung 2.2). Dieser beginnt mit der Formulierung von Anforderungen an das Fahrzeugkonzept. Falls bereits ähnliche Fahrzeuge existieren, können diese zum Vergleich hinzugezogen werden [113, S. 3688]. Im nächsten Schritt müssen die technischen Eigenschaften in Form von Auswahl und Dimensionierung der Komponenten festgelegt werden. Kuchenbuch spricht in dieser Reihenfolge von einem eigenschaftsorientiertem Schema [29, S. 12], das zu einer größeren Lösungsneutralität führt, weil gleiche Eigenschaften mit verschiedenen technischen Lösungen erreicht werden können. Durch die Positionierung aller Komponenten wird im nächsten Schritt das Fahrzeugkonzept mit einem Grobpackage definiert. Die Packageerstellung und die Fahrzeugkonzeptionierung sind folglich untrennbar miteinander verbundene Entwicklungsschritte im PEP [73, S. 134]. Der verwendete Konzeptentwicklungsprozess kann neben dem Gesamtfahrzeug auch auf einzelne Baugruppen angewandt werden und wurde von König et al. [114] beispielhaft auf die Entwicklung eines automatischen Türsystems übertragen.

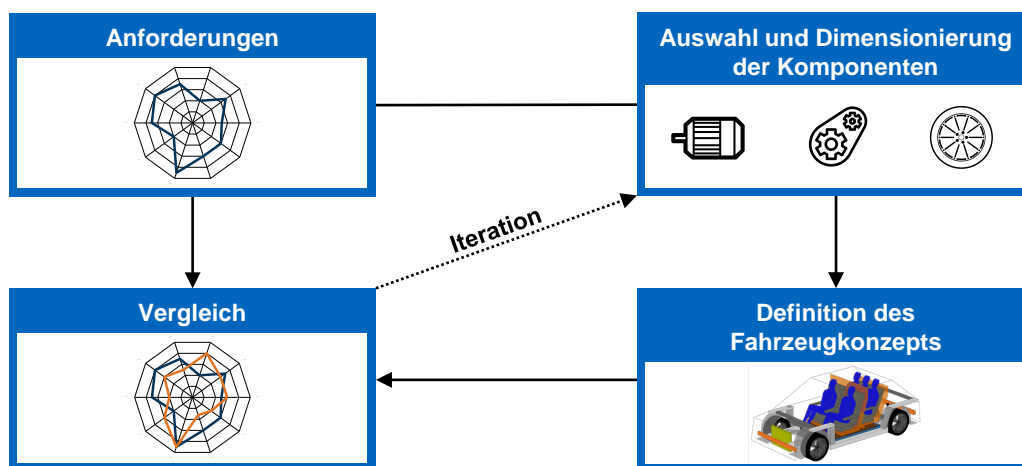


Abbildung 2.2: Fahrzeugkonzeptentwicklungsprozess nach [112]

Der FKEP ist ein iterativer Prozess und muss mehrfach durchlaufen werden, damit die geforderten Eigenschaften möglichst gut erreicht werden. Weil diese Iterationsschleifen zeitaufwändig sind, gibt es in der Literatur bereits zahlreiche Ansätze zur computergestützten Konzeptoptimierung. Bei diesem Vorgehen werden die Auslegungsschritte in geringer Zeit automatisiert durchlaufen, bis ein ausreichend gutes Ergebnis erzielt wird. Diese Arbeiten werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

2.2.2 Methoden zur Konzeptauslegung und -optimierung

Eine Konzeptoptimierung von technischen Produkten in der frühen Entwicklungsphase hat sich in einigen Bereichen seit vielen Jahren bewährt. Dadurch soll die Entwicklungszeit mit Optimierungsalgorithmen verkürzt werden [57, S. 13], um mit den immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen mithalten zu können. Weiterhin soll dadurch der größer werdende Lösungsraum, der durch immer innovativere Fahrzeugkonzepte aufgespannt wird, besser beherrscht werden [65, S. 17]. Kostspielige Änderungen im späteren Prozess, die durch die zahlreichen Abhängigkeiten im Gesamtsystem Anpassungen anderer Komponenten zur Folge haben [115, S. 1], können vermieden werden. Bei neuen Technologien kann auf diese Weise die stetig steigende Entwicklungskomplexität besser beherrscht werden [57, S. 20-21].

Im Bereich der Fahrzeugkonzeptauslegung und -optimierung gibt es bereits zahlreiche Arbeiten. Ein Überblick darüber ist in Tabelle 2.6 gegeben mit einer anschließenden Beschreibung aller aufgeführten Arbeiten. Obwohl es noch weitere Arbeiten in diesem Themengebiet gibt, werden im Folgenden diejenigen betrachtet, die in den relevanten Kategorien in Tabelle 2.6 und im Bereich der FK-Optimierung einen Neuigkeitswert liefern.

Tabelle 2.6: Methoden zur Konzeptauslegung und -optimierung

| Autor (Jahr) | Antriebsstrang | Freiheitsgrad Innenraum | Automatische Optimierung | Nebenverbraucher* | Sekundäre Effekte** | Open Source |
|----------------------------|----------------|-------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|-------------|
| Prinz (2010) | ICEV, HEV | | | | | Nein |
| Kuchenbuch (2012) | BEV | | | | | Nein |
| Tzivanopoulos (2014, 2015) | BEV | | | – | – | Nein |
| Matz (2015) | BEV | | | | | Nein |
| Münster (2016) | BEV | | | – | – | Nein |
| Felgenhauer (2019) | ICEV, HEV, BEV | | | | | Nein |
| Rosbacher (2020) | ICEV, HEV, BEV | | | | | Nein |
| Nicoletti (2022) | BEV | | | | | Teilmodelle |
| Zielsetzung dieser Arbeit | BEV | | | | | Ja |

*HVAC, Sensorik und Rechner **Masse- und Volumeneffekte

| | | | |
|--|------------------------------------|---|-----------------------|
| | Nicht betrachtet | | Großteils umgesetzt |
| | Umsetzung möglich, nicht vorhanden | | Vollständig umgesetzt |
| | Teilweise umgesetzt | – | Unbekannt |

Die Tabelle enthält Informationen über den Autor und das Jahr von einzelnen oder mehreren Veröffentlichungen. Der Freiheitsgrad im Innenraum beschreibt die Variationsmöglichkeiten bei der Platzierung der Insassen für die jeweilige Methode. Die nächsten drei Spalten geben Aufschluss darüber, ob und in welchem Maß eine automatische Optimierung, die Modellierung von Nebenverbrauchern und die Betrachtung von volumetrischen und gravimetrischen Sekundäreffekten (Kapitel 3.2.5) umgesetzt wurde. Zuletzt wird angegeben, ob die in der jeweiligen Arbeit implementierte Methode als Open-Source-Software zur Verfügung steht.

Prinz [109] leitet in seiner Dissertation eine Methode zur parametrischen Entwicklung von neuartigen Fahrzeugkonzepten ab. Er analysiert bestehende Vorgehensweisen und Programme und kritisiert, dass diese meist nur Variationen bekannter Fahrzeuge untersuchen und keine innovativen Konzepte ermöglichen. Er legt daher seinen Fokus auf FK, bei denen keine Vorgängerfahrzeuge existieren und baut ein allgemeines Fahrzeugmodell, sowie dessen enthaltene Module und deren Beziehungen untereinander, auf. Nebenverbraucher werden als Parameter erwähnt, aber nur im Zuge der Einschränkung der maximal abrufbaren Antriebsleistung betrachtet. Die Konzepte werden nicht automatisch optimiert, sondern müssen durch Analyse der Wechselwirkungen vom Nutzer schrittweise ermittelt werden. Sekundäreffekte können daher nur

betrachtet werden, wenn der Nutzer mehrfach die Methodik anwendet. Anforderungen an eine Software, mit der die Methodik nutzbar umgesetzt werden kann, sind am Ende der Arbeit beschrieben, eine Umsetzung findet jedoch nicht statt.

Kuchenbuch [29] baut auf der Methodik von Prinz auf und passt sie in seiner Dissertation für die Elektromobilität an, um deren Potentiale bereits frühzeitig im Fahrzeugkonzept abschätzen zu können. Er löst sich dabei von bestehenden Klasseneinteilungen anhand der Karosserieform, um möglichst lösungsoffen zu entwickeln. Vorhandene Methoden bewertet Kuchenbuch hinsichtlich ihrer Lösungsneutralität, Schnelligkeit und Anwendungsnähe als nicht ausreichend und leitet einen genetischen Algorithmus als geeignete Wahl zur Optimierung von Gesamtfahrzeugen her. Die nötigen, rein formelbasierten Berechnungen werden in Excel durchgeführt, CATIA wird zur finalen Visualisierung genutzt. Auf eine kennfeldbasierte Verbrauchsberechnung wird verzichtet, weil die Berechnung in Excel eine zu hohe Durchlaufzeit hat. Der stattdessen verwendete, empirische Zusammenhang aus Masse und Verbrauch setzt voraus, dass der Verbrauch von bereits existierenden Fahrzeugen in dem festgelegten Fahrzyklus vermessen wurden. Nebenverbraucher werden angesprochen, jedoch nicht beziffert.

Tzivanopoulos beschreibt in zwei Veröffentlichungen [28, 65] und im persönlichem Austausch [116] seinen Forschungsfokus und sein Dissertationsvorhaben. Darin betont er den Bedarf nach virtuellen Entwicklungswerkzeugen im frühen Fahrzeugentwicklungsprozess, um Freiheiten durch neue Technologien frühzeitig berücksichtigen zu können. Die Wahl eines „Vom Innenraum zur Außenhaut“-Ansatzes für die Entwicklung wird statt dem designorientierten „Von der Außenhaut zum Innenraum“-Ansatz gewählt, um die Auswirkungen von neuen Technologien wie Steuer- oder Drive-by-Wire auf das Gesamtfahrzeug zu untersuchen. Die Auswirkung von veränderten Insassenhaltungen wird durch Kopplung des Innenraums mit einem Exterieurmodell gezeigt.

Matz [57] wählt für seine Dissertation einen neuen Ansatz und erweitert die Systemgrenze zu einer multimodalen Verkehrsumgebung. Das Fahrzeug wird so als Teillösung in Kombination mit anderen Verkehrsmitteln betrachtet und das Mobilitätsbedürfnis des Kunden steht im Vordergrund. Das Fahrzeug wird volumetrisch und gravimetrisch modelliert und der Verbrauch mit einer LDS ermittelt. Die Antriebsstrangkomponenten werden nicht kontinuierlich modelliert, sondern aus einer Datenbank ausgewählt. Weiterhin ist ein Allradantrieb nicht möglich. Der Innenraum wird aus Crash- und Ergonomiegründen nur mit Sitzen in Fahrtrichtung bestückt. Die Packagedarstellung erfolgt in einem Java-basierten Programm mit STL-Körpern, die relativ zueinander definiert und auf Kollision überprüft werden. Unkonventionelle Sitztopologien können damit nicht dargestellt werden. In Orientierung an Kuchenbuch wird ein genetischer Algorithmus zur Optimierung verwendet.

Münster [113] stellt eine Methodik vor, die eine modulare Auslegung von BEV ermöglicht. Zu Beginn werden Anforderungen an zukünftige Fahrzeuge ermittelt und daraus Maße für den Vorder- und Hinterwagen, sowie den Innenraum abgeleitet. Dabei orientiert sich Münster vor allem an Abmessungen bestehender Fahrzeuge. Die Dimensionierung der Komponenten wird simulativ mittels Verbrauchssimulation und Regressionen ermittelt. Anschließend werden sechs Fahrzeugtopologien mit den Komponenten kombiniert und die für den Anwendungsfall geeignetste Lösung qualitativ anhand von selbst gewählten Kriterien bewertet. Durch fehlende Iterationsschleifen im Prozess werden sekundäre Effekte nicht berücksichtigt. Eine geringe Variation der Lösungsvarianten und deren qualitative Bewertung lässt zudem keinen Rückschluss auf ein optimales Fahrzeugkonzept zu. Eine Berücksichtigung von Nebenverbrauchern bei der Auslegung wird nicht erwähnt.

Felgenhauer [117] zeigt in seiner Dissertation eine Methode zur automatisierten Entwicklung eines modularen Systems für Pkw, was besonders durch die gestiegene Modellvielfalt Einsparungen in der Entwicklung für Hersteller ermöglichen soll. Statt eines optimalen Fahrzeugs soll ein modulares System konzipiert werden, das sowohl verschiedene Antriebsarten (BEV, ICEV, etc.), als auch unterschiedliche Fahrzeuge beinhaltet. Im Vergleich zu anderen Arbeiten werden verstärkt geometrische Ersatzmodelle für Komponenten angewandt und damit der Lösungsraum deutlich erweitert. Die Umsetzung beschränkt sich jedoch auf den Vorderwagen, während der Innenraum nur teilweise berücksichtigt und der Hinterwagen gar nicht betrachtet wird. Obwohl die Methode für viele aktuelle BEV, deren Antriebseinheit sich oftmals im Hinterwagen befindet, nicht anwendbar ist, lässt sich laut dem Autor die Methode dafür erweitern.

Rosbacher [25] entwickelt in seiner Dissertation ein integriertes Konzeptmodell für die Gesamtfahrzeugentwicklung in der frühen Phase. Ein Teil davon ist die Integration von Expertenwerkzeugen einzelner Fachabteilungen in ein Gesamtfahrzeugmodell. Aufgrund der spezifischen Entwicklungswerkzeuge betrachtet er insbesondere die Schnittstellen zwischen Ersatzmodellen einzelner Komponenten und dem überwiegend geometrischen Modell des Gesamtfahrzeugs. Die Innenraumkonzepte und -maße basieren überwiegend auf existierenden Fahrzeugen. Die Klimaanlage wird im Zuge der Komponentenvorauslegung betrachtet, der zusätzliche Nebenverbrauch bleibt aber unberücksichtigt. In der Dissertation wird darauf verzichtet, eine automatisierte Auslegung zu ermöglichen, weil das Konzeptmodell als Begleiter für den gesamten Prozess dienen soll.

Die vorliegende Arbeit entstand parallel zur Dissertation von Nicoletti [31]. Ziel seiner Arbeit war eine parametrische Modellierung von BEV. Besonders die Auswirkungen von sekundären Masse- und Volumeneffekten waren Modellierungsschwerpunkte und wurden mit diesem Detaillierungsgrad noch in keiner bisherigen Arbeit durchgeführt. Die Arbeit beschränkt sich bewusst auf zweireihige Fahrzeuge mit konventionellem Sitzlayout und verwendet ausschließlich bestehende Karosserieformen. Gepäckraum und Nebenverbraucher wurden weiterhin nicht betrachtet.

Es gibt weitere Ansätze, die wegen zu niedrigem Informationsgehalt oder geringem Arbeitsfortschritt nicht in Tabelle 2.6 eingeordnet werden können. Beispielsweise stellt Dirr et al. [118] eine Methode vor, wie ideale Konzepte für BEV gefunden werden können. Die Maßketten orientieren sich ebenfalls an der SAE J1100 und sollen helfen, Anforderungen aus einem Anwendungsfall in ein parametrisches Modell zu übertragen. Das Package wird jedoch nur vereinfacht mit ausschließlich kubischen Formen abgebildet und ein Neuigkeitswert zu bereits genannten Arbeiten ist nicht erkennbar. Phadte [119] prüft die Anwendung eines genetischen Algorithmus auf die Topologieoptimierung von elektrischen AV. Er möchte damit die Platzierung von Komponenten wie Batterie, Sitz und Maschine optimieren. In der Arbeit wird jedoch nur die grundsätzliche Funktionsweise des Algorithmus erklärt, Ergebnisse sind kaum beschrieben und durch starke Vereinfachungen nicht verwendbar.

Es gibt neben der Fahrzeugtechnik auch Ansätze zur Konzeptauslegung in anderen Fachbereichen. Ein gutes Beispiel für die Luftfahrt ist PRADO [120, 121]. PRADO ist ein Programm zur optimalen Auslegung von Flugzeugen und wurde vor mehr als 20 Jahren an der Technischen Universität Braunschweig entwickelt. Für jedes Modul können unterschiedliche Simulationsmethoden eingesetzt und so ein Kompromiss aus Rechenzeit und Genauigkeit erreicht werden. Joung [122] optimiert die Strömungsform eines U-Bootes unter Verwendung einer Strömungssimulation. Die Übertragbarkeit solcher Arbeiten beschränkt sich jedoch meist nur auf die Optimierungsmethoden, weshalb diese im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wurden.

2.3 Ableitung der Themenstellung

Die Automatisierung als einer der großen Trends neben der Elektrifizierung beschäftigt die Automobilindustrie und wird das Fahrzeug verändern (Kapitel 2.1.4). Eine bewährte Methode, um die veränderten Anforderungen und Randbedingungen durch solche neue Technologien bereits im frühen Entwicklungsprozess zu berücksichtigen, ist die Auslegung und Optimierung von Fahrzeugkonzepten (Kapitel 2.2.2). Diese unterstützt in der frühen Phase, in der noch hohe Freiheitsgrade vorherrschen und in der wichtige, später schwer änderbare, Eigenschaften des Fahrzeugs festgelegt werden. Während sich in der Elektromobilität dieses Vorgehen bewährt hat und die Methode über Arbeiten von Prinz [109], Kuchenbuch [29], Matz [57] und Nicoletti [31] inkrementell verbessert wurde, muss sie im Bereich des autonomen Fahrens angepasst werden [26, S. 572]. In der Literatur gibt es noch keine Arbeit, die sich mit einer solchen Anpassung ganzheitlich beschäftigt hat. Münster [113] und Tzivanopoulos [28, 65] behandeln zwar Teilaspekte der Veränderung der Entwicklung durch automatisiertes Fahren, bieten aber keine ganzheitliche Methode oder Werkzeug an.

Während die Elektrifizierung hauptsächlich den Antriebsstrang betrifft, verändert das autonome Fahren die Mobilität über das Fahrzeug hinaus. Es gibt in der Literatur bereits zahlreiche Szenarien, die für die Zukunft aufgezeigt werden (Kapitel 2.1.2). Je nach möglichem Szenario kann das Potential eines AV ein anderes Ausmaß oder sogar ein anderes Vorzeichen haben (Kapitel 2.1.3). Quantitative Prognosen sind aber noch schwierig, weil keine seriengefertigten Fahrzeuge auf den Straßen unterwegs sind. Die meisten qualitativen Abschätzungen werden in der Literatur deshalb auf Basis von zahlreichen Vergleichen und vereinfachenden Annahmen getroffen. Die Anwendung der Fahrzeugkonzeptauslegung, nachdem sie für AV angepasst wurde, kann deshalb zusätzlich bei einer quantitativen Abwägung von positiven und negativen Effekten des autonomen Fahrens helfen.

Zusammenfassend können folglich zwei Fragestellungen formuliert werden, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden sollen:

- **Fragestellung 1:** Wie sollte die bestehende Methodik der Fahrzeugkonzeptauslegung und -optimierung für autonome Fahrzeuge angepasst werden?
- **Fragestellung 2:** Wie kann das Potential von autonomen Fahrzeugen in Abhängigkeit von dem gewählten Nutzungsszenario bestimmt werden?

Die erste Frage soll mit der Anpassung der Methodik in Kapitel 3 beantwortet werden. Die Ableitung von neuen Anforderungen durch die Automatisierung soll eine Grundlage für die dann folgende Neu- und Weiterentwicklung von Modellen schaffen. Die beispielhafte Anwendung der angepassten Methode und die Ermittlung von Potentialen in Abhängigkeit von verschiedenen Nutzungsszenarien zur Beantwortung der zweiten Frage erfolgt in Kapitel 4.

3 Methodik zur Auslegung von autonomen Fahrzeugkonzepten

In diesem Kapitel wird die Methodik zur Optimierung und Potentialabschätzung von autonomen Fahrzeugkonzepten (Abbildung 3.1) und deren Umsetzung beschrieben. Obwohl die Methodik für die Anpassung der Konzeptmodellierung von AV entworfen wurde, kann sie nach entsprechender Anpassung der Anforderungsermittlung auch auf andere, neue Technologien übertragen werden.

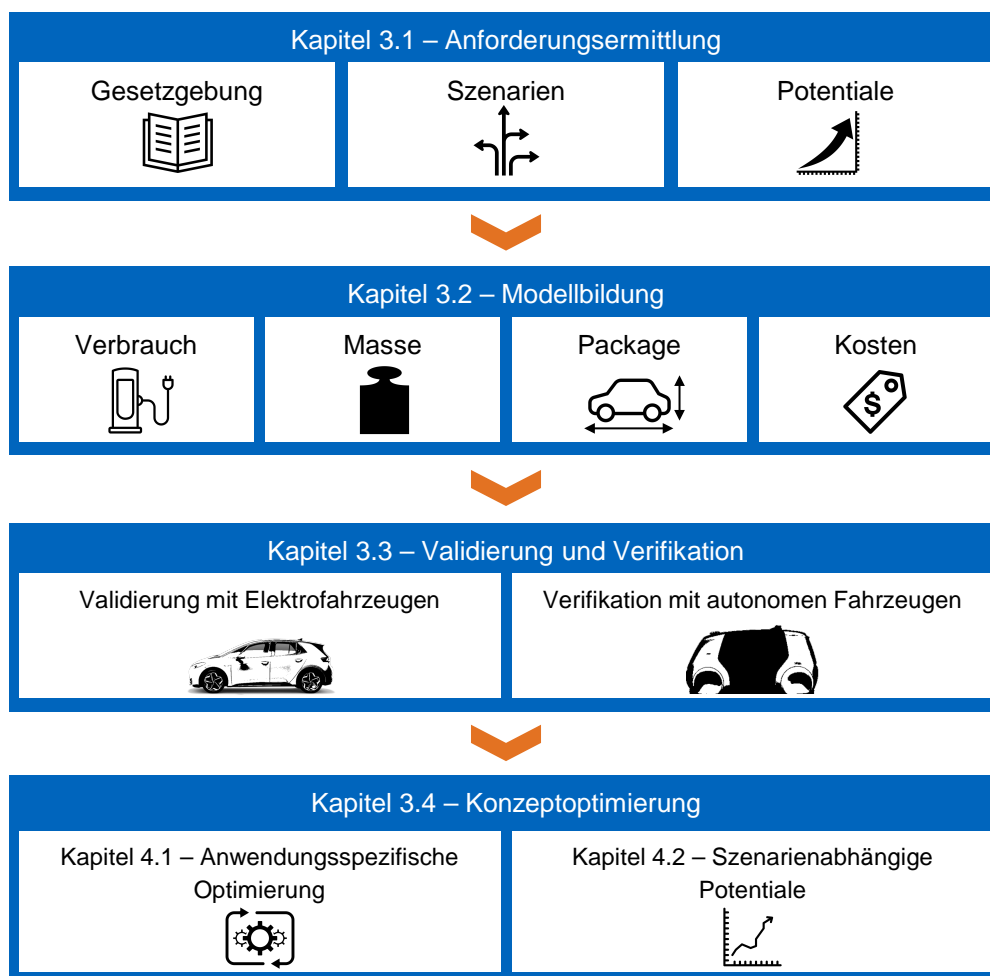


Abbildung 3.1: Methodik zur Auslegung von autonomen Fahrzeugkonzepten

Der erste Schritt stellt die Ermittlung der Anforderungen an die spätere Modellbildung dar (Kapitel 3.1). Durch veränderte Gesetzgebung, unterschiedliche Einführungsszenarien und der Bedarf nach einer Potentialbestimmung der neuen Technologie müssen Modelle des Fahrzeugs

angepasst werden. Nach der Erstellung und Adaption sämtlicher Modelle (Kapitel 3.2) kann deren Validierung (Kapitel 3.3) erfolgen. Weil die Möglichkeit besteht, dass die entsprechenden Fahrzeuge noch nicht existieren, muss die Validierung zunächst mit bereits existierenden Serienfahrzeugen durchgeführt werden. Damit wird eine korrekte Funktion der Teilmodelle im Gesamtfahrzeugmodell sichergestellt. Eine Verifikation anhand von Prototypen oder Konzeptfahrzeugen stellt zusätzlich sicher, dass die Modellierung ausreichend Lösungsraum für die neue Technologie bereithält. Zuletzt erfolgt eine Fahrzeugkonzeptoptimierung (Kapitel 3.4), mit der zum einen ideale Konzepte für gewählte Anwendungsfälle ermittelt (Kapitel 4.1) und zum anderen Potentiale der neuen Technologie quantifiziert (Kapitel 4.2) werden.

3.1 Anforderungsermittlung

Im Stand der Technik (Kapitel 2) wurde gezeigt, dass sich zahlreiche Rahmenbedingungen für das autonome Fahren ändern können. Die Gesetzgebung als Grundlage für die Typzulassung und den Betrieb eines Fahrzeugs soll als erster Aspekt betrachtet werden (Kapitel 3.1.1). Auf Grundlage der im Stand der Technik ermittelten Nutzungsszenarien (Kapitel 2.1.2) und der Notwendigkeit der quantitativen Bestimmung von Potentialen von AV (Kapitel 2.1.3) sollen zusätzliche Anforderungen an die Konzeptauslegung von AV abgeleitet werden (Kapitel 3.1.2 und Kapitel 3.1.3). Alle Anforderungen aus diesen Kapiteln werden schließlich zusammengefasst (Kapitel 3.1.4) und können in die folgende Modellierung (Kapitel 3.2) einfließen.

3.1.1 Gesetzgebung

Bei der Entwicklung von Fahrzeugen müssen unter anderem technische Anforderungen im Bereich Sicherheit und Umweltverträglichkeit erfüllt werden [83, S. 16]. Diese leiten sich aus verschiedenen Bereichen ab, wobei Vorschriften im Vergleich zu Normen zwingend erfüllt werden müssen [83, S. 21]. Seit 1958 wird im Rahmen der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) versucht, die technischen Vorschriften zu harmonisieren, um den Handel mit Fahrzeugen und deren Zubehör zu erleichtern [123]. Diese Regelungen können dann entweder im Rahmen der Europäischen Union (EU) oder direkt in nationale Gesetze integriert werden [123]. Innerhalb der EU können zudem Verordnungen eingesetzt werden, die sofort und unmittelbar in allen Mitgliedsländern gültig sind [124].

Für diese Arbeit wurde geprüft, ob für die FKE relevante Anforderungen aus Normen, Gesetzgebung und Verbraucherschutz (NVVT) vorliegen. In bisherigen Arbeiten (Kapitel 2.2.2) wurden bereits zahlreiche NVVT genannt (Tabelle 3.1). Neben VW-internen Normen, wie bei Prinz und Kuchenbuch genannt, können einige genannte SAE Normen (SAE J826, SAE J941, SAE J1052, SAE J1516, SAE J1517 SAE J4004) für diese Arbeit nicht verwendet werden. Grund dafür ist der Bezug auf die SAE J1100, die, wie im Weiteren erläutert, nur bedingt für AV geeignet ist. Die von Felgenhauer verwendete Richtlinie EG 77/649/EWG bezüglich des Sichtfelds des Fahrers ist bereits veraltet und wurde durch die UNECE R125 [125] ersetzt. Übrige NVVT werden auf Eignung geprüft und in der weiteren Arbeit sofern möglich verwendet.

Tabelle 3.1: Verwendung von Normen (N), Verordnung (V) und Verbrauchertests (VT) in bisherigen Arbeiten zur Auslegung von Fahrzeugkonzepten

| Autor | Verwendete Normen/Verordnungen/Verbrauchertests |
|------------------------|---|
| Prinz [109] | ISO 4130 (N), SAE J1100 (N) |
| Kuchenbuch [29] | SAE J826 (N), SAE J1516 (N) |
| Matz [57] | DIN 70020-1 (N), SAE J826 (N), SAE J1052 (N), SAE J1100 (N), SAE J4004 (N) |
| Münster [113, 126] | NCAP (VT), SAE J1100 ¹ (N), SAE J3016 ¹ (N) |
| Felgenhauer [117] | SAE J941 (N), SAE J1100 (N), ISO 4131 (N), EG 77/649/EWG ² (V) |
| Tzivanopoulos [28, 65] | SAE J1100 ¹ (N) |
| Rossbacher [25] | SAE J1100 (N), NCAP (VT) |
| Nicoletti [31] | SAE J941 (N), SAE J1052 (N), SAE J1100 (N), SAE J1516 (N), SAE J1517 (N), SAE J4004 (N), ISO 3832 (N), ISO 3833 (N), UNECE R125 (V) |

¹ Bezeichnungen aus Norm verwendet, ohne Norm zu zitieren

² Durch neue Version ersetzt

Die Betrachtung weiterer NVVT wurde dabei nur auf solche beschränkt, die in der frühen Entwicklungsphase relevant sind. Zahlreiche Anforderungen (z.B. Glühlampen im Scheinwerfer oder Anfahrassistent) können in dieser Phase entweder nicht überprüft werden, sind unzutreffend oder deren Entwicklung kann erst nach der Festlegung von Komponenten erfolgen. Diese neuen können zusammen mit den bereits genannten NVVT für die Entwicklung von AV in drei Kategorien eingeteilt werden (Tabelle 3.2) und sind im Folgenden näher beschrieben.

Tabelle 3.2: Einordnung von Normen (N), Verordnung (V) und Verbrauchertests (VT) hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die Auslegung von autonomen Fahrzeugkonzepten

| Neu für autonome Fahrzeuge | Übertragbar für autonome Fahrzeuge | (Teilweise) nicht übertragbar für autonome Fahrzeuge |
|---------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Level der Autonomie SAE J3016 (N) | Bremsen UNECE-R13 (V) | Kraftfahrzeugdimensionen SAE J1100/ ISO 3141 (N) / DIN 70020-1 (N) |
| Autonomes Level 3 UNECE-R157 (V) | Reifen UNECE-R30 (V) | Sitze UNECE R17/R80 (V) |
| Autonomes Level 4 StVG §1c-§1l (V) | Aufprallschutz UNECE-R94/R95 (V) | WLTP UNECE-R154 (V) |
| | Sichtfeld UNECE-R125 (V) | NCAP (VT) |
| | Fußgängerschutz UNECE-R127 (V) | Bezugssystem ISO 4130 (N) |
| | Gepäckraum ISO 3832 (N) | |

Zum einen wurden vereinzelt bereits neue NVVT für AV festgelegt. Zum anderen können bereits bestehende NVVT für Komponenten, an die bei AV ähnliche Anforderungen gestellt werden, übertragen werden. Zuletzt gibt es NVVT, die teilweise nicht ohne Anpassung übertragbar sind, weil die hohe Varianz der möglichen Szenarien nicht abgedeckt werden kann. Für den Fall, dass die autonome Fahrfunktion eine rein zusätzliche Komfortfunktion ist und das Fahrzeug ansonsten unverändert bleibt, sind diese aber ebenfalls anwendbar.

Neue Normen, Verordnungen und Verbrauchertests

Weil das autonome Fahren mit Level 3, 4 oder 5 noch eine deutliche Anpassung der Gesetzgebung [127, S. 158] benötigt, bedarf es neuer NVVT, um speziell darauf Rücksicht zu nehmen. Die SAE J3016 Norm wurde bereits in Kapitel 2.1.1 erläutert und beschreibt die Einteilung von autonomen Systemen in Level. Die deutsche Regierung hat nach Angabe des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) [10] die ersten Gesetze erlassen. So wurde im Jahr 2017 ein erstes Mal das Straßenverkehrsgesetz (StVG) angepasst, um die Grundlage für die UNECE-R157 und damit für autonomes Fahren nach Level 3 zu schaffen.

Im Jahr 2021 trat ein weiteres Gesetz in Kraft, das die Grundlage für autonomes Fahren nach Level 4 schafft [128]. Dieses Gesetz führt zu einer erneuten Änderung des StVG und ermöglicht den zukünftigen Betrieb von führerlosen Fahrzeugen [5, S. 5]. In den Änderungen der §1c - §1d des StVG sind überwiegend Anforderungen an das System beschrieben, die keine direkten Anforderungen an das Gesamtfahrzeug bedeuten. Es wird jedoch erwähnt, dass jedes Fahrzeug weiterhin die Bedingungen, die für die Zulassung im öffentlichen Straßenverkehr notwendig sind, erfüllen muss. In den USA kann die Gesetzgebung je nach Bundesstaaten deutlich variieren. Hier beziehen sich die Gesetze insbesondere auf das Testen von AV, was seit 2016 in Kalifornien und Florida auch ohne Fahrer unter gewissen Umständen erlaubt ist [129, S. 430, 130].

Übertragbare Normen, Verordnungen und Verbrauchertests

Die Verordnungen UNECE R13 [131], R30 [132], R94 [133], R95 [134], R125 [125] und R127 [135] können auch auf AV übertragen werden. Die Vorschrift R125 für die Einhaltung des Sichtfelds muss im Falle eines vorhandenen Fahrerarbeitsplatzes überprüft werden, bei einem führerlosen Fahrzeug hingegen nicht betrachtet werden. Die Bremsen (R13), die Reifen (R30), der Aufprallschutz (R94/R95) und der Fußgängerschutz (R127) können bei einer Konzeptauslegung nicht direkt einbezogen werden, weil die Komponenten noch nicht ausreichend detailliert vorliegen.

Es können jedoch Vorkehrungen getroffen werden, die eine spätere Anwendung der Vorschriften mit großer Wahrscheinlichkeit ermöglicht. So kann durch Berücksichtigung der freien Crashlänge und dem Vorsehen von Längs- und Querträgern im Package eine Grundlage für die spätere Crashauslegung geschaffen werden. Durch Berechnung einer Felgen-Mindestgröße kann ebenfalls Platz für eine ausreichend groß dimensionierte Bremse vorgehalten werden. Der Fußgängerschutz kann über Mindestabstände der Außensilhouette zu harten Komponenten wie dem Querträger oder den Motorkomponenten berücksichtigt werden. Werden Szenarien betrachtet, bei denen ein unfallfreier Verkehr möglich ist und keine Fußgänger am Verkehrsgeschehen, durch beispielsweise eine abgesperrte Infrastruktur, beteiligt sind, müssen die R94, R95 und R127 nicht betrachtet werden und die geforderte freie Crashlänge kann minimiert werden. Die Norm ISO 3832 [136] zur Bestimmung des Kofferraumvolumens ist mit deren festgelegten Prüfkörper ebenfalls für AV übertragbar. Lediglich die Verortung des Kofferraums muss unabhängig erfolgen, weil vordere Kofferräume nicht eingeschlossen sind.

(Teilweise) nicht übertragbare Normen, Verordnungen und Verbrauchertests

Die Übertragbarkeit von einigen NVVT ist nur teilweise möglich. Eine wichtige Kategorie sind die Kraftfahrzeugdimensionen. Basis für die Exterieur- und Interieurmaße bisheriger Fahrzeuge ist

die Norm SAE J1100 [137] (Abbildung 3.2a). Mit ihr werden konventionelle Modelle ausgelegt [138, S. 298] und mit Vorgänger- oder Konkurrenzfahrzeugen verglichen. Wichtige Zusammenhänge zwischen einzelnen Maßen im Package werden von Nicoletti [31] beschrieben. Diese Maße sind auf einen Fahrerarbeitsplatz bezogen und enthalten detaillierte Fußstellungen auf Grund der Pedalerie. Für eine Anwendung auf AV, die über neue Sitzkonfigurationen verfügen können, ist diese Norm nur bedingt geeignet. Größere Fahrzeuge der Klasse M_2 und M_3 , wie beispielsweise Busse, müssen mit der Vorschrift UNECE R107 [139] geprüft werden. Diese Vorschrift enthält konventionelle und gegenüberliegende Sitzkonfigurationen, fordert aber lediglich Mindestmaße, die zu erfüllen sind (Abbildung 3.2b). Für diese Arbeit muss deshalb eine alternative Berechnung von Maßen und deren Verkettung entworfen werden, weil bisherige Normen und Vorschriften nur in Teilen dafür geeignet sind. Die Verwendung des üblichen Koordinatensystems aus der ISO 4130 [140] ist daher ebenfalls anzupassen (Kapitel 3.2.3).

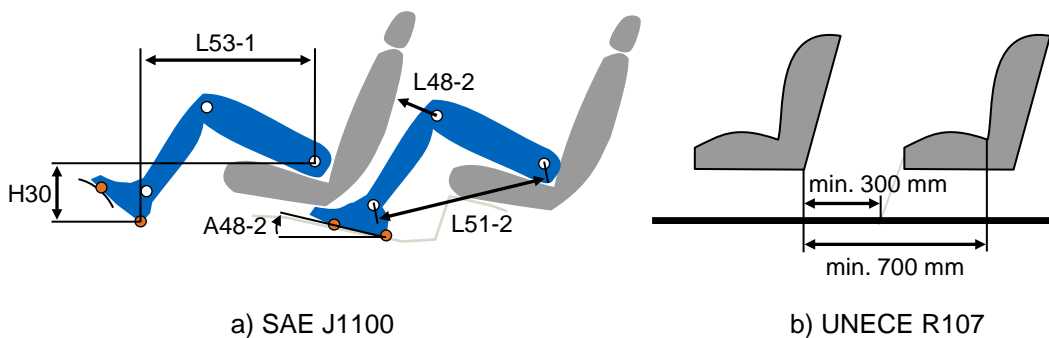


Abbildung 3.2: Beispiele für Innenraummaße in der UNECE R107 [139] und SAE J1100 [137]

Die Platzierung und Beschaffenheit von Sitzen ist in der UNECE R17 [141] und R80 [142] beschrieben. Hier werden teilweise Anordnungen auf die Fahrzeugklasse und -masse bezogen. Eine seitliche Sitzanordnung erfordert beispielsweise eine M_3 Zulassung und ein Fahrzeuggesamtmasse von mindestens 10t [142, S. 2]. In Zukunft muss diskutiert werden, dass insbesondere in Szenarien mit rein autonomem Verkehr die Anforderungen auch für kleine und leichte Fahrzeuge durch das geringe Kollisionsrisiko reduziert werden.

Die UNECE R154 [99] beschreibt den Ablauf und den Aufbau des weltweit harmonisierten Prüfverfahrens für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge (WLTP). Diese standardisierte Prüfung wird verwendet, um den Verbrauch und die elektrische Reichweite von Fahrzeugen zu bestimmen und die Ergebnisse vergleichbar zu machen. Weil der dort angegebene Zyklus dem menschlichen Fahrer nachempfunden wurde, ist er für die Auslegung von fahrerlosen AV nur bedingt geeignet (Kapitel 2.1.4).

Die Einhaltung gesetzlicher Anforderungen bedeutet meistens nur die Erfüllung von Mindestanforderungen. Für eine Aussage, wie gut die Anforderungen bestanden wurden, gibt es zusätzlich Verbrauchertests wie das New Car Assessment Programme (NCAP), bei dem die aktive und passive Sicherheit von neuen Fahrzeugen geprüft wird [83, S. 32-33]. Während die passive Sicherheit in dieser Arbeit indirekt über die freie Crashlänge berücksichtigt wird, können die Tests zur aktiven Sicherheit nicht betrachtet werden. Diese müssen für AV weiterhin angepasst werden, weil bisher nur einzelne Fahrerassistenzfunktionen abgedeckt werden.

3.1.2 Nutzungsszenarien

In Kapitel 2.1.2 wurden zahlreiche Szenarien beschrieben, wie autonomes Fahren im Mobilitätsalltag Einzug halten kann (Tabelle 2.2). Daraus werden in diesem Kapitel Anforderungen abgeleitet, die an die Auslegung von AV gestellt werden müssen (Tabelle 3.3). Während bei der Anpassung der Konzeptauslegung von BEV im Vergleich zu ICEV überwiegend der Antriebsstrang und Teile des Packages betroffen waren, betreffen die Anpassungen bei AV mehr Baugruppen des Fahrzeugs und dessen Umfeld.

Tabelle 3.3: Folgen für die Auslegung von AV für jede Kategorie der Nutzungsszenarien (Kapitel 2.1.2)

| Verkehr | Fahrzeugintelligenz | Geschäftsmodell | Automatisierung |
|--|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Anpassung der gesetzlichen Anforderungen | Variable Sensorik und Rechner | Höhere Variabilität des Innenraums | Fahrzeuge mit/ohne Fahrerarbeitsplatz |
| Variable Sensorik und Rechner | | Höhere Varianz der Anforderungen | Höhere Variabilität des Innenraums |

Ein erster Aspekt von unterschiedlichen Verkehrsszenarien ist eine nötige Anpassung der Gesetzgebung aus dem vorherigen Kapitel. So ist es beispielsweise möglich, dass bei einem rein autonomen Verkehr geringere Anforderungen an die Crashesicherheit gestellt werden und ein Fahrzeug ausgelegt werden soll, das die kleinstmöglichen Abmessungen hat. Je nach Verkehrsszenario kann, wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, ein WLTP Fahrzyklus mit ausgeschalteten Nebenverbrauchern keine sinnvolle Abbildung des späteren, realen Fahrbetriebs darstellen. Neue Funktionen wie Eco-Driving, die von AV umgesetzt werden können, werden in solchen Zyklen nicht berücksichtigt und benötigen deswegen neue Testprozeduren [21, S. 12]. Es muss in dieser Arbeit folglich sichergestellt werden, dass auch andere Fahrzyklen abgebildet werden. Diese sollten Nebenverbraucher berücksichtigen, weil diese einen starken Einfluss auf die Reichweite haben, insbesondere bei elektrischen AV [84, S. 17].

Ein weiterer Aspekt von Verkehrsszenarien ist die benötigte Hardware für die autonome Fahrfunktion. Wird ein Fahrzeug im autonomen Verkehr auf abgesperrter Strecke bewegt, werden voraussichtlich andere Anforderungen an das System gestellt als bei Mischverkehr (Kapitel 2.1.2). Weiterhin kann ein Teil der Umfelderkennung in die Infrastruktur integriert werden [8, S. 22], was ebenfalls zu veränderten Anforderungen führen kann. Eine variable Wahl der Hardware für AV kann diese Varianz berücksichtigen.

Unterschiedliche Geschäftsmodelle beeinflussen das Fahrzeug durch eine andere Besitzstruktur. Während bei einem Fahrzeug im Privatbesitz oft ein höherer Anspruch an die Innenraumqualität gestellt wird und nahezu der komplette Mobilitätsbedarf abgedeckt werden soll, wird beim Car- oder Ridesharing vor allem auf die Kosten geachtet [37, S. 50]. Werden andere Modalitäten wie der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) mit dem Fahrzeug ersetzt, kann zudem von ähnlich niedrigen Anforderungen an den Innenraum ausgegangen werden. Zur Berücksichtigung dieser großen Anforderungsvarianz sollte insbesondere der Innenraum hinsichtlich Sitzkonfiguration, Sitzhaltung und Platz variabel gestaltet werden können.

Zuletzt sollte im Falle eines privat verwendeten Fahrzeugs und dem Wunsch nach manuellem Fahren auch weiterhin die Möglichkeit bestehen, Fahrzeuge mit Fahrerarbeitsplatz auslegen zu können. Die Erfüllung aller dafür nötigen NVVT muss dafür weiterhin gegeben sein.

3.1.3 Potentiale

In Kapitel 2.1.3 wurde gezeigt, dass mögliche Potentiale des autonomen Fahrens deutlich von dem gewählten Zukunftsszenario abhängen. Weiterhin wurde aufgezeigt, dass sich viele Autoren noch uneinig sind, ob AV in den genannten Bereichen zu einer Verbesserung oder Verschlechterung führen. Die meisten haben bisher über Vergleiche nur qualitativ abgeschätzt, an welchen Stellen das autonome Fahren zu Veränderungen führen könnte. Für eine Vergleichbarkeit von unterschiedlich wirkenden Veränderungen muss jedoch eine quantitative Bewertung vorliegen.

Potentiale können auf verschiedenen Ebenen der Mobilität erreicht werden. So kann der Verkehr makroskopisch betrachtet werden und eine optimale Routenführung bereits zu Einsparungen in der Flotte führen [143]. In dieser Arbeit werden nur das Fahrzeug und darauf beschränkte Potentiale betrachtet. Obwohl der Verkehr unberücksichtigt bleibt, wird mit dem Folgenden eine Basis für weitere Untersuchungen auf Flottenebene geschaffen, weil die Fahrzeuge und deren Verbrauch in Abhängigkeit von dessen Anforderungen modelliert werden können.

Die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen eines Fahrzeugs können für verschiedene Stufen des Produktlebenszyklus ermittelt werden. In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf die Ökonomie gelegt, weil die Ökologie stark von äußeren Faktoren wie dem Strommix abhängt. So würde bei einem hohen Elektrifizierungsanteil aller Fahrzeuge und der Verwendung erneuerbarer Energien ein ökologisches Potential durch autonomes Fahren deutlich geringer ausfallen, weil die Fahrzeuge auch ohne Automatisierung bereits nahezu emissionsfrei sind [37, S. 66]. Die Anschaffungskosten des Fahrzeugs können mittels der Herstellkosten und der Betrieb mittels des elektrischen Verbrauchs abgebildet werden, während die Berücksichtigung von Wartungs- und Reparaturkosten aufgrund fehlender Erfahrung mit AV nicht möglich ist. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit, die Batteriekapazität, -zelltyp, Komponentenmassen und den elektrischen Verbrauch einschließen, können aber als Basis für weitere Berechnungen im Bereich der Ökologiebewertung genutzt werden.

3.1.4 Zusammenfassung der Anforderungen

Die vorherigen drei Unterkapitel haben gezeigt, dass die Anforderungen an eine Fahrzeugkonzeptmodellierung für AV angepasst werden müssen. Die ungewissen Auswirkungen des autonomen Fahrens auf zukünftige Fahrzeuge in Abhängigkeit von verschiedenen Nutzungsszenarien führen weiterhin zu einem Bedarf nach einer quantitativen Bestimmung von Fahrzeugparametern. Die folgenden Aspekte müssen deshalb umgesetzt werden:

- Anpassung der bisher üblichen Packagemodellierung mit Maßkettenbildung aus der SAE J1100, um neue Innenraumkonfigurationen und Karosserieformen berücksichtigen zu können.
- Integration von Nebenverbrauchern (Sensorik, Rechner, Klimaanlage) und verschiedenen Fahrzyklen, um eine realitätsnahe und anwendungsspezifische Auslegung zu ermöglichen.
- Möglichkeit zur Berücksichtigung von reduzierten Anforderungen an die passive Sicherheit im rein autonomen Verkehr mittels einer variablen freien Crashlänge.
- Ermittlung von Kosten und Verbrauch als Basis zur Abschätzung von ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des autonomen Fahrens.

Die Umsetzung der Konzeptauslegung in das Softwaretool AuVeCoDe (Autonomous Vehicle Concept Development) erfolgt mit MATLAB 2020b [144]. Das AuVeCoDe-Tool ist als Open-Source-Software auf GitHub verfügbar [145]. Sowohl Berechnungen als auch die dreidimensionale Darstellung des Packages wurden vollständig in MATLAB umgesetzt und sind über eine übersichtliche Eingabemaske bedienbar. Die Anpassung oder Neuentwicklung aller notwendigen Modelle unter Einbeziehung der genannten Anforderungen ist im nächsten Kapitel beschrieben.

3.2 Modellbildung

Ein erster Entwurf der benötigten Modelle zur Auslegung von AV wurde bereits in [101] beschrieben. Die dort genannten Bereiche wurden in einer späteren Veröffentlichung [146] fast vollständig übernommen (Abbildung 3.3). Der Bereich Aerodynamik wurde nicht im geplanten Detaillierungsgrad betrachtet, weil zum einen unklar ist, ob die von Gawron [23] erwähnten Nachteile beim Luftwiderstand der außen am Fahrzeug montierten Sensoren auch in einem Serienfahrzeug auftreten würden. Zum anderen lässt sich die Aerodynamik, insbesondere in Form des c_w -Wertes, in der frühen Entwicklungsphase nicht ausreichend genau abschätzen [147]. Am Beispiel des aerodynamisch optimierten Sattelzugs MAN CONCEPT S mit einem c_w -Wert von 0,3 [148] wird deutlich, dass der Luftwiderstandsbeiwert nicht von der Fahrzeuggröße oder Stirnfläche abhängig ist.

Die einzelnen Schritte aus Abbildung 3.3 werden in den folgenden Kapiteln beschrieben und Verweise zu detaillierteren Beschreibungen in Vorveröffentlichungen gegeben. Falls möglich wurden für die Abbildungen der Modelle die Symbole gemäß der Norm für Programmablaufpläne DIN 66001 [149] verwendet. Die Validierung jedes Teilmodells wird in den einzelnen Kapiteln beschrieben oder alternativ auf eine entsprechende Vorveröffentlichung verwiesen. Eine Ausnahme bildet das Packagemodell, das später im Gesamtmodell (Kapitel 3.3) validiert wird.

Als Voraussetzung für die Modellbildung muss der Nutzer nötige technische Anforderungen an das Fahrzeug festlegen (Kapitel 3.2.1). Für ausgewählte Parameter kann statt eines einzelnen Wertes auch ein Wertebereich ausgewählt werden. Die Wahl eines geeigneten Wertes wird in diesem Fall von der Optimierung bestmöglich in Hinblick auf die Zielgrößen gewählt (Kapitel 3.4).

In den folgenden Schritten erfolgt die Antriebsstrangauslegung und die sich daraus ergebende Dimensionierung dessen Komponenten (Kapitel 3.2.2), die schrittweise Packageauslegung (Kapitel 3.2.3), die Berechnung des Nebenverbrauchs (Kapitel 3.2.4) und die Abschätzung der Fahrzeugmasse (Kapitel 3.2.5). Ähnlich wie in der Arbeit von Nicoletti [31] muss nach einem ersten Durchlauf aller Teilmodelle mindestens eine weitere Iteration folgen. Diese wird mindestens benötigt, weil Wechselwirkungen zwischen den Modellen zu gegenseitigen Abhängigkeiten führen. Für die LDS wird beispielsweise der Nebenverbrauch benötigt. Dieser kann aber durch die Karosserieabhängigkeit des Klimaanlageverbrauchs erst nach der Packageauslegung erfolgen. Die Packageauslegung benötigt die Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten, die wiederum durch die LDS ermöglicht wird.

Konvergieren die Fahrzeugdaten zwischen den Iterationen, wird die Schleife verlassen und die Herstellkosten des Fahrzeugkonzepts werden berechnet (Kapitel 3.2.6). Die Konvergenz erfolgt im Vergleich zu der Arbeit von Nicoletti nicht nur mit der Masse, sondern auch unter Einbezug weitere Werte wie Gesamtfahrzeugmaße und Antriebsstrangdaten. Das soll sicherstellen, dass

gegensätzliche Veränderungen von Maßen, die sich in ihrer Masseänderung ausgleichen können, trotzdem erkannt werden. Zuletzt werden dem Nutzer die Fahrzeugdaten übergeben und optional ein dreidimensionales Package dargestellt.

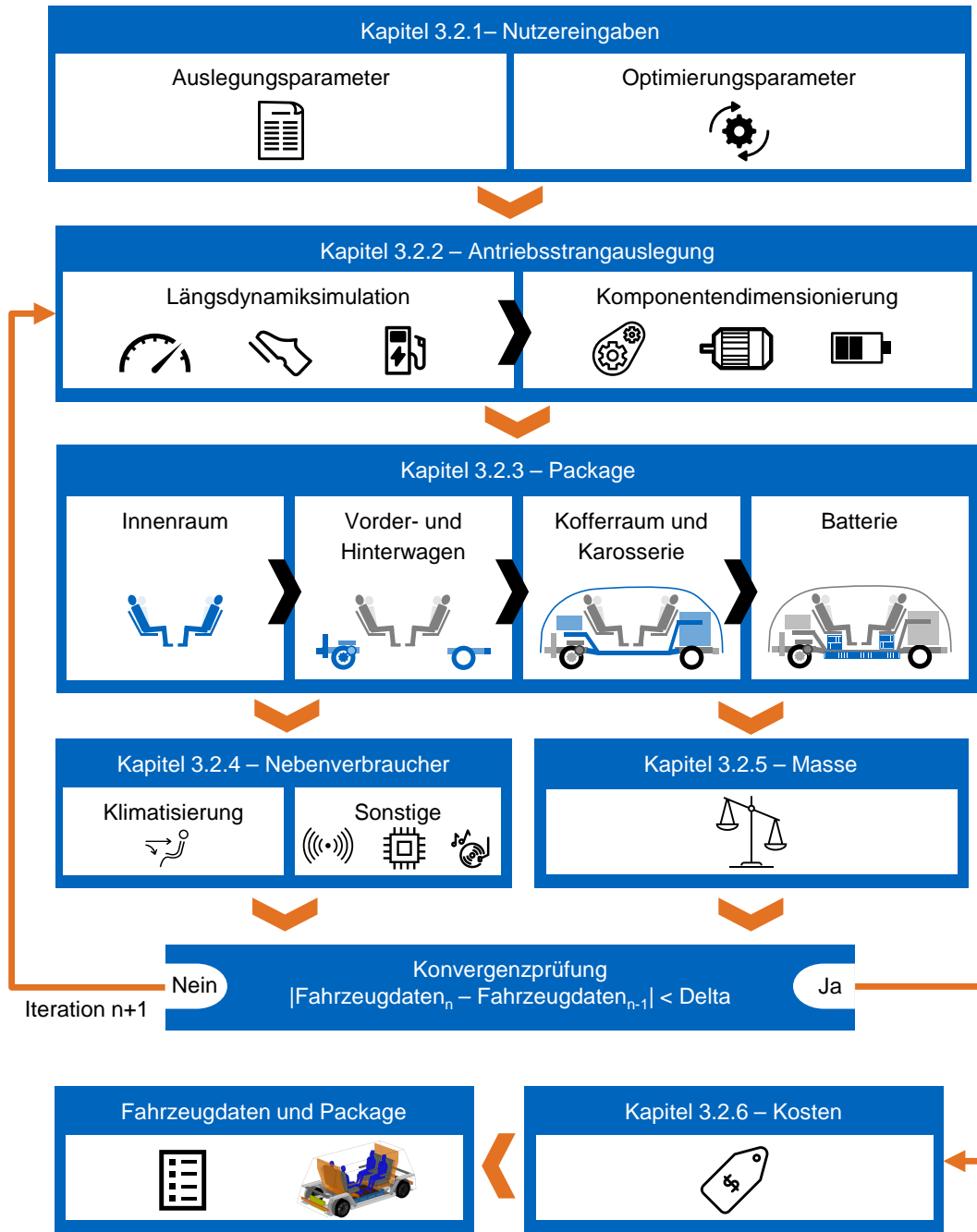


Abbildung 3.3: Ablauf der Konzeptauslegung aufbauend auf [101] und [146]

3.2.1 Nutzereingaben

Die durch den Nutzer anpassbaren Eingabeparameter wurden als Kompromiss zwischen einer ausreichend hohen Anzahl an Parametern, sodass das Gesamtfahrzeug genau genug definiert werden kann, und einer möglichst geringen Anzahl, sodass eine Überforderung des Nutzers vermieden wird, gewählt. Weil ein Fahrzeugkonzept in der frühen Phase im PEP ausgelegt wird (Kapitel 2.2.1), sind außerdem viele Parameter noch nicht verfügbar, weil diese erst im späteren

Verlauf des PEP festgelegt werden. Konstante Werte und benötigte Daten (z.B. Luftdichte, mögliche Reifengrößen etc.) sind in einer Datei hinterlegt und müssen vom Nutzer nicht eingegeben werden.

Nicoletti [150] hat anhand der Literatur ausführlich hergeleitet, welche Eingangsgrößen für elektrische Fahrzeugkonzepte in der frühen Entwicklungsphase benötigt werden. Eine ähnliche Liste für Fahrzeugkonzepte gibt auch Münster [113, S. 3690] an. Diese Parameter wurden als Basis für diese Arbeit verwendet und in Absprache mit der Dissertation von Schockenhoff [32], welcher kundenwerte Eigenschaften für AV erforscht, für AV ergänzt und angepasst.

Darüber hinaus wurden Daten als Eingangsgrößen ergänzt, die zwar die technische Auslegung des Fahrzeugs verändern, den Kunden aber nur indirekt über Herstell- und Betriebskosten betreffen. Beispiele sind die Bauform der elektrischen Maschine (permanenterregte Synchronmaschine (PSM) oder Asynchronmaschine (ASM)) oder die Getriebebauform (paralleles Stirnradgetriebe, koaxiales Planetengetriebe) und -übersetzung. Eine Übersicht aller Parameter ist im Anhang C (Auslegungsparameter) und Anhang H (Optimierungsparameter) gegeben. Für jeden Optimierungsparameter kann anstelle eines Wertebereiches auch ein konkreter Parameter angegeben werden.

3.2.2 Antriebsstrangauslegung

Als Antriebsstrang wird in dieser Arbeit sowohl die Maschinen- und Getriebeeinheit(en) als auch die Traktionsbatterie bezeichnet. Zur Erreichung einer bestimmten Reichweite, Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit muss dieser ausreichend dimensioniert sein. Auf der einen Seite wird ein Verbrauch benötigt, der im Europäischen Raum in standardisierten Fahrzyklen wie der WLTP ermittelt wird, um die passende Batteriegröße zu ermitteln [83, S. 34]. Auf der anderen Seite müssen die installierten Maschinen und Getriebe in der Lage sein, das Fahrzeug wie gewünscht zu beschleunigen und auf eine festgelegte Höchstgeschwindigkeit zu bringen. In der Fahrzeugkonzeptauslegung werden dafür überwiegend LDS verwendet, die ein geradeaus fahrendes Fahrzeug simulieren [151, S. 126]. Eine LDS basiert für ein einfaches Beschleunigungsmodell eines straßengebundenen Fahrzeugs auf Gl. (3.1) ([83, S. 48-50, 151, S. 136, 152, S. 55-77]).

$$m_{tot} \frac{dv(t)}{dt} = F_{X,T}(t) - F_{X,R}(t) - F_{X,A}(t) - F_{X,C}(t) \quad (3.1)$$

$F_{X,T}$ bildet die Reifenkräfte durch den Antrieb in x-Richtung ab, während $F_{X,R}$, $F_{X,A}$ und $F_{X,C}$ den Roll-, Luft- und Steigungswiderstand repräsentieren. Je nach Definition kann die linke Seite in Gl. (3.1) auch als Beschleunigungswiderstand bezeichnet werden [152, S. 69, 153, S. 77].

Die Differenz aus Antriebs- und Widerstandskräften führt zu einer Beschleunigung der Fahrzeugmasse m_V und einem Ersatzwert für die rotierenden Massen m_{pt} (Gl. (3.2)) [151, S. 130]. Der Drehmassenzuschlagsfaktor λ_m bewegt sich je nach Übersetzung in Bereichen von 1,1 bis 1,5 für Personenkraftfahrzeuge [153, S. 82].

$$m_{tot} = m_V + m_{pt} = m_V + \frac{J_{tot}}{r_{dyn}^2} = \lambda_m m_V \quad (3.2)$$

Im Folgenden wird die in der vorliegenden Arbeit verwendete LDS vorgestellt und im Anschluss die darauf basierende Dimensionierung der Antriebsstrangkomponenten für die Packageauslegung erläutert.

Längsdynamiksimulation (LDS)

LDS können in Rückwärts- und Vorwärtssimulationen unterteilt werden. Vor- und Nachteile der jeweiligen Variante werden von Tschochner [27, S. 12] erklärt. Eine Rückwärtssimulation hat bei der Verbrauchssimulation mit vorgegebenem Geschwindigkeitsprofil vor allem den Vorteil von niedrigen Rechenzeiten, während eine Vorwärtssimulation besser für eine realistische Ermittlung der Höchstgeschwindigkeit und minimalen Beschleunigungszeit geeignet ist.

Für diese Arbeit und die Dissertation von Nicoletti [31] wurde eine LDS mit Antriebsstrangauslegung entwickelt, die im Folgenden kurz erläutert wird. Diese ist bereits in [154] beschrieben, in Github [155] veröffentlicht und wurde danach in der Arbeit von Moller [156] um ein genaueres Rollwiderstandsmodell erweitert. Die Simulation (Abbildung 3.4) benötigt sowohl Anforderungen an den Antriebsstrang (z.B. Höchstgeschwindigkeit, Zeit für Beschleunigung von 0 auf 100 km/h) als auch Daten des zu berechnenden Fahrzeugs (z.B. c_w -Wert, Stirnfläche, Masse). Werden nicht ausreichend Eingangsgrößen übergeben, nimmt die Simulation entweder Standardwerte an oder berechnet fehlende Größen. So wird beispielsweise bei Angabe von maximaler Maschinendrehzahl und Höchstgeschwindigkeit die benötigte Getriebeübersetzung berechnet.

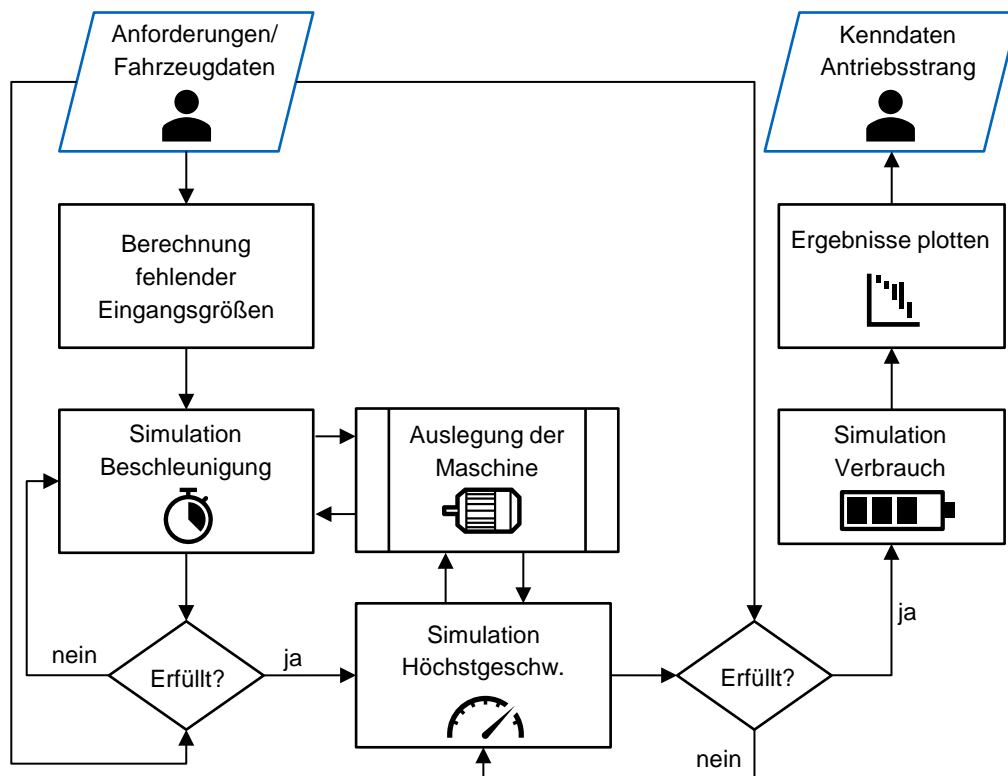


Abbildung 3.4: Ablauf der Längsdynamiksimulation nach [154]

Die nach der Initialisierung folgenden Simulationen für Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit wurden aus oben genannten Gründen als Vorwärtssimulation ausgeführt. Falls die Maschine entweder in der Maximaldrehzahl oder im Maximalmoment nicht ausreichend für die Anforderungen ist, wird die Maschine neu dimensioniert und die Teilsimulation erneut durchgeführt.

Zuletzt wird in einer Rückwärtssimulation der kumulierte Energiebedarf ermittelt. Dafür wird der zu Beginn vom Nutzer angegebene Fahrzyklus verwendet. Während einige Zyklen schon bereitgestellt werden (WLTP, ARTEMIS Urban [157, S. 1, 158], etc.), kann jedes beliebige

Geschwindigkeitsprofil als Fahrzyklus genutzt werden. Für die Verbrauchs- und Beschleunigungssimulation können entweder nur einzelne Achsen oder beide Achsen gleichzeitig angetrieben werden. Für den zweiten Fall wählt die Simulation in der Verbrauchssimulation stets die Verteilung des Antriebsmoments auf die Achsen so aus, dass in Summe die beste Effizienz erzielt wird. Bei mehreren Maschinen pro Achse wird das Moment gleich darauf verteilt, weil in der Verbrauchssimulation Kurvenfahrten nicht berücksichtigt sind.

Für die Verbrauchssimulation wurden für die PSM ein Kennfeld angelehnt an den Tesla Model 3 aus dem Tool Motor XP [159] verwendet. Während die PSM-Kennfelder von Kalt [160] lediglich für veraltete Maschinen gültig sind, konnten die Kennfelder von Kalt für die ASM verwendet werden. Neuartige Technologien wie elektrisch erregte Synchronmaschinen (ESM) sind aktuell nicht umgesetzt, können aber mit minimalem Aufwand nachträglich implementiert werden. Ideal wäre die Implementierung eines Maschinen-Tools, das Decker in [161] beschreibt. Dieses Tool kann Kennfelder über Polynome schnell und über ein breites Spektrum erzeugen. Es wurde jedoch kein entsprechendes Tool während des Entstehungszeitraums dieser Arbeit veröffentlicht und konnte daher nicht integriert werden.

Die Validierung der Beschleunigungs- und Verbrauchssimulation ist in [154] beschrieben, bezog sich jedoch auf ältere BEV. Am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik wurde die LDS an eigenen BEV durch neue Messungen auch für aktuelle Fahrzeuge geprüft. Nicoletti hat mit diesen Messdaten in seiner Dissertation [31] bereits den VW ID.3 validiert, im Folgenden soll die LDS noch anhand des Tesla Model 3 geprüft werden. Die Messungen wurden am lehrstuhleigenen Rollenprüfstand bzw. auf einem Testgelände durchgeführt und die Daten über die OBD-Schnittstelle des Fahrzeugs aufgezeichnet [162].

Zunächst wurde die Beschleunigungssimulation zusätzlich zum bereits getesteten VW eGolf [154] (Abbildung 3.5a) mit einem aktuellen BEV überprüft. Dabei wurde, wie in den Arbeiten von Moller [156, 163] beschrieben, die App Phyxox [164] der RWTH Aachen auf verschiedenen Geräten verwendet. Der Tesla Model 3 wurde mehrfach aus dem Stand bis 100 km/h beschleunigt und die Beschleunigung aufgezeichnet. Er erreicht dabei statt der Werksangabe von 5,6 s eine Beschleunigungszeit von nur 6 s. Eine Messung (Abbildung 3.5b) zeigt das bereits nach knapp vier Sekunden abfallende Drehmoment aufgrund der erreichten Eckdrehzahl der elektrischen Maschine. Die initialen Ausschläge der gemessenen Beschleunigung können durch minimale Bewegung der Messeinrichtung erklärt werden. Aufgrund dieser Ausschläge wurde das Erreichen der Geschwindigkeit von 100 km/h über die GPS-Geschwindigkeit und nicht über die Integration der Beschleunigung geprüft.

Das Kennfeld von Motor XP erreicht die Eckdrehzahl erst nach über vier Sekunden, woraus eine geringere Maximalbeschleunigung resultiert, um die gleiche Beschleunigungszeit zu erreichen. Hier zeigt sich das Problem der schlechten Verfügbarkeit von exakten Kennfeldern. Stimmt das Verhältnis aus Maximal- zu Eckdrehzahl oder der Verlauf der Maximalmoment-Kennlinie nicht exakt mit dem realen Fahrzeug überein, wird die Maschine mit abweichenden Werten zum Realfahrzeug dimensioniert. In diesem Fall hat das simulierte Fahrzeug zwar ein geringeres Maximalmoment als das Realfahrzeug, jedoch eine höhere Maximalleistung bei gleicher Beschleunigungszeit. Diese Abweichungen zeigten sich auch bei der Gesamtfahrzeugvalidierung (Kapitel 3.3.1), führten jedoch zu keinen negativen Einflüssen auf die Validierung der Verbrauchssimulation wie sich im Folgenden zeigt.

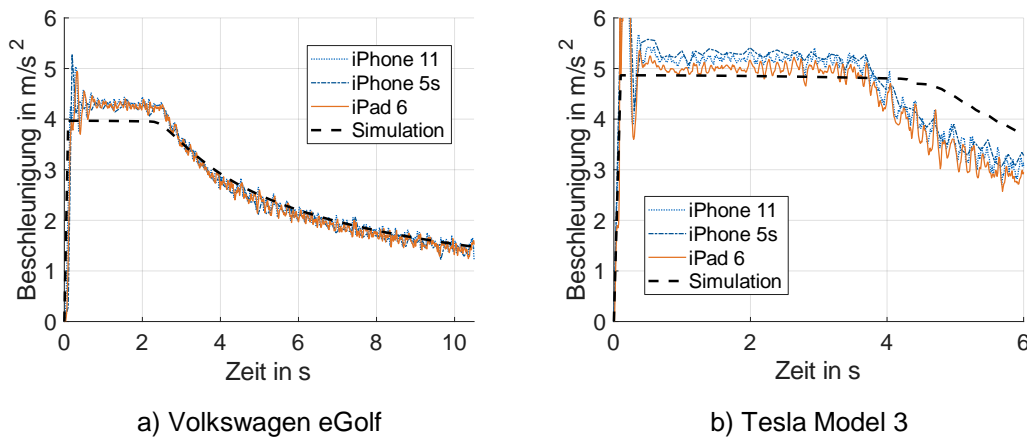


Abbildung 3.5: Validierung der Beschleunigungssimulation der Längsdynamiksimulation anhand des VW eGolf [154] und Tesla Model 3 von 0 auf 100 km/h

Die beschriebenen Abweichungen wurden aufgrund der geringen Rolle der Längsbeschleunigung bei AV akzeptiert. Für die Auslegung von Fahrzeugen, bei denen präzise Vorhersagen für die Längsbeschleunigung von großer Bedeutung sind (z.B. Sportwagen), müssten genauere Maschinenkennfelder und -daten zur Verfügung stehen.

Die Verbrauchssimulation zeigte analog zur ersten Validierung [154] auch beim Tesla Model 3 gute Ergebnisse (Abbildung 3.6). Eine wichtige Voraussetzung war hier die Verwendung des genannten Motor XP Kennfelds, weil die ursprünglich implementierten PSM-Kennfelder aus Kalt [160] nicht mehr aktuelle BEV repräsentieren, wie bereits Nicoletti gezeigt hat [31]. Dieser konnte mit Daten aus [162] ähnlich gute Ergebnisse für den VW ID.3 mit diesem Kennfeld erzeugen.

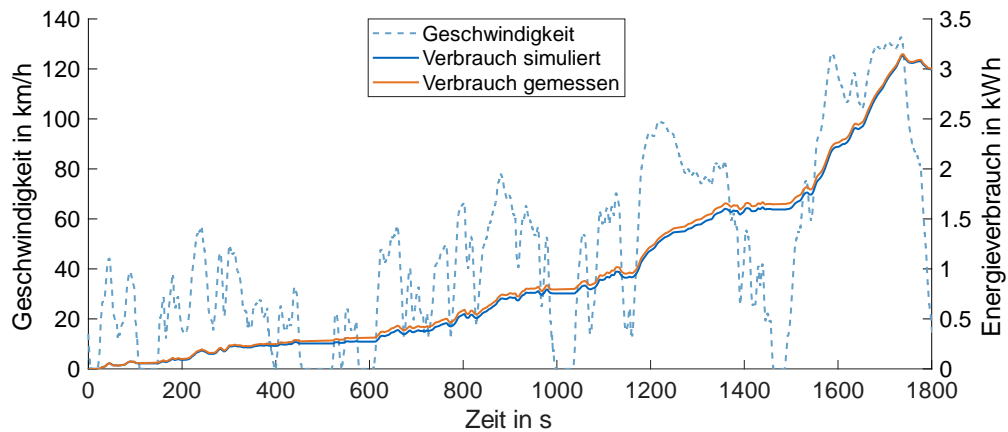


Abbildung 3.6: Validierung des Verbrauchssimulation der Längsdynamiksimulation anhand des Tesla Model 3 im WLTP-Fahrzyklus

Durch geschwindigkeitsunabhängige Roll- und Luftwiderstandsbeiwerte und einer unbekanntenen Rekuperationsstrategie kommt es zu geringen Unter- und Überschätzungen des Verbrauchs im Verlauf der Simulation. Dennoch kann der Verbrauch mit einer Abweichung der Gesamtverbräuche von 0,5% ausreichend genau abgebildet werden und bietet damit eine wichtige Grundlage für die spätere Berechnung der Batteriekapazität.

Komponentendimensionierung

Die drei wesentlichen Komponenten eines elektrischen Antriebsstrangs sind hinsichtlich der geometrischen Betrachtung die elektrische Maschine mit Getriebe und Differential, die Leistungselektronik und der Energiespeicher [165, S. 21]. Während die Auslegung der Maschine innerhalb der LDS erfolgt (Abbildung 3.4), weil deren Dimensionierung mit entsprechendem Effizienzkennfeld einen großen Einfluss auf die Berechnungen hat, wird die Batterie erst bei der Packageauslegung dimensioniert.

Voraussetzung für diese Reihenfolge ist die Vernachlässigung des Einflusses der Batterieform, -größe und internen Verschaltung auf den Wirkungsgrad der Batterie. Eine weitere Vereinfachung ist ein konstanter Wirkungsgrad, der unabhängig vom State-of-Charge (SOC) ist. Wie sich in der späteren Validierung zeigt, führen diese Annahmen zu ausreichend genauen Ergebnissen (Kapitel 3.3) und sind im Rahmen der Fahrzeugkonzeptauslegung vertretbar.

In dieser Arbeit werden acht Topologien betrachtet (Tabelle C.1). Radnabenmotoren, die innerhalb der Felge des Fahrzeugs platziert werden, werden trotz des Packagevorteils aufgrund ihrer hohen Kosten, ungefederter Massen und fehlender Erfahrung im Einsatz bei Serienfahrzeugen [73, S. 153] nicht betrachtet.

Die volumetrische (Kapitel 3.2.3) und gravimetrische Modellierung (Kapitel 3.2.5) der Komponenten wird in den folgenden Kapiteln beschrieben. Voraussetzung sind die in der LDS ermittelten Daten von Maschinendrehmoment, -leistung, Getriebeübersetzung und benötigter Energie im Fahrzyklus.

3.2.3 Packageauslegung

Der Innenraum kann bei AV aufgrund der reduzierten Randbedingungen die größte Veränderung erfahren (Kapitel 2.1.4). Weil Fahrzeuge in den meisten Fällen vom Innenraum beginnend nach außen entwickelt werden [73, S. 154], ist damit auch das gesamte Package betroffen. Das Package eines Fahrzeugs tritt wiederum in starker Wechselwirkung mit dem Design. So hängt nach Gilles [111, S. 8] das äußere Erscheinungsbild überwiegend davon ab, ob das Fahrzeug für einen maximalen Innenraum, schnelle Rundenzeiten oder den bestmöglichen Verbrauch bestimmt ist.

Im Folgenden wird eine neue Methodik zur Entwicklung des Packages von AV vorgestellt, die in [67] beschrieben und veröffentlicht ist und mit der Unterstützung durch die Studienarbeiten von Sabieraj [166] und Telschow [167] erarbeitet wurde. Gründe für den Bedarf einer neuen Methode sind die in Kapitel 3.1 genannten, veränderten Anforderungen und Probleme, bisherige Normen für neue Varianten von AV verwenden zu können. Die genaue Modellierung des Innenraums, Vorder- und Hinterwagens, sowie von Karosserie, Stauraum und Energiespeicher wird im Anschluss detailliert beschrieben.

Neue Methode zur Packageauslegung von autonomen Fahrzeugen

Typische Bestandteile des Packages sind Insassen, Interieur und Stauraum, Antriebsstrang, Räder, Fahrwerk und Karosserie [111, S. 24]. Diese werden in der folgenden Methode in Baugruppen zusammengefasst. Der Vorder- und Hinterwagen besteht aus Fahrwerk, Rädern und Antriebsstrang, der Innenraum beinhaltet das Interieur und die Insassen. Karosserie und Stauraum werden zuletzt als gemeinsame Baugruppe betrachtet. In Abbildung 3.7 sind die

wichtigsten Komponenten der genannten Baugruppen, die im Package des AuVeCoDe-Tools enthalten sind, in entsprechender Farbgebung dargestellt.

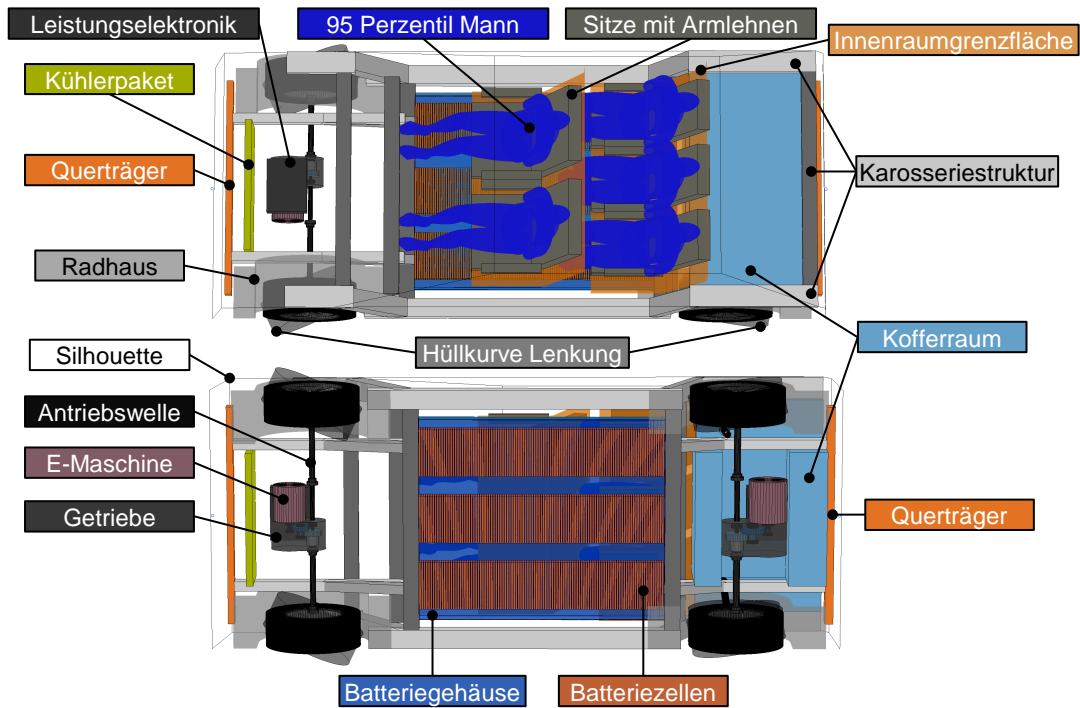


Abbildung 3.7: Komponenten im Fahrzeugpackage des AuVeCoDe-Tools [145]

Um eine hohe Flexibilität in der Gestaltung des Innenraums zu erreichen, müssen dessen Maße von den restlichen Fahrzeugbereichen entkoppelt werden. Durch den Entfall der Pedalerie bei fahrerlosen AV und damit verbundener Referenzpunkten wie dem Ferspunkt [65, S. 18] ist eine solche geometrische Kopplung zudem nicht mehr mit herkömmlichen Methoden möglich. Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, die den Innenraum, sowie Vorder- und Hinterwagen in einem ersten Schritt als separate Baugruppen betrachtet und in einem zweiten Schritt zusammenfügt (Abbildung 3.8). Durch die initial getrennte Auslegung der Baugruppen kann ein beliebiger Innenraum gestaltet werden, der sowohl Personen in beliebigen Sitzpositionen als auch Räume für den Gütertransport beinhalten kann.

Trotz einer initial getrennten Auslegung sind die Baugruppen über das Gesamtfahrzeug miteinander gekoppelt. Deshalb müssen in weiteren Schritten die Zusammenhänge zwischen den Baugruppen auf Gesamtfahrzeugebene iterativ angepasst werden. So hängt die Maschinendimensionierung im Vorder- und Hinterwagen von der Gesamtfahrzeugmasse ab (Kapitel 3.2.2), die sich wiederum mit den Gesamtfahrzeugabmessungen ändert (Kapitel 3.2.5). Letztere werden mitunter von der Innenraumgröße bestimmt, womit eine indirekte Kopplung zwischen Innenraummaßen und den Abmessungen des Vorder- und Hinterwagens besteht.

Ein weiterer Vorteil der Methode liegt in der Möglichkeit, weiterhin auch konventionelle BEV abzubilden und damit eine Grundlage für die spätere Validierung zu schaffen (Kapitel 3.3.1). Der einzige Mehraufwand besteht in der Konvertierung der Maße der Realfahrzeuge, meist auf Basis der SAE J1100, in die neue Methode.

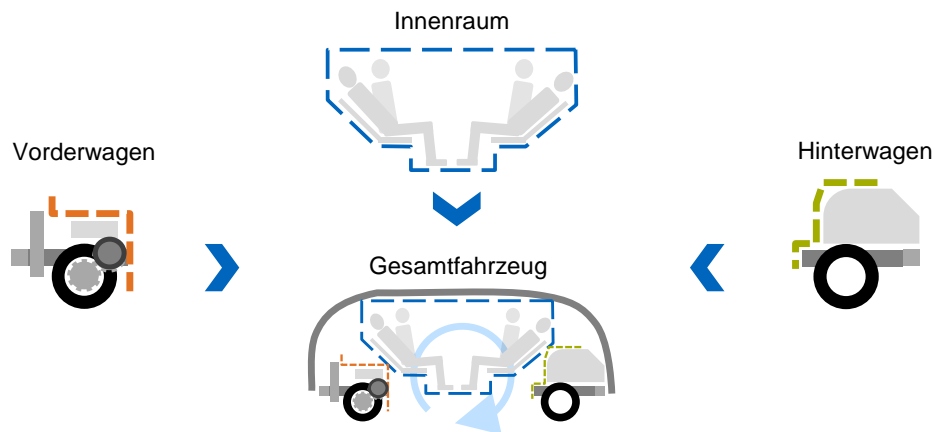


Abbildung 3.8: Aufbau der Methodik zur Packageauslegung nach [67]

Das Koordinatensystem musste entgegen der ISO 4130 [140] angepasst werden. Der Grund dafür ist der dreidimensionale Aufbau des Fahrzeugs beginnend beim Vorderwagen. Während einer Iteration können sich sowohl die Breite des Fahrzeugs in y-Richtung aufgrund des Antriebsstrangs und Innenraums und die Höhe des Radmittelpunktes in z-Richtung aufgrund der Reifengröße ändern. Deshalb wird der Ursprung auf den Boden gelegt und in die äußerste linke Fahrzeugseite mit gleicher x-Position wie der vordere Radmittelpunkt platziert (Abbildung 3.9).

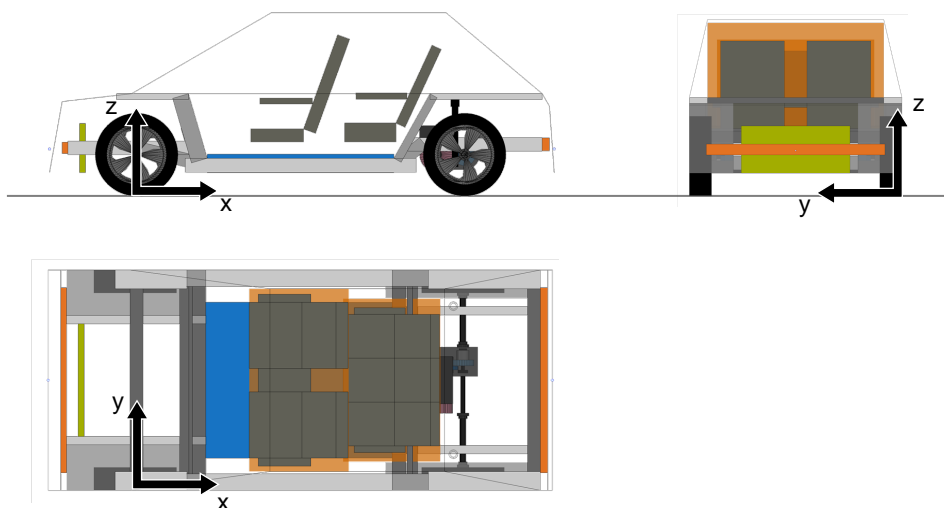


Abbildung 3.9: Festlegung eines geeigneten Koordinatenursprungs für die Methodik in dieser Arbeit

Die Maße gemäß Normen wie der SAE J1100 können weiterhin am fertig berechneten Fahrzeug ausgelesen werden und führen somit nicht zu Einschränkungen bezüglich bisher verwendeter Vorgehensweisen.

Innenraum

Trotz einer Vielzahl an möglichen Sitzkonfigurationen [64, S. 24], die mit der Methodik umsetzbar wären, wurden in der vorliegenden Arbeit nur drei zweireihige und eine einreihige Sitzkonfiguration implementiert (Abbildung 3.10), die am meisten bei Konzeptfahrzeugen verbreitet sind [67].

Die Konfiguration Rücken-an-Rücken hat zwar bisher wenig Akzeptanz erreicht, bietet aber Vorteile in der Aerodynamik, weil die Karosserie stromlinienförmiger gestaltet werden kann [64, S. 27]. Zusätzlich wird bei AV eine gute Trennbarkeit der Kabine ermöglicht, was im Hinblick auf Ride-Sharing wichtig ist, denn besonders beim Reisen mit Fremden werden Körperkontakt und überlappende Bewegungsräume als unangenehm empfunden [64, S. 33]. Zuletzt ermöglicht die Rücken-an-Rücken-Konfiguration für beide Sitzreihen ein freies Sichtfeld nach Außen, was besonders dem subjektiv höher wahrgenommenen Risiko bei AV [168, S. 352] entgegenwirken kann. Durch eine rückwärts gerichtete Sitzbank besteht aber analog zur Vis-à-vis Konfiguration ein Risiko für Reisekrankheit (Kapitel 2.1.4). Das Start-Up Page-Roberts [169] verfolgt das Rücken-an-Rücken-Layout bereits für eigene, manuell gesteuertes BEV und nennt besonders Vorteile hinsichtlich Kosten, Luftwiderstand und Masse wegen der teilweisen Unterbringung der Batterie zwischen den Sitzlehnen. Auf seitlich angeordnete Sitze wurde verzichtet, weil diese nach der UNECE R80 nur für Fahrzeuge der Klasse M₃ mit einer Gesamtmasse von über 10 t zugelassen sind [142, S. 2].

Weil durch den dauerhaften oder temporären Entfall der Fahraufgabe während des Betriebs neue Freiheiten für Nebentätigkeiten ermöglicht werden, muss mehr Raum für unterschiedliche Insassenhaltungen vorgehalten werden. Dirr [138] bietet dafür einen Ansatz, bei dem detaillierte, dreidimensionale Hüllkurven in Abhängigkeit von Nebentätigkeiten abgeleitet werden. Es wird jedoch weder eine Implementierung im Gesamtfahrzeugpackage beschrieben, noch ein konkretes Beispiel genannt. Deshalb wurde in dieser Arbeit die Möglichkeit vorgesehen, dass der Sitz zwischen zwei Maximalpositionen bewegt werden kann. Von weiteren Bewegungen wird auch aus dem Aspekt der Sicherheit abgesehen, weil diese das Verletzungsrisiko deutlich steigern können [43, S. 4]. Aus den genannten zwei Sitzpositionen wird die Grenzfläche für den Innenraum abgeleitet (Abbildung 3.10).

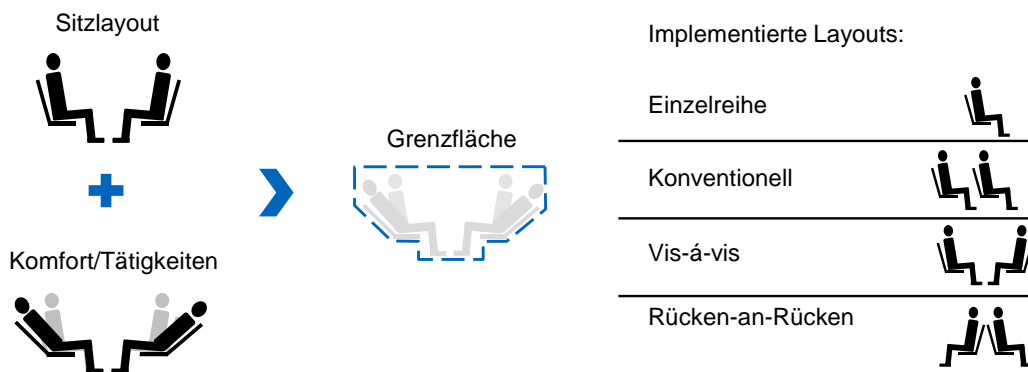


Abbildung 3.10: Auslegung des Innenraumpackages nach [67]

Um eine hohe Flexibilität bei den Maßketten im Innenraum zu erreichen, wurde eine neue Konvention für die gewählten Innenraumkonfigurationen eingeführt. Im Folgenden werden beispielhaft die Maßketten für die konventionelle Konfiguration gezeigt, alle anderen Konfigurationen sind in Anhang D aufgeführt. Es wird dabei zwischen den Maßketten der Grenzflächen und den Maßketten der Insassen, die gemeinsam mit Fahn [170] entwickelt wurden, unterscheiden.

Die Maßketten der Insassen werden für alle Sitzkonfigurationen nach dem gleichen Prinzip berechnet (Abbildung 3.11). Alle dafür benötigten Maße (Abbildung 3.11, 1-12) können vom Nutzer frei gewählt werden. Ausgehend von einer Sitzhöhe (Abbildung 3.11, 6), die erreicht werden soll, wird in negativer z-Richtung die Dicke der Sitzauflage (Abbildung 3.11, 9) addiert. Wenn ein

gewünschtes Verstellfeld der Sitzhöhe (Abbildung 3.11, 10) vorgesehen werden soll, wird dieses zusätzlich nach unten addiert. Die eingestellte Sitzhöhe (Abbildung 3.11, 6) stellt damit immer die höchstmögliche Position dar.

Die Sitztiefe in x-Richtung (Abbildung 3.11, 4) bestimmt die Länge der Sitzauflage. Eine Verstellmöglichkeit kann auch hier in x-Richtung vorgesehen werden. Dies kann entweder den gesamten Sitz betreffen oder nur eine verstellbare Oberschenkelauflage. Die Länge des Fußraums setzt sich aus der Summe der Schuhlänge und dem zusätzlichen freien Fußraum zusammen.

Auf Basis von einem oder zwei gewählten Lehnenwinkeln (Abbildung 3.11, 11 und 12) kann der Raum für den Oberkörper mit gegebener Länge (Abbildung 3.11, 7) berechnet werden. Obwohl entsprechend Platz für eine Rückenlehne über die gesamte Oberkörperlänge vorgehalten wird, kann die Rückenlehne auch kürzer als der Oberkörper gewählt werden. Damit wird dem Nutzer ermöglicht, die Rückenlehne analog zum ÖPNV deutlich kürzer als die Rumpflänge der Passagiere gestalten zu können und in der Packageabbildung darzustellen. Bei der Auswahl von zwei unterschiedlichen Lehnenwinkeln, wird der minimale Winkel für die maximalen Maße der Grenzfläche in x-Richtung verwendet, während der maximale Lehnenwinkel die Höhe der Grenzfläche in z-Richtung bestimmt. So bestimmt die aufrechte Sitzposition mit der größten Person die Höhe der Kabine, die flache Sitzposition bestimmt ihre Länge. Die Sitzposition mit der kleinsten Person bestimmt wiederum die maximale Größe des Bauraums unterhalb des Sitzes.

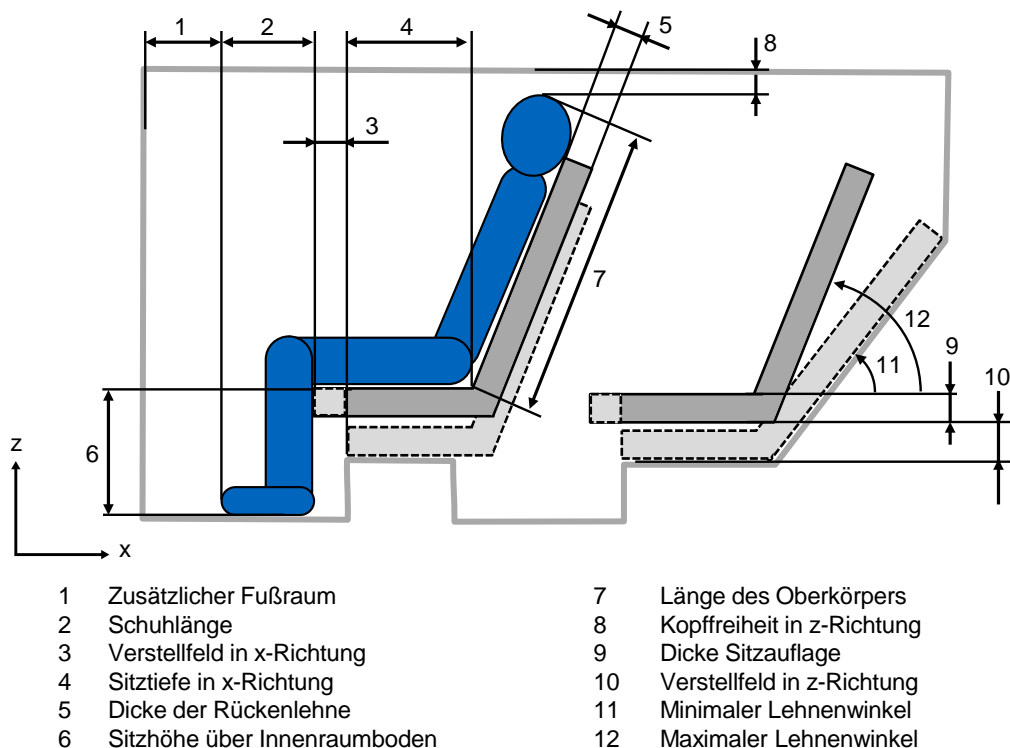


Abbildung 3.11: Maßkette ausgehend vom Insasse bis zur Grenzfläche in Anlehnung an [170] am Beispiel der konventionellen Sitzkonfiguration. Alle Maße sind für jede Reihe separat einstellbar.

Nach der Berechnung des Platzbedarfs durch die Insassen wird die Grenzfläche berechnet. Diese wird analog zur Insassenberechnung (Abbildung 3.11) für jede Reihe extra gebildet und wird aus dessen Ergebnissen ebenfalls mit Maßketten berechnet (Abbildung 3.12). Die Kombination aller Sitzeinstellungen bestimmt wie oben beschrieben die äußeren Maße.

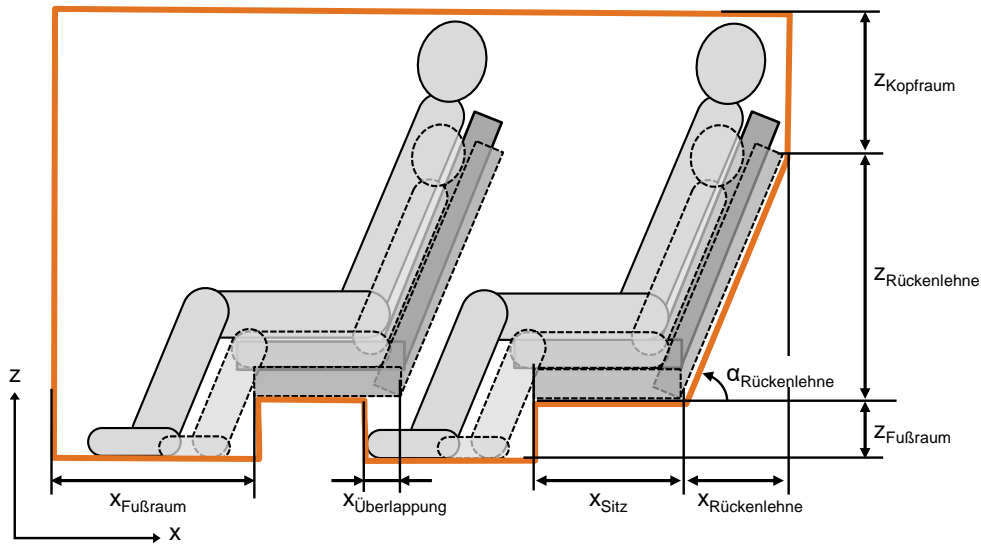


Abbildung 3.12: Maßkette der Innenraumgrenzfläche (orange) am Beispiel der konventionellen Sitzkonfiguration. Alle Maße außer $X_{\text{Überlappung}}$ sind für jede Reihe separat einstellbar.

Für die spätere Optimierung kann statt den z-Werten des Fußraums (Abbildung 3.11, 6 und 10) auch das aus der SAE J1100 bekannte H30-Maß verwendet werden. Bei der Variation dieses Maßes wird $Z_{\text{Fußraum}}$ (Abbildung 3.12) aus der Differenz des H30-Maßes und dem bekannten Abstand des Hüftpunktes zur Unterseite des Sitzpolsters berechnet.

Für die visuelle Abschätzung des Platzes im Innenraum ist es wichtig, eine Bezugsgröße abzubilden. In der Ergonomie wird für das Maximalmaß im Innenraum in den meisten Fällen der 95. Perzentil Mann verwendet [80, S. 182]. Aus diesem Grund ermöglicht das AuVeCoDe-Tool ein Mannequin mit den Maßen des 95. Perzentil Mannes im Fahrzeug in der eingestellten Sitzposition zu plotten (Abbildung 3.13). Die Bein- und Oberkörperhaltung wird entsprechend der eingestellten Sitzgrößen angepasst. Bei geringer Beinfreiheit werden die Beine angewinkelt (Abbildung 3.13a), bei hoher Beinfreiheit hingegen so ausgestreckt, dass die Oberschenkel noch aufliegen und die Fersen den Boden berühren (Abbildung 3.13b).

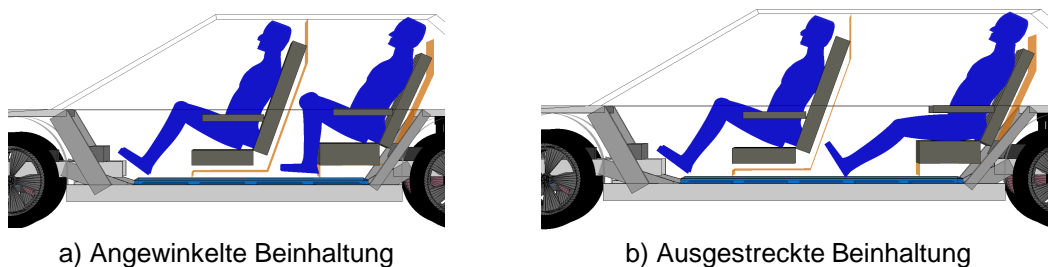


Abbildung 3.13: Implementierung eines 95-Perzentil Mannes mit einer dem Fußraum entsprechender Beinhaltung zur Visualisierung des Platzes im Innenraum

Die Darstellung der Mannequins dient ausschließlich der Visualisierung. Wird beispielsweise die Dachhöhe zu niedrig gewählt, kollidiert der Kopf des Mannequins mit dem Dach. Dies bildet die Realität ab, weil insbesondere Coupés mit nach hinten abfallender Dachlinie meist auf der Rückbank nicht ausreichend Platz für einen 95-Perzentil Mann bieten und eine gebeugte Haltung eingenommen werden muss, um ein Anstoßen zu vermeiden.

Vorder- und Hinterwagen

Im Vorder- und Hinterwagen müssen Komponenten aus allen Bereichen des Fahrzeugs untergebracht werden. Dazu gehören Antrieb, Fahrwerk, Karosserie, Thermomanagement und Elektrik/Elektronik. Zunächst soll kurz die Dimensionierung der Komponenten beschrieben und im Anschluss die daraus resultierende Auslegung des Vorder- und Hinterwagenpackage beschrieben werden.

Ausgangspunkt für die volumetrische Dimensionierung der Komponenten sind sowohl die Nutzereingaben (Kapitel 3.2.1) als auch die berechneten Eigenschaften des Antriebsstrangs (Kapitel 3.2.2). Nicoletti [31] hat auf Basis von Realfahrzeugdaten der Benchmarkplattform a2mac1 [171] Regressionen für sämtliche Komponenten erstellt. So können beispielsweise anhand der Maximalleistung der Maschine das Volumen und entsprechende Abmessungen berechnet werden. Die Regressionen für elektrische Maschine, Bremse, Reifen und Fahrwerk konnten aus dieser Arbeit übernommen werden. Eine detaillierte Beschreibung der Berechnung der Felgen- und Reifengrößen, der Validierung des Modells und der daraus möglichen Ableitung der Abmessungen des Radhauses ist in [172] beschrieben.

Die Getriebeauslegung, die von Nicoletti [173] und Köhler [174, 175] entwickelt und validiert wurde, konnte ebenfalls implementiert werden. Die Auslegung beinhaltet Stirnradgetriebe in paralleler und koaxialer Ausführung und Planetengetriebe in koaxialer Ausführung. Im Package wurde in dieser Arbeit bei parallelem Stirnradgetriebe zusätzlich ein Winkel zwischen der Abtriebs-Maschinen-Verbindungsachse und der Horizontalen eingeführt (α bei Variante c in Abbildung 3.14). In der Dissertation von Nicoletti [31] kann hingegen nur zwischen Variante a) ($\alpha=0^\circ$) und Variante b) ($\alpha=180^\circ$) unterschieden werden. Mit dem nun frei wählbaren Winkel α soll unter der Berücksichtigung der freien Crashlänge im Folgenden der Lösungsraum für die Ermittlung optimaler Konfigurationen vergrößert werden.

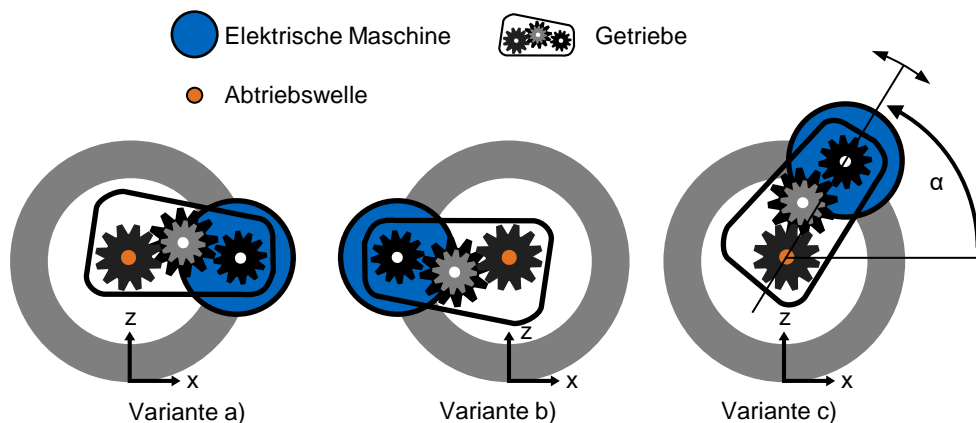


Abbildung 3.14: Positionierung des parallelen Stirnradgetriebes

Für weitere Komponenten im Vorderwagen wie dem Klimakompressor, Niedervoltbatterie, Klimagerät und Kühlmittelbehälter wurden die Volumina der Bauräume der Vorderwagen von 21 BEV gemessen und um das Volumen der Antriebseinheit und des Kofferraums reduziert. Insbesondere weil die Dimensionierung und Platzierung dieser einzelnen Komponenten in der frühen Entwicklungsphase noch kaum möglich und von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich ist, soll die Verwendung eines Ersatzvolumens als Ersatzmodell für die Komponenten genutzt werden. Das gemessene, durchschnittliche Komponentenvolumen beträgt 349 Liter mit einer Standardabweichung von 9% und wurde in der Auslegung des Vorderwagens berücksichtigt.

Die Bauteile und -gruppen im Vorder- und Hinterwagen können einen primären und sekundären Einfluss auf die geometrische Gestaltung haben (Abbildung 3.15). Der primäre Einfluss wird durch deren Position und Bauraum, den sie im verbauten Zustand einnehmen, bestimmt. Der sekundäre Einfluss basiert auf der Blockbildung von Komponenten im Crashfall. Damit im Falle einer Kollision die Energie des Aufpralls durch Deformation abgebaut werden kann, wird entsprechender freier Raum in Stoßrichtung benötigt [176, S. 69]. Wird nicht ausreichend davon für die Verzögerung ermöglicht, kann dies eine deutliche Erhöhung der Insassenbeschleunigung und damit ein erhöhtes Verletzungsrisiko zur Folge haben [177, S. 162]. Dieser Raum, dessen Länge freie Crashlänge genannt wird, ist in Bereichen zu finden, in denen ausschließlich verformbare Bauteile liegen. Nahezu starre Körper, auch blockbildende Komponenten genannt [73, S. 157], werden lediglich verschoben und führen im schlechtesten Fall zu einer Intrusion in den Innenraum. Obwohl jede Komponente einen deformierbaren und starren Anteil hat, werden für die Blockbildung Komponenten betrachtet, die einen hohen starren Anteil haben. Dazu gehören insbesondere die Antriebseinheit mit Maschine und Getriebe [73, S. 157].

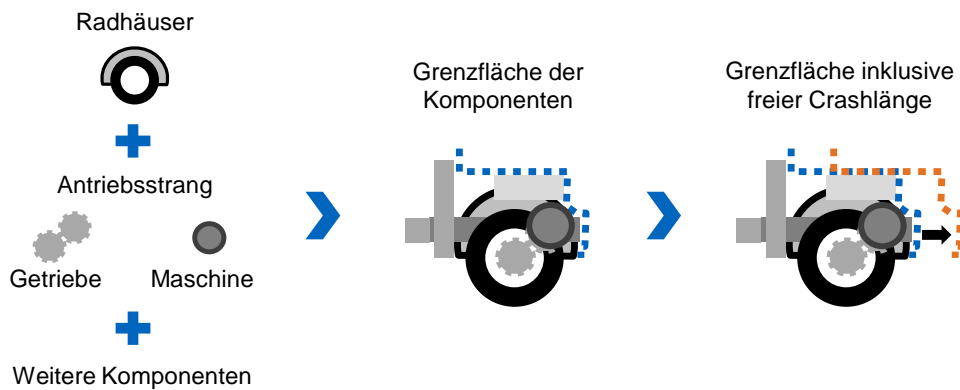


Abbildung 3.15: Auslegung des Vorder- und Hinterwagenpackages nach [67]

Für das Erreichen einer gewünschten freien Crashlänge muss zuerst die bereits vorhandene ermittelt und bei zu geringer Länge durch Anpassung der Grenzfläche erweitert werden (Abbildung 3.15). Bei diesem Vorgehen werden die Querschnitte der Bauteilgeometrien in der xz-Ebene betrachtet. In dieser Arbeit wurden die blockbildenden Komponenten (z.B. Maschine, Getriebe, Anteile des Kühlpaketes) als Extrusionsprofil in y-Richtung angenommen, was dazu führt, dass die Schnitte in der xz-Ebene in y-Richtung über das gesamte Bauteil gleich sind (Abbildung 3.16).

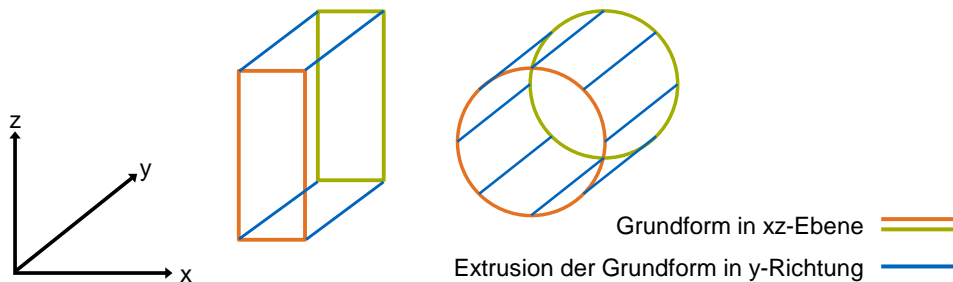


Abbildung 3.16: Aufbau von blockbildenden Komponenten

Für die Berechnung der freien Crashlänge reicht es mit dieser Methode aus, nur die in y-Richtung äußeren Profile (orange und grün in Abbildung 3.16) pro Bauteil zu betrachten, weil das

Bauteil zwischen diesen die gleiche Form hat. Bei n Bauteilen führt das zu $2 \cdot n$ Berechnungen. Bei jeder dieser Berechnungen in der xz -Ebene werden die Querschnitte aller Bauteile berücksichtigt, die von dieser Ebene geschnitten werden. Jeder Bauteilschnitt wird in eine Vorderseite (braun in Abbildung 3.17) und eine Rückseite (orange in Abbildung 3.17) unterteilt.

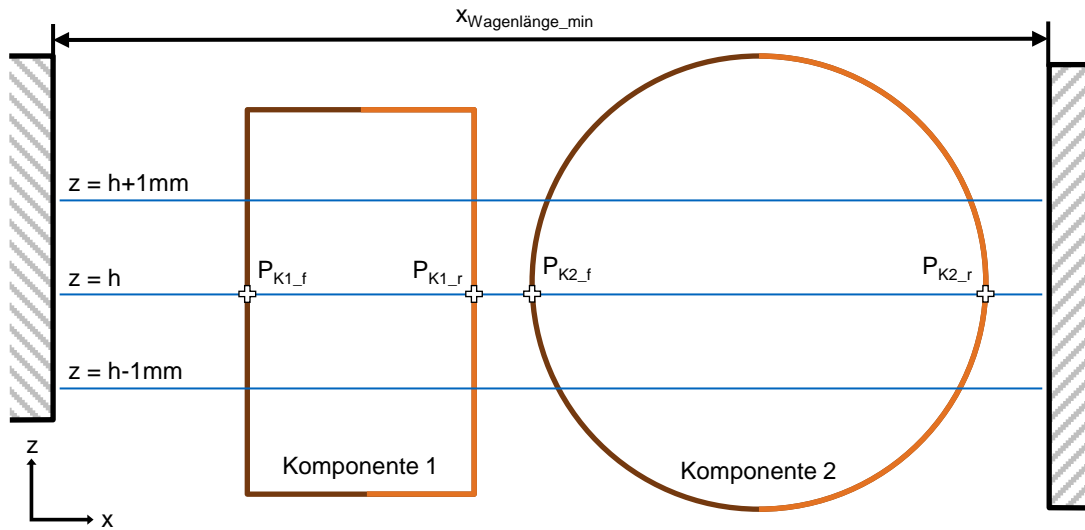


Abbildung 3.17: Berechnung der freien Crashlänge in der Höhe $z = h$ mit den blockbildenden Komponenten 1 und 2 und der verfügbaren Wagenlänge $x_{Wagenlänge_min}$

Grund dafür ist die Repräsentation der Vorder- und Rückseite durch jeweils einen Vektor, dessen Zeilennummer für jede z -Koordinate in mm stehen und der Zeilenwert die jeweilige x -Koordinate enthält (Gl. (3.3)). P_{K1_f} und P_{K2_f} stehen für die Punkte der blockbildenden Komponente 1 (K1) und Komponente 2 (K2) im dreidimensionalen Koordinatensystem, die für jede Höhe z ermittelt werden können.

$$\vec{v}_{K1_f} = \begin{pmatrix} \dots \\ P_{K1_f}(1) \\ \dots \end{pmatrix} \quad \vec{v}_{K1_r} = \begin{pmatrix} \dots \\ P_{K1_r}(1) \\ \dots \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Die minimal verfügbare Crashlänge kann mit Gl. (3.4) berechnet werden. Es wird vereinfachend angenommen, dass sich jede Komponente im Crashfall ausschließlich in x -Richtung verschiebt. Bei einem realen Zusammenstoß können sich Komponenten auch in andere Raumrichtungen bewegen und aneinander abgleiten. Solch komplexe Vorgänge müssen jedoch in aufwändigen FEM-Simulationen und Realversuchen abgebildet werden, was in einer solch frühen Phase des Entwicklungsprozesses nicht möglich ist.

$$l_{freieCl_min} = x_{Wagenlänge_min} - \max(\vec{v}_{K1_r} - \vec{v}_{K1_f} + \vec{v}_{K2_r} - \vec{v}_{K2_f}) \quad (3.4)$$

Für den Fall, dass die ermittelte, minimale freie Crashlänge $l_{freieCl_min}$ die gewünschte freie Crashlänge unterschreitet, ist bei einem Aufprall mit Intrusion von Bauteilen in den Innenraum zu rechnen. Folglich muss die Distanz zwischen Innenraum und blockbildenden Komponenten vergrößert werden.

Die Komponenten im Vorder- und Hinterwagen bestimmen durch ihre Position und deren benötigten Bauraum die Länge des Vorder- und Hinterwagens. Die Freiräume zwischen blockbildenden Komponenten (z.B. Antriebsstrang) ergeben in Summe die tatsächlich verfügbare, freie Crashlänge. Die geforderte freie Crashlänge kann demnach geringer als die

tatsächliche freie Crashlänge sein, weil der Vorder- oder Hinterwagen z.B. aufgrund des Radhauses eine Mindestgröße haben muss (Abbildung 3.18 links) [67, S. 2377].

Erst wenn die geforderte Crashlänge die tatsächliche Crashlänge überschreitet, muss das Package angepasst werden. Der Betrag der Anpassung entspricht dabei nicht der Differenz aus der neuen und alten geforderten Crashlänge, sondern aus der neuen geforderten Crashlänge und der tatsächlichen Crashlänge im Ausgangszustand (Abbildung 3.18 Mitte). Im gezeigten Beispiel muss demnach der Innenraum nicht um 200 mm, sondern um 46 mm weg vom Vorderwagen verschoben werden, um die geforderte Crashlänge von 600 mm statt 400 mm zu erreichen. Wenn die geforderte freie Crashlänge die tatsächliche Crashlänge des Ausgangszustandes einmal überschritten hat, entspricht jede Erhöhung der geforderten Crashlänge auch der Erhöhung der tatsächlichen Crashlänge (Abbildung 3.18 rechts). Im Beispiel führt die Erhöhung der geforderten Crashlänge um weitere 200 mm auf 800 mm folglich zu einer Verschiebung des Innenraums um 200 mm.

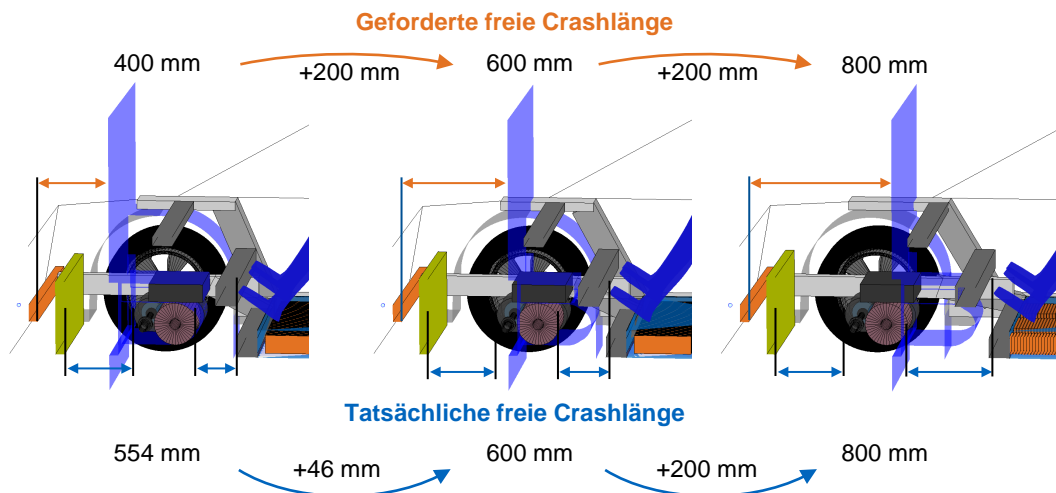


Abbildung 3.18: Verhalten von tatsächlicher im Vergleich zur geforderten Crashlänge nach [67, S. 2377]

Karosserie und Stauraum

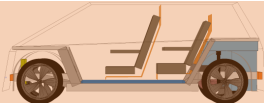
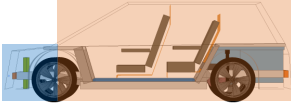
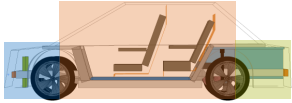
Sowohl der Stauraum als auch die Karosserie wurde in vergangenen Arbeiten im Bereich der FKE (Kapitel 2.2.2) nur teilweise betrachtet. Matz [57, S. 44-45] und Kuchenbuch [29, S. 80] betrachten den Kofferraum nur im Hinterwagen und als einfache Geometrie. Sie verwenden dabei nicht die Bestimmung des Kofferraumvolumens mit Prüfkörpern nach der DIN 70020-1 [178, S. 45-51], sondern das theoretisch mögliche Gesamtvolumen.

Die Karosserie wurde sowohl von Kuchenbuch [29] und Matz [57] nur hinsichtlich ihrer Masse berücksichtigt. Nicoletti [31] modelliert Abschnitte der Karosserie durch die Berücksichtigung der Längsträger im Vorderwagen. Rossbacher modelliert das Package der Karosserie mit einer einfachen Strukturauslegung in einem separaten Programm [25, S. 186]. Diesem können die aus dem Package auslesbaren Punkte übergeben und eine grobe Struktur berechnet werden. Weil die Berechnung jedoch für jede Iteration zusätzliche Rechenzeit benötigt und die Rückgabe der neuen Karosseriemaße manuell erfolgen muss, ist das Vorgehen für diese Arbeit nicht möglich. Münster [113] betrachtet die Karosserie erst im Anschluss an ein Grobpackage und führt Topologieoptimierungen durch.

Für diese Arbeit stellt sich die Herausforderung neuer Karosserieformen durch die neuen Freiheitsgrade bei AV. Der Kofferraum wird seit vielen Jahrzehnten im Heck des Fahrzeugs platziert, weil der Vorderwagen meistens mit einem großvolumigen Motor gefüllt ist und die Sicht des Fahrers nach vorne nicht beeinflusst werden darf. Daraus folgen die bekannten Karosserieformen, die entweder nach vorne und hinten einen abgesenkten Wagen haben (Limousine), oder hinten einen integrierten Kofferraum und einen abgesenkten Vorderwagen haben (Kombi, SUV). Der Gepäckraum, die Karosserieform und die Silhouette des Fahrzeugs sind folglich eng miteinander verknüpft.

Neben den üblichen Karosserieformen (Limousine, Coupé, etc.) kann die Fahrzeugform mit wenigen Ausnahmen mit nur drei Fahrzeuggrundformen beschrieben werden: Die One-, Two- oder Three-Box Ausführung [73, S. 141, 111, S. 73] (Tabelle 3.4). Hauptmerkmal ist die Unterscheidung, ob der Vorder- oder Hinterwagen sich sowohl optisch als auch funktional vom Innenraum abgrenzen [73, S. 141]. Während beim Two-Box- und Three-Box-Fahrzeug der Vorderwagen als Motorraum optisch abgegrenzt ist, wird beim One-Box-Design nur ein Volumen wahrgenommen. Der hintere Gepäckraum ist wiederum nur beim Three-Box Design optisch und meist auch räumlich vom restlichen Fahrzeug getrennt.

Tabelle 3.4: Fahrzeuggrundformen und Anwendungsbeispiele nach [73, S. 141]

| One-Box | Two-Box | Three-Box |
|--|--|--|
|  |  |  |
| Vans Kleinwagen (z.B. Smart) „Robo-Taxi“ | Kombifahrzeuge SUV Kompaktklasse | Limousine Coupé Cabrio |

Durch das deutlich kleinere Volumen des elektrischen Antriebsstrangs kann bei BEV eine Umgestaltung des Packages stattfinden [113, S. 3688]. Weil der Vorderwagen dadurch kürzer und der Radstand durch die Batterie meist länger ausfällt [75, S. 581], ähneln BEV nach dem Purpose-Design wie der VW ID.3 oder der Mercedes EQS zunehmend dem One-Box Design. Immer mehr BEV haben weiterhin durch den freigewordenen Raum im Vorderwagen dort einen zusätzlichen Kofferraum, der „Frunk“ genannt wird [179, S. 12].

Oben genannte Besonderheiten von elektrischen und autonomen Fahrzeugen erfordern deshalb einen neuen Freiheitsgrad in der Platzierung des Kofferraums und der daraus folgenden Gestaltung der Karosserie und Außensilhouette. Deshalb wurde im Rahmen von zwei Studienarbeiten gemeinsam mit Mast [180, 181] eine Modellierung des Kofferraummodells und der Karosserie gestaltet. Deren wichtigsten Aspekte werden im Folgenden erläutert.

Der erste Schritt der Auslegung ist die Modellierung des Kofferraumvolumens. Eingangsgröße ist das gewünschte Kofferraumvolumen und die Verteilung des Volumens auf den Vorder- und Hinterwagen. Mast [180] hat eine Einteilung des Kofferraums in vier Bereiche pro Achse vorgenommen (Abbildung 3.19). Drei der Bereiche befinden sich um den Antriebsstrang herum, falls dieser an der Achse vorhanden ist. Diese Bereiche befinden sich zwischen den Radhäusern und sind maximal so hoch wie deren Oberkante. Der obere Bereich beginnt oberhalb der Radhäuser und nimmt einen Großteil der Fahrzeugbreite ein.

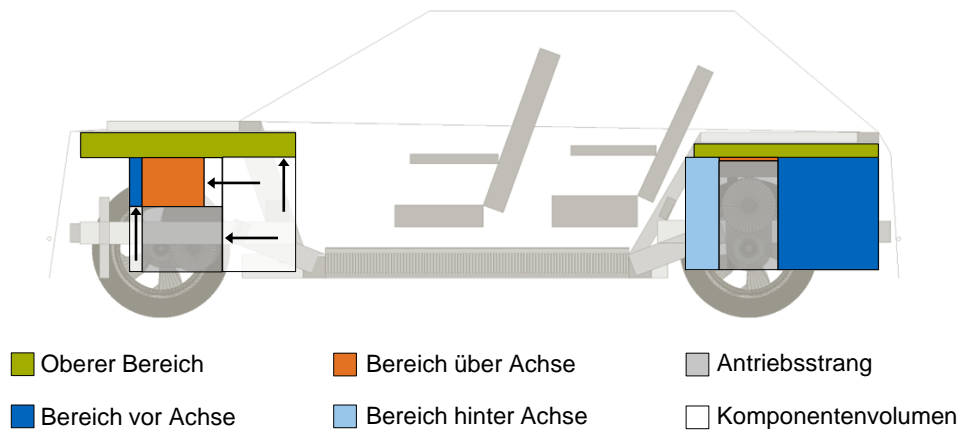


Abbildung 3.19: Modellierung des Kofferraumvolumens im Vorder- und Hinterwagen nach Mast [180]

Wie bereits im Kapitel Vorder- und Hinterwagen erwähnt, wurde ein Komponentenvolumen im Vorderwagen umgesetzt. Dieses verdrängt die Kofferraumbereiche vom Boden im Innenraum beginnend nach oben und Richtung Fahrzeugäußeres [180, S. 40] (Pfeile in Abbildung 3.19). Im Hinterwagen kann auch ein Komponentenvolumen berücksichtigt werden, aufgrund fehlender Daten wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet. Nach der Ermittlung der einzelnen Kofferraumbereiche wird das Referenzvolumen nach DIN 70020-1 [178, S. 45-51] nach dem Vorgehen von Mast [180, S. 44-47] mit Prüfkörpern des Typs B der ISO 3832 [136] ermittelt.

Ein einfaches Karosseriemodell wurde aus drei Gründen in dieser Arbeit umgesetzt. Erstens sollen Teile der Karosserie berücksichtigt werden können, die unabdingbar für die Fahrzeugstruktur sind und damit Packageraum benötigen. Dazu gehören beispielsweise die Längs- und Querträger im Vorder- und Hinterwagen. Zweitens soll eine einfache Silhouette die Komponenten einschließen, damit im weiteren Verlauf die Klimaanlage- (Kapitel 3.2.4) und Masseberechnung (Kapitel 3.2.5) durchgeführt werden können. Zuletzt soll dem Nutzer eine visuelle Orientierung gegeben werden, an welchen Bereichen die Karosserie voraussichtlich Packageraum einnehmen wird. Das Modell verzichtet dabei auf eine Berechnung der einzelnen Querschnitte und Blechdicken, sondern verwendet auf Basis von bestehenden Karosserien von BEV empirische Maße der einzelnen Querschnitte. Die Modellierung ist in der Arbeit von Mast [181] detailliert beschrieben. Sie umfasst die unteren Bereiche der Karosseriestruktur und die Fahrzeugsilhouette (Abbildung 3.20).

Zur Erstellung der Silhouette muss der Nutzer sowohl einen vorderen Scheibenwinkel α als auch einen hinteren Scheibenwinkel β wählen. Wird für Vorder- oder Hinterwagen ein abgeschlossener Gepäckraum gewählt, beginnt die Scheibe möglichst am oberen Innenraum und wird unter festgelegtem Winkel nach unten gezogen (1 in Abbildung 3.20). Wird hingegen ein integrierter Gepäckraum gewählt, so beginnt die Scheibe am äußersten Bereich des Fahrzeugs und verläuft unter gewähltem Winkel nach oben (2 in Abbildung 3.20).

Für den Fall, dass ein AV weiterhin von einem Fahrer gesteuert werden kann, muss es gültige Verordnungen erfüllen (Kapitel 3.1.1). Die Prüfung der Erfüllung der entsprechenden Verordnung UNECE R125 [125] für das Sichtfeld eines Fahrzeugführers wurde ebenfalls von Mast [181, S. 54-55] umgesetzt. Sie kann optional eingestellt werden, gilt aber nur für Sitzkonfigurationen, bei denen der Fahrer in Fahrtrichtung orientiert ist und damit eine der Zulassungsvoraussetzungen erfüllt.

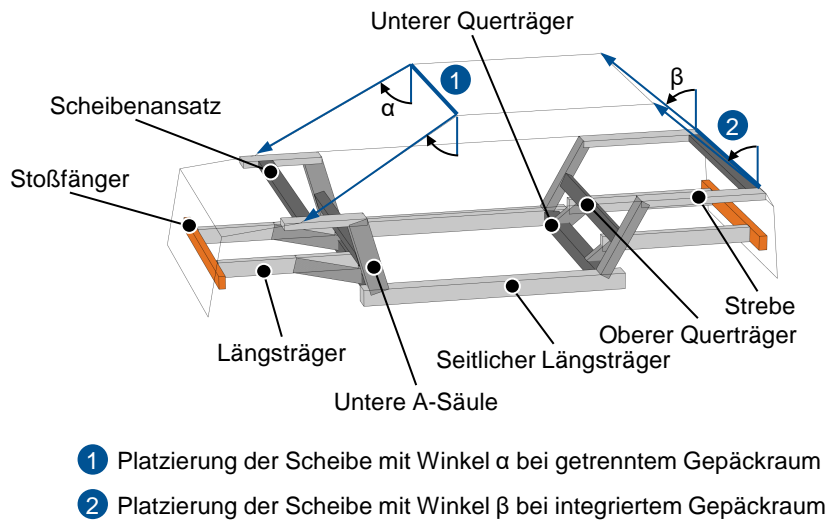


Abbildung 3.20: Modellierung der wichtigsten Karosserieteile und Silhouette nach Mast [181].

Energiespeicher

Stefaniak [182] und Nicoletti [31, 183] beschreiben Möglichkeiten zur Auslegung von Energiespeichern für BEV und orientieren sich an bestehenden Normen wie der SAE J1100 bzw. der DIN 70020-1. Erster Schritt ist jeweils die Ermittlung des verfügbaren Bauraums, der für den Energiespeicher nutzbar ist. Während durch das veränderte Package dieser Schritt in der vorliegenden Arbeit abweicht und damit neu erstellt werden muss, kann die Befüllung der Bauräume von Nicoletti übernommen werden. Diese erfolgt mit verschiedenen Zelltypen und -größen unter Berücksichtigung einer realisierbaren Verschaltung ähnlich wie bei Matz und Kuchenbuch [29, S. 66, 57, S. 49].

Der für den Hochvoltpeicher verfügbare Bauraum wird in dieser Arbeit in drei Bereiche unterteilt (Abbildung 3.21). Der Bereich zwischen dem Innenraumboden und dem Fahrzeugboden bietet Platz für die Unterbodenbatterie (Underfloor (UF)). Die Höhendifferenz der beiden Böden $Z_{\text{Batterie_UF}}$ bestimmt die mögliche Höhe der Batterie. Die Breite in y -Richtung wird von der Fahrzeugbreite bestimmt und um die seitliche freie Crashlänge reduziert. Die Länge der Unterbodenbatterie $X_{\text{Batterie_UF}}$ wird durch die angrenzenden Hüllkurven des Vorder- und Hinterwagens und einem Toleranzabstand d_{Toleranz} bestimmt. Diese beziehen wie oben erwähnt auch die freie Crashlänge mit ein.

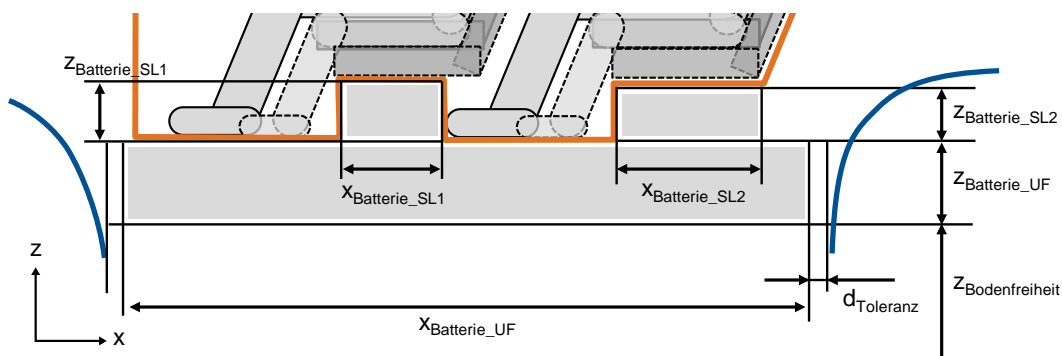


Abbildung 3.21: Maßketten zur Berechnung der verfügbaren Bauräume Second Level 1 und 2 (SL1/2) und Underfloor (UF) für den Energiespeicher bei der konventionellen Sitzkonfiguration

Weil je nach gewählter Sitzhöhe Platz für den Energiespeicher unterhalb der Sitze bleibt, können auch diese Bereiche genutzt werden (Second Level 1/2 (SL1/2)). Deren Höhe $Z_{\text{Batterie_SL1/2}}$ und Länge $x_{\text{Batterie_SL1/2}}$ lässt sich aus den Maßen des Innenraums berechnen (Abbildung 3.12). Die Breite entspricht der maximalen Innenraumbreite, damit die Batterie nicht innerhalb der freien Craschlänge liegt.

Die Maßketten zur Bestimmung der Batterieräume sind für alle anderen Sitzkonfigurationen in Anhang D aufgeführt. Bei einer einreihigen Sitzanordnung bleibt entsprechend nur Platz für eine Batterie unterhalb der ersten Sitzreihe, bei der Rücken-an-Rücken-Konfiguration befindet sich statt einer zweiten Untersitz-Batterie eine Batterie oberhalb der ersten zwischen den Sitzlehnen (Abbildung D.7).

3.2.4 Modellierung der Nebenverbraucher

Wegen zunehmender Sensorik und einer Erhöhung der benötigten Rechenleistung, ist ein steigender Nebenverbrauch bei AV Gegenstand von zahlreichen Untersuchungen. Im Folgenden werden zwei Arbeiten verglichen, die eine gesammelte Betrachtung der Komponenten vorgenommen haben (Tabelle 3.5).

Liu et al. [102] quantifizieren den Mehrverbrauch für AV und sammeln für jede Komponente aus Datenblättern und Veröffentlichungen den angegebenen Verbrauch. Zur Berechnung des Verbrauchs im Gesamtsystem verwenden sie durch Experten gewonnene Zeit- und Intensitätsfaktoren. Damit soll ein möglichst genaues Systemverhalten abgedeckt werden, weil die Komponentenhersteller oft maximale und nicht durchschnittliche Verbräuche angeben. Gawron et al. [23] unterscheiden nicht zwischen verschiedenen Leveln, sondern zwischen drei Größen innerhalb des Level 4. Ihr Verbrauch fällt mit maximal 327W deutlich geringer als die 1102W bei Liu et al. aus, weil insbesondere für die Recheneinheit nur mit zweimal 96 W statt mit zweimal 500W bei Liu gerechnet wurde. Weiterhin betrachten sie Komponenten wie das Gateway und verschiedene Technologien zur Innenraumüberwachung im Gegensatz zu Liu et al. nicht als Teil des autonomen Systems.

Tabelle 3.5: Verbrauch von autonomen Fahrsystemen in Abhängigkeit von deren Autonomiestufe

| Autor | System | Verbrauch |
|--------------------|---|---|
| Liu et al. [102] | Level 3 / Level 4 / Level 5 | 586W ¹ / 1102W ¹ / 1311W ¹ |
| Gawron et al. [23] | Level 4 klein / Level 4 mittel / Level 4 groß | 222W / 240W / 327W |

¹ Verbrauch wurde als Summe gemäß der gegebenen Tabelle berechnet

Für diese Arbeit bildet die ausführlichere Listung der Verbräuche pro Komponente von Liu et al. in Abgleich mit der Listung von Gawron et al. die Grundlage für die Berechnung des Nebenverbrauchs durch die autonome Fahrfunktion. Beide Arbeiten listen zudem einzelne Komponentenmassen, die ebenfalls bei Auswahl in der Berechnung des Gesamtfahrzeugs berücksichtigt werden. Die Zusammensetzung des Sensorsetups muss vom Nutzer unter eigenen Annahmen gewählt werden, weil eine Vorgabe eines fixen Sensorsetups durch die weiterhin unklare Entwicklung der nächsten Jahre im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist. Die Zeit- und Intensitätsfaktoren von Liu et al. wurden nicht übernommen, weil deren Angabe nach Aussage der Autoren subjektiv sind und nicht überprüft werden können. Für eine genaue Ermittlung des

Verbrauchs müsste ein bereits funktionierendes System detailliert vermessen werden. Solche Daten standen aber für diese Arbeit nicht zur Verfügung.

In Kapitel 2.1.4 wurde die Klimatisierung des Innenraums als größter Nebenverbraucher identifiziert. In bisherigen Arbeiten (Kapitel 2.2.2) wurde sie dennoch nicht betrachtet, weil ihr Verbrauch bei der Auslegung von sowohl ICEV als auch BEV aktuell im europäischen Raum nicht berücksichtigt wird. Im amerikanischen Raum wird bisher nur bei einem Teil der Supplemental Federal Test Procedure (SFTP), dem SC03 [184], die Klimaanlage berücksichtigt [185, S. 3]. Im SC03 wird das Fahrzeug in einer Klimakammer bei 35 °C und einer Sonneneinstrahlung von 850 W/m² mit eingeschalteter Klimaanlage betrieben [185, S. 3, 186, S. 103] und trägt zu realistischeren Werten für Gesamtverbrauch und Emissionen für den Kunde bei.

Bei AV, insbesondere als Teil einer Flotte, ist die Kenntnis über die reale Reichweite wichtig für den Betrieb. Zoox [187, S. 3] zeigt mit einem intelligenten Thermomanagement die wichtige Rolle der Klimatisierung bei AV. Die Berechnung des aktuellen und voraussichtlichen Klimaanlagenbedarfs trägt dort zur Routenberechnung bei, weil es die Reichweite deutlich einschränken kann. Doch auch elektrische Taxiflotten, wie sie beispielsweise in der Arbeit von Pfeil [188, S. 60] betrachtet werden, müssen zur Abschätzung der Reichweite und der daraus folgenden Einsatzfähigkeit der Fahrzeuge Kenntnisse über den Verbrauch der Klimatisierung haben. Er zeigt, dass beispielsweise im Winter die Fahr- und Ladestrategie angepasst werden muss, weil die Reichweite deutlich reduziert ist [188, 83ff]. Durch die Berücksichtigung von effizienten Klimaanlagen als „Eco Innovation“ ab voraussichtlich 2025 wird zudem die Reduzierung des Energieverbrauches von Klimaanlagen eine zunehmend wichtige Rolle spielen [100, S. 8].

Damit der Einfluss der Nebenverbraucher bereits während der Konzeptphase berücksichtigt werden kann, muss ein HVAC-Modell entwickelt werden, das in Abhängigkeit von Umweltbedingungen und Fahrzeugparametern den elektrischen Verbrauch abschätzt (Abbildung 3.22). Ein solches Modell wurde für diese Arbeit entworfen und ist in [146] beschrieben. Auf Basis einer Vorarbeit [189] wurde ein HVAC- und Kabinenmodell in der Software KULI von Magna [190] im Rahmen der Arbeit von Mayer [191] aufgebaut und anschließend Metamodelle erstellt (Abbildung 3.23). Die Validierung der Simulation wurde mit den am Lehrstuhl aufgezeichneten Daten des Tesla Model 3, BMW i3 und VW ID.3 durchgeführt und ist in [146] und [191] beschrieben. Die Regressionen sind Open Source auf GitHub verfügbar [192].

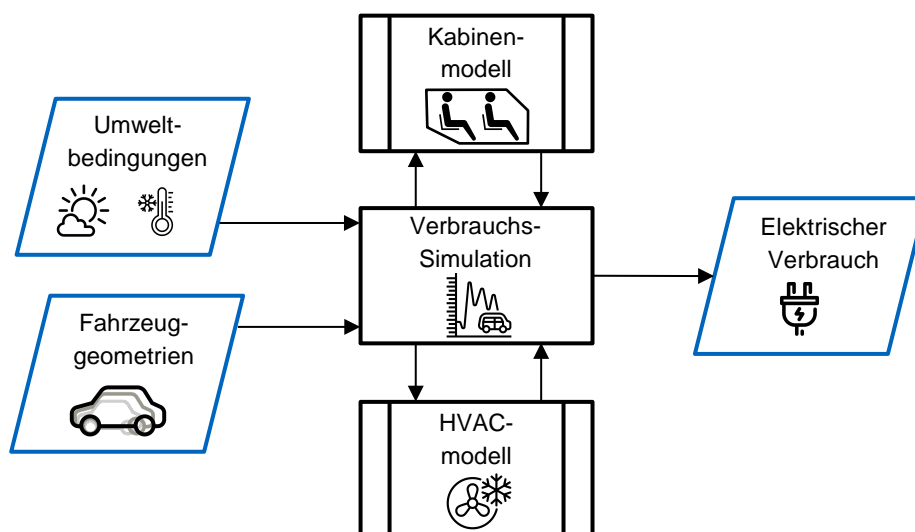


Abbildung 3.22: Aufbau der Verbrauchssimulation zur Ermittlung des elektrischen Verbrauchs durch Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)

Ein Metamodell wurde als Ersatz für die KULI Simulation aus zwei Gründen verwendet. Zum einen kann das Modell in KULI ohne Lizenz nicht weiterhin verwendet und veröffentlicht werden, zum anderen wurde die Simulationsdauer von einigen Sekunden auf den Bruchteil einer Sekunde reduziert. Für die spätere Optimierung, bei der einige tausend Fahrzeuge berechnet werden, bedeutet das eine signifikante Rechenzeitreduzierung. Pfeil [188, S. 60] verwendet aus gleichen Gründen eine Polynomfunktion 2. Grades als Ersatzmodell für die spätere Simulation, jedoch nur für ein spezielles Fahrzeug. Durch die Wahl der linearen Regression als Metamodell können deshalb im Folgenden Metamodell und Regression als Synonyme betrachtet werden.

Die Erstellung eines Metamodells erfolgt immer auf ähnliche Weise (Abbildung 3.23). Ausgangspunkt sind die mit KULI berechneten Simulationsdaten. Diese stellen auf der einen Seite die Eingangsgrößen für das Metamodell bereit, auf der anderen Seite die Ergebnisse, mit denen das Metamodell verglichen wird.

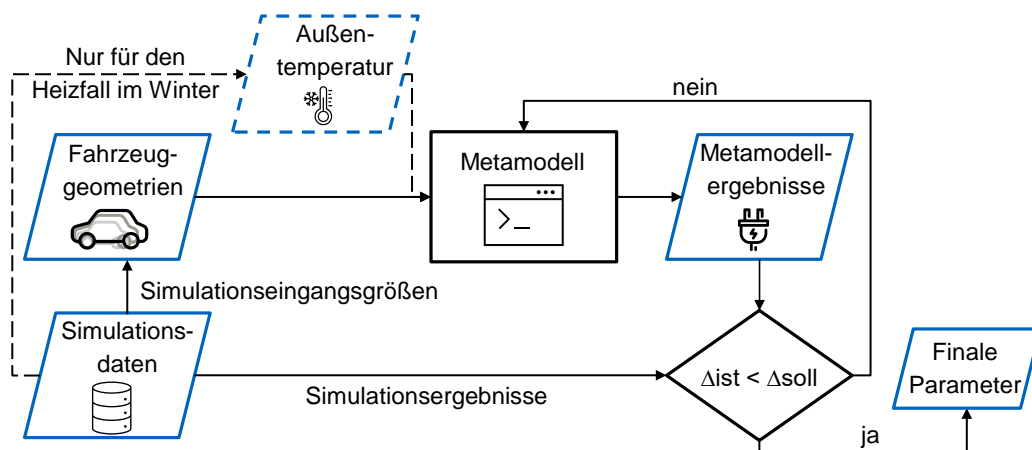


Abbildung 3.23: Ablauf der Erstellung eines Metamodells mit Simulationsdaten für ein festgelegtes Winter- oder Sommerszenario

Wie in [146] beschrieben ist ein Metamodell für den Heizfall im Winter bei verschiedenen Außentemperaturen ausreichend genau. Für den Kühlungsfall im Sommer muss durch eine komplexere Simulation mit Berücksichtigung der Sonneneinstrahlung und unterschiedlicher Betriebspunkte des Kältemittelverdichters ein Metamodell pro Außentemperatur erstellt werden. Die Außentemperatur ist somit eine Eingangsgröße für das Winter-Metamodell, wohingegen ein Sommer-Metamodell für jede Außentemperatur erstellt wurde. Durch die Berücksichtigung der Sonneneinstrahlung im Sommer-Metamodell wurden weiterhin für jede Außentemperatur zwei Metamodelle erstellt, die Scheibenwinkel im Bereich von konventionellen Fahrzeugen auf der einen Seite, und Scheibenwinkelbereiche von One-Box-Fahrzeugen auf der anderen Seite abdecken.

Die Auswahl einer geeigneten Regression erfolgt im AuVeCoDe-Tool anhand der gewählten Scheibenwinkel automatisch und interpoliert bei Bedarf zwischen den zwei Regressionen. Aufgrund des hohen Simulationsaufwands im Sommerfall stehen weiterhin nur Regressionen für bestimmte Außentemperaturen zur Verfügung (25 °C, 28 °C, 30 °C, 32 °C). Wird eine Temperatur zwischen den Werten gewählt, kann jedoch ebenfalls interpoliert werden.

3.2.5 Massemodellierung

Im folgenden Kapitel wird das verwendete Modell für die Fahrzeugmasse beschrieben. In Kapitel 3.2.2 wurden die Fahrwiderstandsgleichungen gezeigt, die eine wichtige Grundlage zur Auslegung eines Fahrzeugkonzepts sind. Eine wichtige Eingangsgröße dieser Gleichungen ist die Fahrzeugmasse, weil es Einfluss auf den Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand hat. Neben der Gesamtmasse spielt auch deren Verteilung im Fahrzeug eine Rolle [25, S. 20]. So sollte je nach Antriebstopologie eine entsprechende Masseverteilung auf die Achsen gewählt werden.

Die einfachste Methode, um die Masse eines Fahrzeugs abzuschätzen, ist die Betrachtung des Vorgängerfahrzeugs und die Berücksichtigung der Veränderungen beim Nachfolger. Insbesondere bei Fahrzeugen mit neuen Technologien, bei denen keine Vorgängerfahrzeuge verfügbar sind, ist das aber nicht möglich [193, S. 2]. Die gängigste Methode, die Masse eines Fahrzeugkonzepts abzuschätzen, ist die Abschätzung der Masse der einzelnen Baugruppen und die Aufsummierung dieser Werte [25, S. 171, 62, S. 25, 109, S. 71]. Eine große Herausforderung sind dabei die gravimetrischen und volumetrischen Sekundäreffekte durch Änderungen der Masse und werden im Folgenden kurz erklärt.

Die gravimetrischen Sekundäreffekte und eine Methode, sie zu berücksichtigen, sind in der Dissertation von Fuchs [62] erklärt. Weil die Komponenten über das Gesamtfahrzeug funktional und geometrisch voneinander abhängig sind, kann eine Massenveränderung einer Komponente weitere Auswirkungen auf die Gesamtmasse haben. Wird zum Beispiel die Masse des Fahrwerks erhöht, so muss die Batteriekapazität und die Motorleistung gesteigert werden, um die gleiche Reichweite und Beschleunigung zu erzielen. Die höhere Batteriekapazität und die leistungsstärkere Maschine führen zu einer weiteren Erhöhung der Gesamtmasse und erzeugen somit sekundäre Massensteigerungen.

Nicoletti [31] erweitert diese Methode um volumetrische Sekundäreffekte. Muss im oben gewählten Beispiel die Leistung der Maschine erhöht werden, so steigt auch ihr Volumen und damit der benötigte Packageraum. Mit der Berücksichtigung dieser Veränderungen wird sichergestellt, dass ein Fahrzeug weiterhin plausibel ist und keine Kollisionen im Package entstehen.

Die Modellierung der Masse von einzelnen Komponenten kann entweder empirisch oder physikalisch erfolgen [62, S. 31]. Während bei der physikalischen Modellierung genaue Kenntnisse erforderlich sind, kann bei dem empirischen Vorgehen schnell und einfach ein Modell erzeugt werden. Letzteres erfordert jedoch eine Datenbank an existierenden Komponenten. Nicoletti hat auf Basis der Arbeit von Romano [194] unter Verwendung der Benchmark-Plattform a2mac1 [171] Regressionen für alle Baugruppen eines elektrischen Fahrzeugs erstellt und in [172] zusammen mit einer Validierung veröffentlicht. Diese Regressionen werden in dieser Arbeit für die Bestimmung der Fahrzeugmasse verwendet.

Für eine detaillierte Beschreibung dieser Modelle wird auf die Dissertation von Nicoletti [31] und die dort genannte Veröffentlichung [195] verwiesen. Weil die Modelle für konventionelle BEV erstellt wurden, müssen für die Übertragbarkeit zu AV zwei Anpassungen vorgenommen werden. Die erste Anpassung ist die Erweiterung des Massemodells um Komponenten, die für die Automatisierung benötigt werden. Dafür wurden die bereits in Kapitel 3.2.4 ermittelten Daten verwendet, die auch Komponentenmassen von Sensoren und Rechnern enthalten. Je nach gewählter Nutzereingabe wird damit auch die Masse dieser Komponenten berücksichtigt.

Die zweite Anpassung betrifft die Methode zur Ermittlung der Karosseriemasse. Nicoletti hat das Vorgehen von Fuchs übernommen, der das Fahrzeug mit einem Ersatzvolumen darstellt [62, S.

39]. Diese ähnelt der Einteilung eines Fahrzeugs mit der bekannten Three-Box-Methode aus Kapitel 3.2.3, jedoch werden nur drei Karosserieformen SUV, Limousine und Kombi betrachtet. Während diese drei Formen für konventionelle Fahrzeuge ausreichen (Abbildung 3.24a oberes Bild), wird bei neuen Karosserieformen wie dem Onebox-Design (Abbildung 3.24a unteres Bild) keine gute Überdeckung mit der Silhouette erzielt. Obwohl die Höhe der Ersatzvolumen für den Vorder- und Hinterwagen (blau und grün in Abbildung 3.24) anpassbar ist, bleibt die Problematik bestehen, dass die Volumina von Vorder- und Hinterwagen auf Höhe der Vorder- und Hinterachse von dem Volumen der Fahrzeugzelle getrennt werden. Insbesondere beim Onebox-Design ist dieses Vorgehen ungeeignet, weil die Fahrzeugsilhouette keine klare Trennung des Vorder- und Hinterwagens vorgibt. Deshalb wurde das Ersatzvolumen in dieser Arbeit mit der tatsächlichen Silhouette bestimmt (Abbildung 3.24b).

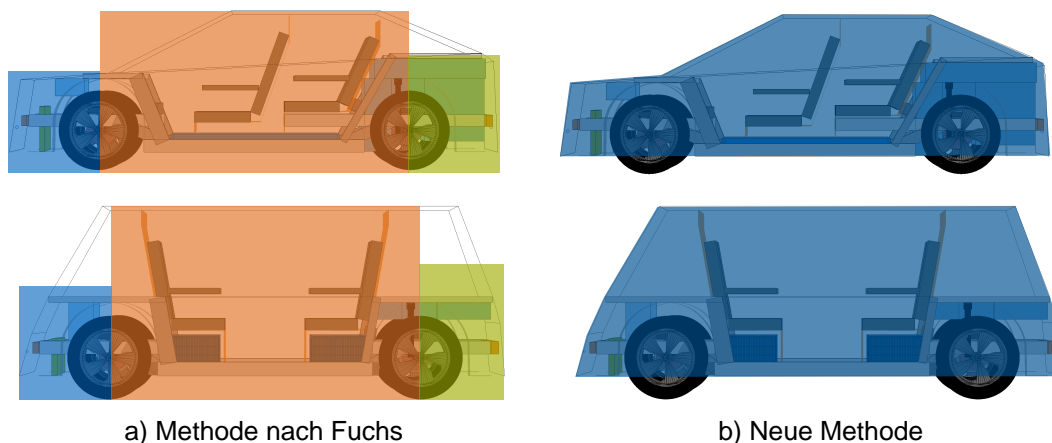


Abbildung 3.24: Neue Methode zur Bestimmung des Ersatzvolumens für die Berechnung der Karosseriemasse nach Fuchs [62]

Diese neue Methode wurde im Rahmen der bereits erwähnten Arbeit von Mast [181] umgesetzt (Kapitel 3.2.3) und im AuVeCoDe-Tool implementiert. Wie die Validierung im Kapitel 3.3.1 zeigt, wird eine vergleichbare Genauigkeit in der Masseberechnung wie in den Arbeiten von Fuchs und Nicoletti erreicht.

3.2.6 Kostenmodellierung

In Abhängigkeit vom Besitzverhältnis verändert sich auch die wahrgenommene Haltung zu den Kosten. Während beim Privatbesitz vor allem die Energiekosten für die Fahrt betrachtet werden, achten Nutzer von Ridesharing eher auf die Vollkosten [37, S. 50]. Beim Vergleich von AV mit anderen Verkehrsmitteln wird deshalb in den meisten Fällen der Gesamtpreis pro Streckeneinheit angegeben [14, S. 3]. In dieser Arbeit werden im weiteren Verlauf die Herstellkosten auf der einen Seite und der Energieverbrauch stellvertretend für die Betriebskosten auf der anderen Seite betrachtet. Schwerpunkt des Kostenmodells liegt dabei auf den Herstellkosten des Fahrzeugs. Kosten durch Wartung und Reparatur können aufgrund der noch nicht vorhandenen Erfahrungen und Daten nicht einbezogen werden.

Damit eine technische Lösung auch wirtschaftlich bewertet werden kann, wird in dieser Arbeit ein Kostenmodell verwendet. Fuchs [62, S. 91] nennt aus der Literatur zusammengefasste Herausforderungen, die mit der Erstellung solcher Modelle einhergehen:

- Hohe Unsicherheit aufgrund nicht öffentlich verfügbarer Daten

- Einfluss der Unternehmenspolitik auf Preise und Kosten
- Teilweise negativer Deckungsbeitrag bei neuen Technologien
- Hoher Anteil der Sonderausstattungen am Gewinn

Die Herstellkosten können weiterhin unterschiedlich ausfallen, weil andere Faktoren, wie beispielsweise die Stückzahl, einen großen Einfluss auf die Kosten haben [37, S. 37]. Die Marktdurchdringung bestimmt des Weiteren bei neuen Technologien wie dem autonomen Fahren die Kosten maßgeblich mit [16, S. 17].

Die wichtigsten Daten, die die Basis für das Kostenmodell bilden, wurden bereits in [196] veröffentlicht und werden im Folgenden deshalb kurz erwähnt. Fehlende Daten wurden mit Hilfe der Dissertation von Fuchs [62] ergänzt. In der Studienarbeit von Jahncke [197] wurden weiterhin Werte bezüglich Komponenten AV erarbeitet. Akgül [198] hat in Ihrer Studienarbeit schließlich alle Werte aus oben genannten Arbeiten zusammengetragen und für die Verwendung im AuVe-CoDe-Tool vorbereitet. Die Kosten umfassen die Baugruppen Antriebsstrang, Fahrwerk, Elektrik und Elektronik, Interieur, Exterieur und Klappen, Karosserie, Sensorik und Recheneinheit. Die Werte aller Baugruppen sind im Anhang E zusammengefasst. Die verwendeten Zahlen in dieser Arbeit können aufgrund der nicht möglichen Validierbarkeit nicht als absolut angenommen werden, sondern dienen vor allem relativen Vergleichen und einer realistischen Kostenstruktur eines Fahrzeugs.

Modellierung der Kosten

Kosten können je nach Baugruppe oder Komponente unterschiedlich angegeben werden. Während bei Komponenten wie den Airbags oder Sitzen ein Wert pro Stück angenommen wird, sind Batterie- oder Maschinenkosten abhängig von deren technischen Eigenschaften. Während für die Batteriekosten die Kapazität in kWh benötigt wird, wird bei der Maschine die Maximalleistung in kW verwendet. Die Herstellkosten von Karosserie- und Interieurteilen können nach Fuchs über Rohmaterial- und Fertigungskosten ermittelt werden [62, S. 92]. Die angenommenen spezifischen Kosten für alle Baugruppen sind in Anhang E gegeben.

Der Aufpreis des Systems, das autonomes Fahren ermöglicht, wird oft in Abhängigkeit des SAE Automatisierungs-Levels (Kapitel 2.1.1) abgeschätzt. Der Preis wird aber nicht nur vom Umfang der Sensorik bzw. Recheneinheiten, sondern auch vom Markteinführungszeitpunkt beeinflusst. Krail et al. [37, S. 97-99] geben für ein Level-3-System im Einführungsjahr 2018 einen Aufpreis von 5.400€ an. Dieser Wert ist in einem ähnlichen Bereich wie das im Jahr 2022 vorgestellte Level-3-System in der Mercedes S-Klasse, das 5.950€ kosten soll [199]. Ein Level-4-System kostet nach Krail et al. aber nur 5.300€ im Jahr 2025, weil trotz höherem Umfang beim Level 4 System die Komponentenpreise durch Skaleneffekte sinken. Einen dennoch höheren Preis durch deutlich gestiegene Anforderungen hat laut Krail et al. das Level-5-System mit 11.900€ im Einführungsjahr 2035. Mosquet et al. [16, S. 13] geben Kostenbereiche für einzelne Komponenten an und nennen die unterschiedlichen technischen Spezifikationen als Ursache für deren teilweise große Varianz. Die Anzahl der Scanebenen beim LiDAR beeinflussen beispielsweise dessen Preis deutlich.

Weil es bei AV kein eindeutiges Sensorsetup für jedes SAE-Level gibt (Kapitel 2.1.4), sind die Kosten in der vorliegenden Arbeit nicht nur für festgelegte Gesamtsysteme modelliert, sondern für die einzelnen Sensortypen und weiteren Komponenten wie GPS-Empfänger und Recheneinheit getrennt aufgeführt (Anhang E). Je nach dem vom Nutzer gewählten Systemsetup lassen

sich die Gesamtkosten aus der Summe aller gewählter Sensoren und weiterer Komponenten berechnen.

Plausibilisierung der Kosten

Eine Validierung kann aufgrund fehlender Daten nicht durchgeführt werden. OEM veröffentlichten Daten über ihre Kosten insbesondere aus Gründen des Wettbewerbs nicht. Das umgesetzte Kostenmodell wird deshalb am Beispiel des VW ID.3 Pure Performance City [200], der über eine Bruttobatteriekapazität von 48 kWh verfügt, mit der Kostenstruktur eines Beispielfahrzeugs [201, 202] verglichen (Abbildung 3.25). Bei diesem Beispielfahrzeug wurde mit einer 50 kWh Batterie mit optimistisch angenommenen Kosten von 160 €/kWh im Jahr 2020 und 85 €/kWh im Jahr 2030 gerechnet [202]. Diese Kosten stellen die untere Grenze der Batteriepackkosten dar [196, S. 7], während im AuVeCoDe-Tool mit einem Mittelwert der Literaturwerte gerechnet wird. Diese betragen 206 €/kWh im Jahr 2020 und 144 €/kWh im Jahr 2030. Als Folge hat die Batterie in der Kostenstruktur im AuVeCoDe-Modell einen höheren Anteil an den Gesamtkosten.

Während die restlichen Kosten ähnlich verteilt sind, werden die Interieurkosten in der genannten Quellen [201, 202] ebenfalls deutlich höher angegeben. Hier kann jedoch keine Überprüfung stattfinden, weil kein konkretes Fahrzeug oder Ausstattung angegeben sind. Weiterhin ist nicht klar, wie die Fahrzeugbereiche konkret getrennt sind.

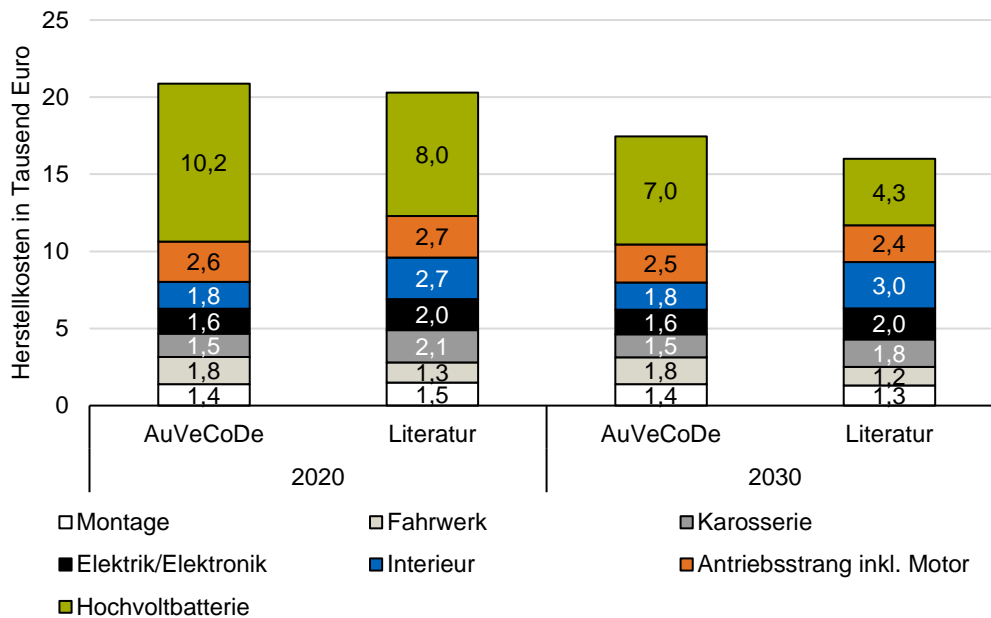


Abbildung 3.25: Vergleich der geschätzten Herstellkosten eines VW ID.3 mit einer 50 kWh Batterie zwischen dem AuVeCoDe-Kostenmodell und der Literatur [201, 202]

Eine zweite Plausibilisierung kann über den Vergleich des ermittelten Listenpreises erfolgen. Nach [203] betragen die Herstellkosten, die sich aus Material-, Personalkosten und Abschreibungen zusammensetzen, ca. 60% des Netto-Listenpreises. Demnach berechnet sich aus Herstellkosten von 20.900€, die mit dem Kostenmodell aus AuVeCoDe ermittelt wurden, ein Netto-Listenpreis von 34.833€ und ein Bruttopreis von 41.451€. Dieser Wert überschätzt die tatsächlichen 34.415€, weil VW mit diesem Preis voraussichtlich nicht die angenommenen Ergebnisbeiträge erzielt [204]. Durch die bereits erwähnte hohe Unsicherheit von Kostenmodellen,

werden die durchgeführten Plausibilisierungen trotz der Abweichungen als ausreichend genau für diese Arbeit bewertet.

3.3 Validierung und Verifikation des Gesamtmodells

Die Begriffe Validierung und Verifikation können abhängig vom Kontext unterschiedliche Bedeutungen haben [205, S. 542]. Im Bereich der Modellbildung wird die Verifikation als Methode beschrieben, die ermittelt, ob ein Modell plausibel und richtig ist und den Anforderungen genügt. Die Validierung liefert hingegen eine Aussage darüber, ob ein erstelltes Modell ein reales System hinreichend beschreibt indem Simulationsergebnisse mit realen Messungen oder Ergebnissen verglichen werden [205, S. 542, 206, S. 9].

Weil damit die Validierung immer ein reales Pendant benötigt, können für diese Arbeit nur existierende BEV dafür verwendet werden. Damit festgestellt werden kann, ob das Modell auch für AV verwendbar ist, soll zusätzlich eine Verifikation zeigen, dass aktuelle Konzept- und Prototypenfahrzeuge damit abgebildet werden können.

3.3.1 Validierung mit existierenden Fahrzeugen

In Kapitel 3.1.4 wurde die Validierung von Teilmodellen bereits vorgestellt. Im folgenden Kapitel wird das AuVeCoDe-Tool anhand existierender BEV validiert, um die korrekte Zusammenarbeit der Teilmodelle im Gesamtmodell zu überprüfen. Für die Validierung wurden Fahrzeuge ausgewählt, die einerseits möglichst aktuell sind und aus unterschiedlichen Segmenten stammen, und für die andererseits ausreichend Daten zur Verfügung stehen. Die genauen Fahrzeugdaten und Bezeichnungen sind im Anhang in Tabelle F.1 dargestellt.

Die Daten der simulierten Gesamtfahrzeuge und deren Abweichung zu den realen Werten sind in Tabelle 3.6 aufgelistet. Insbesondere das Verhältnis der Batteriekapazität zur Reichweite über den entsprechenden Verbrauch kann für alle Fahrzeuge mit nur geringen Abweichungen abgebildet werden. Die größten Differenzen sind bei der Berechnung des Motormoments und der Leistung festzustellen. Diese lassen sich durch das einheitlich verwendete Kennfeld mit feststehender Eckdrehzahl (Kapitel 3.2.2) in der LDS zu erklären. Dieses Vorgehen führt bei einem abweichenden Verhältnis der Eckdrehzahl zur Maximaldrehzahl zu jeweils gegensätzlichen Abweichungen der Leistung und des Drehmoments zur realen Maschine.

Weil im AuVeCoDe-Tool durch die angepasste Methode zur Packageerstellung (Kapitel 3.2.3) die Außenabmessungen des Gesamtfahrzeugs keine Eingangs-, sondern Ausgangsgrößen sind, werden diese Maße ebenfalls mit dem Realfahrzeug verglichen. Obwohl statt den Außenabmessungen die Innenraummaße und Überhänge des Vorder- und Hinterwagens Eingangsgrößen sind, hat das AuVeCoDe-Tool daraus nahezu die gleichen Außenabmessungen wie die Realfahrzeuge berechnet.

Tabelle 3.6: Validierungsergebnisse des Gesamtmodells für existierende Elektrofahrzeuge unter Angabe der Simulationsergebnisse und der relativen Abweichung zum Realfahrzeug

| Parameter | Audi e-tron 55 | Jaguar I-Pace EV400 | Tesla Model 3 SR RWD | VW ID.3 Pro 58 kWh |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Leermasse in kg | 2522 (-2,8%) | 2336 (+5,8%) | 1872 (+5,7%) | 1767 (-4,7%) |
| Batteriekapazität netto in kWh | 84,5 (-1,8%) | 81,25 (+2,2%) | 52,0 (-1,1%) | 57,4 (-1,1%) |
| Verbrauch in kWh/100km | 21,1 (-0,85%) | 17,1 (-3,27%) | 12,8 (-0,2%) | 13,6 (+0,4%) |
| Reichweite in km | 401 (-1,5%) | 476 (-0,83%) | 405 (-0,9%) | 421 (-1,5%) |
| Motor(en)moment in Nm | 274 + 349 (-6,2%) | 326 + 326 (-6,3%) | 382 (-8,8%) | 255 (-18%) |
| Motor(en)leistung in kW | 154 + 201 (+18%) | 187 + 187 (+27%) | 271 (+13%) | 162 (+8%) |
| Außenmaße LxBxH in mm | 4843 x 1936 x 1635 (Ø -0,4%) | 4706 x 2012 x 1530 (Ø -0,4%) | 4705 x 1856 x 1446 (Ø +0,1%) | 4268 x 1810 x 1551 (Ø +0,1%) |

Beim visuellen Vergleich der Packages zeigen sich ebenfalls gute Übereinstimmungen zwischen den einzelnen Fahrzeugen (Abbildung 3.26).

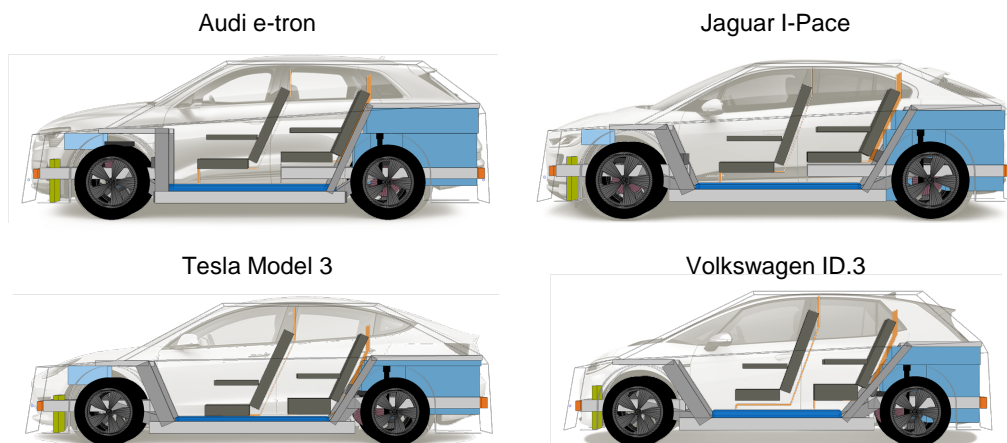


Abbildung 3.26: Packagedarstellung der für die Validierung verwendeten Elektrofahrzeuge

Durch die Freihaltung des Komponentenraums im Vorderwagen (Kapitel 3.2.3) wird, falls vorhanden, der vordere Kofferraum an der richtigen Stelle platziert. Die reale Silhouette wird besonders im Vorderwagen nicht exakt getroffen, weil Abstände der Fronthaube zur Gewährleistung von Fußgängerschutz und die Wölbung der Haube zur Verbesserung der Aerodynamik nicht berücksichtigt sind.

3.3.2 Verifikation mit autonomen Konzeptfahrzeugen

Das Ziel dieser Arbeit ist die Anwendung der Methode für die Auslegung neuartiger, autonomer FK. Insbesondere fahrerlose Personenfahrzeuge sind bisher nur in der Forschung und Entwicklung im Einsatz. Nachteil der oft gezeigten Messfahrzeuge sind unvollständige Komponenten (z.B. Showfahrzeug ohne Antriebsstrang) oder eine fehlende Angabe von technischen Daten, was eine Kontrolle der Realisierbarkeit unmöglich macht. Es wird deshalb nur geprüft, ob die breit gestreuten Außenabmessungen und Sitzkonfigurationen dieser Fahrzeuge mit der Methodik abbildbar sind. Ein Vergleich der technischen Daten und damit eine Validierung ist jedoch nicht durchführbar.

Corona [207] hat aktuelle Bereiche von technischen Daten für autonome Fahrzeuge gesammelt. Ziel der Entwicklung des AuVeCoDe-Tools war es, die Modellgrenzen so zu wählen, dass alle diese Fahrzeuge abbildbar sind. Ausnahmen sind Fahrzeuge, die in dieser Arbeit nicht betrachtete Komponenten enthalten (z.B. Radnabenantriebe). In Abbildung 3.27 werden beispielhaft drei deutlich unterschiedliche Fahrzeuge und die jeweilige Modellierung mit dem AuVeCoDe-Tool gezeigt. Weil keine technischen Daten für diese Fahrzeuge verfügbar sind, wurden die Auslegungsparameter anhand von Artikeln und Bildern abgeschätzt. Der Vergleich veranschaulicht, dass die deutlich unterschiedlichen Karosserieformen, Außenmaße und Sitzkonfigurationen mit der vorliegenden Arbeit darstellbar sind.

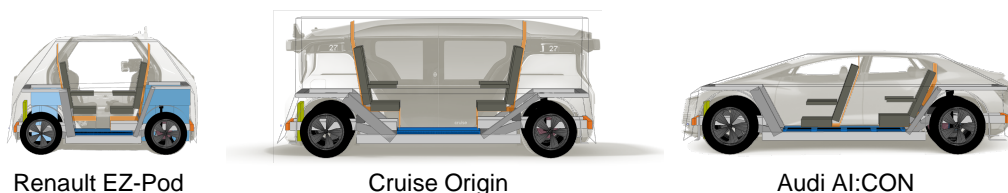


Abbildung 3.27: Beispiele für autonome Konzeptfahrzeuge zur Darstellung der Variabilität des AuVeCoDe-Tools

Zoox gibt als einer der wenigen Hersteller bereits konkrete Daten zu seinem AV an [187, 208] (Tabelle 3.7). Diese Daten wurden jedoch noch nicht durch unabhängige Institutionen geprüft und können daher nur als Anhaltspunkt dienen.

Weil das AV von Zoox im städtischen Verkehr eingesetzt werden soll, wurden die 16 Stunden Betriebsdauer mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit des ARTEMIS Urban von 17,65 km/h auf 300 km Reichweite umgerechnet. Ohne Nebenverbraucher wird laut Berechnung im AuVeCoDe-Tool lediglich eine Batterie von 35 kWh benötigt. Bei Aktivierung des Klimaanlagenmodells (32 °C Außentemperatur) steigt die benötigte Kapazität auf 66 kWh. Bei weiterer Erhöhung der Reichweitenanforderung auf 500 km unter Annahme einer höheren Durchschnittsgeschwindigkeit und eingeschalteter Klimaanlage wird mit 129 kWh ein ähnlicher Bereich wie von Zoox angegeben erreicht.

Tabelle 3.7: Technische Daten des AV von Zoox [187, 208]

| Name der technischen Eigenschaft | Wert |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Länge | 3.630mm |
| Höhe | 1.936mm |
| Höchstgeschwindigkeit | 121 km/h |
| Wendekreis | 8,4m |
| Batteriekapazität | 133kWh |
| Betriebsdauer | Bis zu 16 Stunden |
| Sitzlayout | Vis-à-vis |
| Antriebsstrangtopologie | Allrad mit Zentralmaschinen |

Die Batterie-, Antriebsstrang- und Sitztopologie kann damit reproduziert werden (Abbildung 3.28). Lediglich die freistehenden Räder, die Teil des „Kutschen-Stils“ sind [187, S. 1], können nicht nachgebildet werden, weil analog zu bisherigen Serienfahrzeugen der Querträger im Package-Modell immer vor den Rädern sitzt.

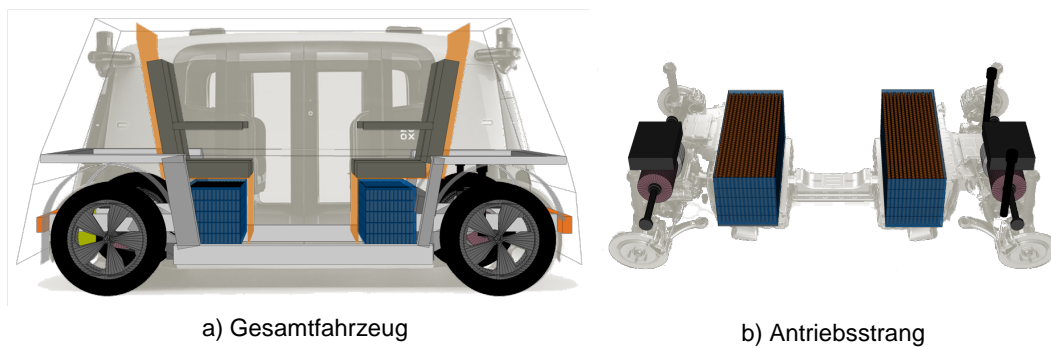


Abbildung 3.28: Modellierung des a) Gesamtfahrzeugs und b) des Antriebsstrangs des AV von Zoox [208]

Das Tool wurde damit sowohl auf die Richtigkeit der quantitativen Ergebnisse validiert (Kapitel 3.3.1), als auch für die Anwendung auf neuartige, unkonventionelle Fahrzeugkonzepte verifiziert (Kapitel 3.3.2). Die nötige Extrapolation von Teilmodellen beim Verlassen derer Grenzen und eine mögliche Verfälschung der Ergebnisse im Gesamtfahrzeug kann nicht überprüft werden, wird aber in Kapitel 5 diskutiert.

3.4 Konzeptoptimierung

Zur Erstellung eines Fahrzeugkonzepts mit dem AuVeCoDe-Tool kann der Nutzer zahlreiche Eingabewerte anpassen (Kapitel 3.2.1). Möchte der Nutzer die Eingabegrößen so wählen, dass ein möglichst optimales Fahrzeugkonzept hinsichtlich seiner Anforderungen entsteht, bieten sich zwei Möglichkeiten an: Er kann unterschiedliche Eingabewerte so lange manuell ausprobieren, bis er eine optimale Lösung findet. Weil bereits mit wenigen Werten die Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten exponentiell steigt, ist dieser Weg allerdings nicht zielführend. Stattdessen kann eine Optimierung die Lösungsfindung für den Nutzer beschleunigen.

Zu Beginn jeder Optimierung muss das Optimierungsproblem mit dem Suchraum Ω , der Bewertungs- oder Zielfunktion $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ und dem Vektor mit den Entscheidungsvariablen x aufgestellt werden [209, S. 20-21, 210, S. 2, 211, S. 1-2]. Die Menge der globalen Optima $X \subseteq \Omega$ ist dann definiert zu

$$X = \{x \in \Omega \mid \forall x' \in \Omega: f(x) > f(x')\} \quad (3.5)$$

wobei verschiedene Vergleichsrelationen $> \in \{<, >\}$ verwendet werden können. Jeder Punkt x' nennt sich Optimalpunkt und führt zu einem Maximum oder Minimum in der Zielfunktion f [210, S. 2]. Zusätzlich können noch Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen aufgestellt werden [211, S. 2, 212, S. 11].

Das Optimierungsproblem (Gl. (3.5)) kann aus einer einfachen Gleichung oder, wie in dieser Arbeit, einer komplexen Simulation mit zahlreichen Modellen bestehen. Für die unterschiedlichen Problemarten bieten sich aus der Literatur entsprechende Optimierungsalgorithmen zur Lösung an. Geeignete Algorithmen für diese Arbeit werden in Kapitel 3.4.1 vorgestellt, benötigte Randbedingungen in Kapitel 3.4.2 festgelegt und zuletzt die ausgewählten Optimierungsparameter in Kapitel 3.4.3 gezeigt.

3.4.1 Optimierungsalgorithmen

Die einfachste Art, eine optimale Lösung zu finden, ist den gesamten möglichen Lösungsraum zu untersuchen. Eine Einzelsimulationsdauer von fünf Sekunden reicht jedoch aus, dass eine Untersuchung von fünf Parametern mit zehn möglichen Werten knapp 6 Tage dauern wird. Deshalb wurden Optimierungsverfahren entwickelt, die den Lösungsraum systematisch durchsuchen, wenn die klassische Versuchsplanung an ihre Grenzen kommt [213, S. 105-106].

In dieser Arbeit handelt es sich um ein statisches Optimierungsproblem, weil die Entscheidungsvariablen Elemente des euklidischen Raums sind und keine Funktion, die z.B. abhängig von der Zeit ist [212, S. 6]. Zur Lösung eines solchen Problems können direkte, numerische Verfahren und indirekte, analytische Verfahren herangezogen werden [29, S. 40].

Für komplexe Problemstellungen, die Sprünge in der Zielfunktion haben (z.B. die sprunghafte Wahl einer diskreten Reifengröße im AuVeCoDe-Tool), eignen sich numerische Verfahren [211, S. 5] im Vergleich zu analytischen Verfahren [57, S. 68] besser. Von diesen zahlreichen numerischen Verfahren sind besonders die stochastischen Verfahren für Funktionen, die besonders viele lokale Minima aufweisen, zielführend [212, S. 56-57]. Weil das durch teilweise sprunghaftes Verhalten und komplexe Zusammenhänge von Modellen in dieser Arbeit der Fall ist, soll die Auswahl deshalb auf diese Methoden beschränkt werden.

Natural analoge Optimierungsalgorithmen

Eine wichtige Gruppierung der stochastischen Optimierungsalgorithmen sind die naturinspirierten Verfahren. Eine Übersicht von möglichen Algorithmen ist in [214, S. 4] gegeben. Zwei bekannte Vertreter, deren praktische Anwendung bereits bei verschiedenen Problemstellungen im Bereich der Mobilität und Fahrzeugtechnik gezeigt wurde, werden im Folgenden dargestellt.

Evolutionäre Algorithmen orientieren sich an der natürlichen Evolution von Organismen, wie sie in der Biologie erforscht wird [209, S. 1]. Bei dem Algorithmus setzen sich analog zur Natur nur diejenigen Kandidaten durch, die am geeignetsten sind. Die Kriterien für eine gute Eignung, auch

als *Fitness* bezeichnet, ist im Gegensatz zur Natur beim Algorithmus frei wählbar [209, S. 24]. Weiterhin kann statt eines Organismus ein beliebiges, abstraktes Objekt verwendet werden, um eine annähernd exakte Lösung für ein Problem finden zu können [209, S. 20]. Beispiele für solche Objekte sind vielfältig und einige werden im Kapitel Anwendungsbeispiele genannt.

Bei evolutionären Algorithmen werden mehrere Iterationen, auch *Generationen* genannt, zur Erreichung der Lösung durchlaufen. Jede dieser Generationen besteht aus zahlreichen *Individuen*, die mögliche Lösungskandidaten darstellen und deren Gesamtheit als *Population* bezeichnet wird [209, S. 24]. Zwischen den Generationen kann eine Rekombination und Mutation stattfinden, um den Lösungsraum weiter zu explorieren.

Algorithmen, die nach dem Prinzip der Schwarmintelligenz arbeiten, orientieren sich an sozial lebenden Tieren wie Insekten, Vögeln oder Fischen [209, S. 180, 214, S. 2]. Die Particle Swarm Optimization (PSO) ist ein oft genutztes Verfahren und basiert auf der Suche nach optimalen Futterplätzen. Dabei ist jedes Individuum bemüht, zu seinen besten Erfolgen zurückzukehren und sich gleichzeitig an denen seiner Nachbarn zu orientieren [209, S. 180].

Zuletzt gibt es Ansätze, die beide Optimierungsalgorithmen verbinden. Wang [215] entwickelt eine Kombination aus einem evolutionären Algorithmus und einem Schwarmalgorithmus und nennt, verglichen zur reinen Verwendung des evolutionären Algorithmus, Effizienzvorteile bei der Problemlösung im Bereich Engineering. Dabei wird die Kreuzung von Individuen des evolutionären Algorithmus mit der Bestimmung neuer Positionen der Schwarmoptimierung ersetzt. Wegen einer fehlenden Umsetzung in einem funktionsfähigen Programm und dem Mangel einer Anwendungserfahrung bei komplexen Problemen wird diese neue Form jedoch in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Anwendungsbeispiele

Kuchenbuch [29] verwendet als Erster im Bereich FKE den genetischen Algorithmus Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), der zu der erwähnten Gruppe der evolutionären Algorithmen gehört. In seiner Arbeit werden Schwarmintelligenz-Algorithmen nicht betrachtet. Wiedemann [213] entscheidet sich ebenfalls für einen genetischen Algorithmus, um optimale Fahrzeugkonzepte abzuleiten. Er vergleicht diesen als Vertreter der stochastischen Verfahren mit dem klassischen Versuchsplan und einem deterministischen Verfahren (Pattern Search Algorithmus). Matz [57] wählt in Anlehnung an Kuchenbuch und Wiedemann den NSGA-II aus, weil er dort bereits erfolgreich implementiert wurde. Eine detailliertere Begründung findet nicht statt. Angerer [216] verwendet ebenfalls den NSGA-II als Vertreter der genetischen Algorithmen mit der Begründung, dass dieser bereits erfolgreich in zahlreichen Arbeiten im Bereich der FKE Einsatz fand.

Pfeil [188] optimiert die Energieladestrategie für elektrische Taxis und hat nach eigener Aussage ein nichtdeterministisches und multikriterielles Optimierungsproblem. Er grenzt deshalb die Auswahl auf evolutionäre oder Schwarmintelligenz basierende Algorithmen als Weiterentwicklung der numerisch stochastischen Verfahren ein. In der Arbeit wird PSO gegenüber evolutionären Algorithmen wie dem NSGA-II bevorzugt, weil der PSO schnellere Konvergenz aufweist.

Optimierungsalgorithmen in dieser Arbeit

Zusammenfassend wurde bei den meisten Arbeiten ein Algorithmus auf Basis von Literatur oder bereits realisierten Anwendungsbeispielen ausgewählt. Ein konkreter Vergleich von mehreren

Verfahren bei Übertragung auf das eigene Optimierungsproblem fand nur bei Wiedemann [213] statt.

In der Studienarbeit von Liemawan [217] wurden für das Optimierungsproblem der vorliegenden Arbeit mehrere Optimierungsalgorithmen untersucht und getestet. Die Multi-Objectiv-PSO (MOPSO) konnte im Vergleich zum NSGA-II ähnlich gute Ergebnisse erzielen, durch den großen Lösungsraum wurde allerdings oft eine unzureichende Konvergenz erzielt. Die Verwendung der Multiswarm-MOPSO, bei dem jede Antriebstopologie einzeln optimiert wird, führte zu einer schnelleren Konvergenz bei Zielgrößen, die wenig widersprüchlich sind (z.B. Verbrauch und Kosten). Eine Verwendung des NSGA-II bietet wiederum bei widersprüchlichen Zielgrößen (z.B. Reichweite und Kosten) Vorteile in der Bildung einer gleichmäßigen Paretofront. In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb für jede Fragestellung (Kapitel 4) der Optimierungsalgorithmus ausgewählt, der dafür die jeweils besseren Ergebnisse erzielte.

Neben der bereits erfolgten Metaoptimierung in Liemawans Arbeit wurde für den NSGA-II eine weitere Metaoptimierung durchgeführt (Tabelle G.1). Durch die Variation von Optimierungsparametern wurde eine Einstellung der Mutation, Kreuzung, Populationsgröße und Generationsanzahl ermittelt, die zum bestmöglichen Ergebnis führt. Durch den statistischen Einfluss einer Metaheuristik wie dem NSGA-II müssen dennoch mehrere Optimierungsdurchläufe durchgeführt werden, um sich möglichst gut dem globalen Optimum zu nähern. In dieser Arbeit wurde die Implementierung von Song [218] verwendet.

3.4.2 Randbedingungen

Coello [219] und Weicker [209] zeigen verschiedene Möglichkeiten, wie Randbedingungen für evolutionäre Algorithmen formuliert werden können. Die nach den Autoren am meisten verwendete Form ist die Bestrafungsfunktion. Ist beispielsweise bei einer Optimierung ein Fahrzeug aufgrund von technischen Randbedingungen nicht realisierbar (z.B. kein ausreichender Platz für die Batterie), so werden die Zielgrößen mit vorher festgelegten Strafwerten überschrieben. Die Festlegung der Strafwerte sollte in einer ähnlichen Größenordnung wie die Zielgrößen liegen. Werden die Strafwerte zu hoch gewählt, kann die Exploration des restlichen Lösungsraumes gestört werden, weil der Algorithmus solche Gegenden für die nächsten Generationen meidet. Werden die Strafwerte hingegen zu niedrig gewählt, können nicht realisierbare Lösungen zu nah an den realisierbaren liegen und umsetzbare Lösungen werden nicht mehr gefunden [220, S. 955].

Matz [57] wendet eine Methode an, in der Lösungskandidaten paarweise verglichen und ungültige Kandidaten somit direkt oder nach wenigen Generationen durch Bevorzugung von gültigen Kandidaten herausgefiltert werden. Voraussetzung ist die quantitative Bestimmung der Randbedingungsverletzung bei ungültigen Kandidaten.

Die Einschränkung des Lösungsraums durch Randbedingungen kann weiterhin helfen, die Optimierungszeit zu reduzieren [213, S. 107-110]. Dies ist jedoch nur der Fall, wenn vor der Optimierung ein Bereich festgelegt werden kann, in dem die Lösungen nicht plausibel sind. Bei komplexen Simulationen mit zahlreichen Wechselwirkungen ist das jedoch für die meisten Parameter nicht möglich.

3.4.3 Optimierungsparameter

Ziel dieser Arbeit ist zum einen das Aufzeigen von Einsparpotentialen und zum anderen die Suche nach optimalen Lösungen für vorgegebene kundenwerte Fahrzeugeigenschaften. Folglich sollen bei der Optimierung überwiegend solche Parameter gewählt werden, die die kundenwerten Eigenschaften eines AV nicht oder kaum beeinflussen, die technische Lösung aber verbessern können. Die möglichen Optimierungsparameter sind in Tabelle H.1 im Anhang H dargestellt.

Zur Ermittlung des monetären Einsparpotentials müssen die Anschaffungs- und Verbrauchskosten bestimmt werden. Für eine ökologische Betrachtung spielt der Verbrauch, die Größe der Batterie und die Fahrzeugmasse eine Rolle. Für eine maximale Betriebsdauer wird wiederum eine möglichst hohe Reichweite benötigt. Deshalb wurden folgende mögliche Optimierungsziele aufgenommen:

- Minimierung der Herstellkosten
- Minimierung der Batteriekapazität
- Minimierung des Verbrauchs
- Minimierung der Fahrzeugmasse
- Maximierung der Reichweite

Davon können im AuVeCoDe-Tool zwei gleichzeitig ausgewählt werden, sodass eine Pareto-Front grafisch übersichtlich darstellbar ist. Mit Ausnahme der Reichweite sind die genannten Zielgrößen aber wenig widersprüchlich und führen aber nicht zwangsläufig zu einer Pareto-Front, sondern können auch in einem einzigen, optimalen Fahrzeug resultieren.

Im folgenden Kapitel 4 werden Ergebnisse gezeigt, die mit der beschriebenen Optimierung ermittelt wurden. Weil in dieser Arbeit die Herstellkosten und der Verbrauch zur Bestimmung der ökologischen und ökonomischen Potentiale benötigt werden (Kapitel 3.1.4), werden diese als Optimierungsziele festgelegt.

4 Optimierung und Potentialanalyse von autonomen Fahrzeugkonzepten

Im vorherigen Kapitel wurde die erste Fragestellung aus Kapitel 2.3, wie die Methodik zur Fahrzeugkonzeptauslegung und -optimierung für AV angepasst werden muss, ausgearbeitet. Die Anwendung des daraus entstandenen Auslegungstools AuVeCoDe wird im folgenden Kapitel 4.1 an drei Beispielen untersucht. Die Optimierung der Fahrzeuge soll erste Einsparungspotentiale und mögliche Veränderungen am Fahrzeug durch Automatisierung zeigen.

Im anschließenden Kapitel 4.2 soll die zweite Fragestellung aus Kapitel 2.3 beantwortet werden. Diese hat die Bestimmung des Potentials von AV in Abhängigkeit vom gewählten Nutzungsszenario zum Ziel. Dafür werden die Auswirkungen einzelner Anforderungen auf das Gesamtfahrzeug, die von möglichen Nutzungsszenarien abhängig sind, untersucht und daraus resultierende Potentiale ermittelt.

4.1 Anwendungsoptimierte Fahrzeugkonzepte

Fahrzeuge im Purpose Design, die für eine neue Technologie vollständig entwickelt werden, bieten deutliche Vorteile gegenüber Fahrzeugen im Conversion Design, bei denen lediglich einzelne alte Komponenten gegen neue ersetzt werden (Kapitel 2.1.4). Ein erster Schritt ist deshalb die Untersuchung, ob und in welchem Umfang ein herkömmliches BEV für die Automatisierung angepasst werden sollte (Kapitel 4.1.1).

Neben einer technologiegetriebenen Entwicklung müssen auch Trends wie Mobility-on-Demand beachtet werden, weil sie die Anforderungen an ein Fahrzeug beeinflussen. So ist ein heutiges Privatfahrzeug für den Einsatz in der Stadt in den meisten Fällen überdimensioniert und bleibt die meiste Zeit ungenutzt [221, S. 401]. Deshalb wird in einem zweiten Schritt am Beispiel eines elektrischen Taxis untersucht, wie die Automatisierung mit dem Trend zur Spezialisierung für urbane Anwendungen das Fahrzeug verändern könnte (Kapitel 4.1.2).

Als drittes Beispiel wird das für den autonomen Einsatz entwickelte Prototypenfahrzeug autoTAXI [222] aus dem Projekt UNICARagil [30] betrachtet (Kapitel 4.1.2). Wohingegen hier bereits eine Vis-à-vis Sitzkonfiguration gewählt wurde, fehlte durch die kurze Projektlaufzeit und andere Forschungsschwerpunkte eine ausführliche Herleitung eines optimalen FK. Eine Analyse soll deshalb zeigen, ob dieses Fahrzeug eine optimale Lösung für das vorherige Kapitel 4.1.2 darstellt.

4.1.1 Konventionelles Fahrzeug

Der VW ID.3 ist ein Beispiel für ein BEV-Volumenmodell und ist nach dem Purpose Design (Kapitel 2.1.4) entwickelt worden. Dieses Fahrzeug wurde neben anderen BEV bereits in Kapitel 3.3.1 validiert. Es soll ähnlich wie sein verbrennungsmotorisch betriebenes Pendant, der VW Golf, den Mobilitätsbedarf eines Kunden im Bereich des Individualverkehrs abdecken. Im Stand der Technik wurde vorhergesagt, dass das größte Potential des autonomen Fahrens in Verbindung mit neuen Geschäftsmodellen wie Ride-Sharing besteht. Dieses Kapitel soll am Beispiel eines VW ID.3 als Ausgangsfahrzeug zeigen, ob bereits bei einem herkömmlichen BEV ohne verändertes Geschäftsmodell ein neues Purpose Design durch autonomes Fahren entsteht und ob dadurch Einsparungen in den Herstellkosten und im Verbrauch möglich sind. Weil die Einführung eines solchen Fahrzeugs zeitnah denkbar ist, wird mit zum Zeitpunkt dieser Arbeit aktuellen Kosten und Antriebsstrangdaten gerechnet.

Das Fahrzeug wird in drei Schritten optimiert, um eine Vergleichbarkeit der Maßnahmen sicherstellen zu können (Abbildung 4.1). Die einzelnen Schritte, die Optimierungen und die Annahmen werden im Folgenden erläutert und mit dem Package von ausgewählten Fahrzeugen erklärt.

In einem ersten Schritt wird das Originalfahrzeug ohne automatische Fahrfunktion verwendet. Der zur Auslegung verwendete Fahrzyklus ist der WLTP und die Anforderungen an die Fahrleistungen werden vom VW ID.3 aus Kapitel 3.3.1 übernommen [223].

Im zweiten Schritt wird eine mögliche autonome Version des ID.3 betrachtet. Zum sonst unveränderten Fahrzeug werden hier die benötigten Sensoren und Rechner ergänzt und deren Mehrverbrauch und Kosten berücksichtigt.

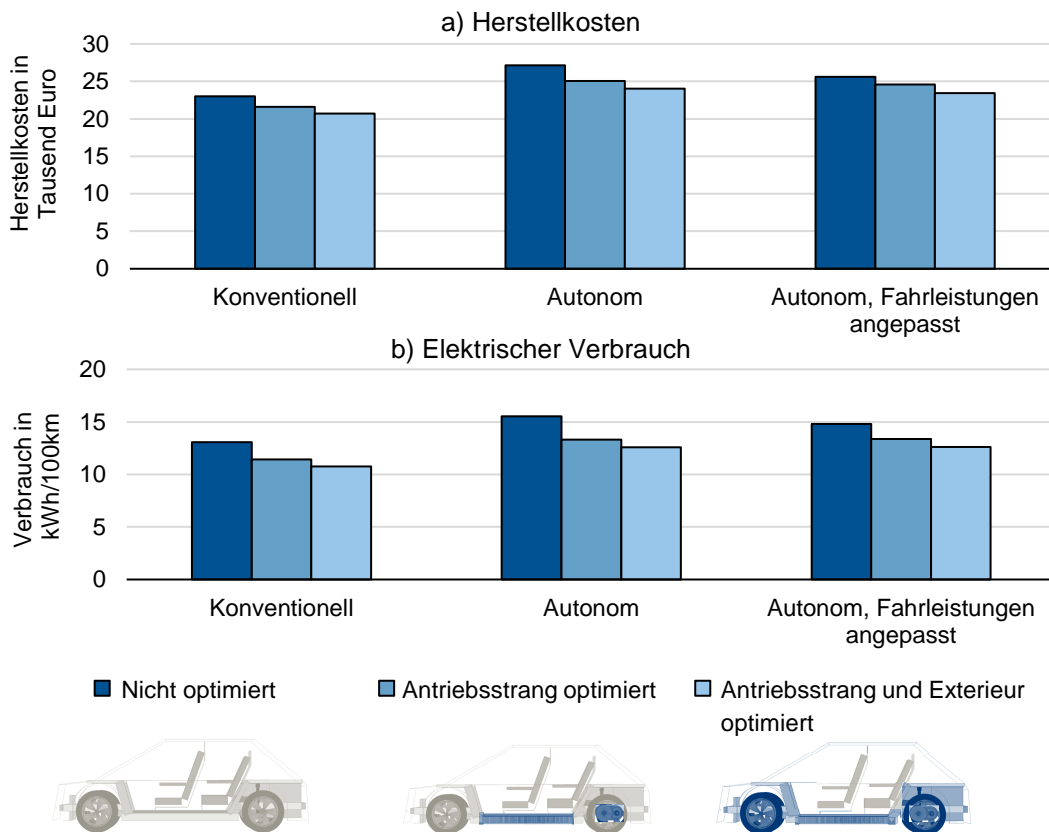


Abbildung 4.1: Verschiedene Anpassungen und Optimierungen eines konventionellen Fahrzeugs am Beispiel des VW ID.3

In einem dritten und letzten Schritt wird angenommen, dass das Fahrzeug überwiegend im autonomen Modus betrieben wird und damit die Anforderungen an den Antriebsstrang geringer ausfallen können. Ein AV sollte aufgrund rechtlicher Rahmenbedingungen maximal 130 km/h fahren [224, S. 4]. Hohe Geschwindigkeiten sollten weiterhin vermieden werden, weil sie die Reichweite negativ beeinflussen [38, S. 33]. Einstiegsmotorisierungen der ICEV-Varianten in der Klasse des VW ID.3 (z.B. VW Golf: 10,7 s, Seat Leon: 10,7 s, BMW 116i: 10,4 s [225]) erreichen eine Beschleunigungszeit von 0 auf 100 km/h von ca. 11 s. Dieser Wert wird als Mindestmaß für ein Fahrzeug in dieser Klasse angenommen, das noch manuell gefahren werden kann. Zusammenfassend wird deshalb die Höchstgeschwindigkeit auf 130 km/h und die Beschleunigungszeit von 0 auf 100 km/h auf 11 s reduziert.

Innerhalb jedes der drei Schritte (Spalten in Tabelle 4.1) werden zwei Optimierungen durchgeführt (zweite und dritte Zeile in Tabelle 4.1). Die erste Optimierung betrifft nur den Antriebsstrang (Getriebe, Maschine und Batteriespeicher). Die zweite Optimierung verändert neben dem Antriebsstrang auch Teile des Exterieurs zur Erreichung eines minimalen Verbrauchs und minimaler Herstellkosten. Die Optimierungsparameter sind in Tabelle I.1 und Tabelle I.2 im Anhang aufgeführt. Weil der VW ID.3 überwiegend von Privatkunden gekauft wird, die auch Wert auf das Design legen, sind Veränderung des Fahrzeugexterieurs nur eingeschränkt möglich und ein gleichbleibender Innenraum und dessen Höhe sicherzustellen. Dadurch wird weiterhin eine manuelle Steuerung durch einen Fahrer zusätzlich zur autonomen Fahrfunktion ermöglicht, wovon bei autonomen Privatfahrzeugen auszugehen ist [20, S. 164]. Veränderungen des Innenraums bei geteilten Fahrzeugen werden in den Kapiteln 4.1.2 und 4.1.3 näher betrachtet.

Tabelle 4.1: Herstellkosten (K) und Verbrauch (V) von optimierten und/oder autonomen Varianten des VW ID.3 im Vergleich zum nicht optimierten konventionellen Fahrzeug

| | Konventionell | Autonom | Autonom, Fahrleistungen angepasst |
|--|-------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Nicht optimiert | K:100% / V:100% | K:117,9% / V:119,0% | K:111,2% / V:113,2% |
| Antriebsstrang optimiert | K:93,8% / V:87,5% | K:108,9% / V:101,8% | K:106,8% / V:102,3% |
| Antriebsstrang und Exterieur optimiert | K:89,9% / V:82,3% | K:104,4% / V:96,3% | K:101,8% / V:96,6% |

Für das nicht optimierte, autonome Fahrzeug bedeuten die zusätzlichen Nebenverbraucher eine Erhöhung der Herstellkosten und des Verbrauchs. Ursache ist eine Vergrößerung der Batterie zur Erreichung der gleichen Reichweite trotz des erhöhten Nebenverbrauchs. Bei der nicht optimierten, autonomen Variante mit angepassten Fahrleistungen reduzieren sich die Kosten bzw. der Verbrauch im Vergleich zur autonomen Variante, weil Kosten und Masse im Antriebsstrang eingespart werden können.

Die Optimierung kann die Herstellkosten und den Verbrauch innerhalb jeder Variante (konventionell, autonom, autonom mit reduzierten Fahrleistungen) reduzieren. Im Vergleich zum nicht optimierten, konventionellen Fahrzeug sind die Herstellkosten für die autonomen Varianten trotz Optimierung immer höher. Der gestiegene Verbrauch durch die Sensorik und Rechner kann wiederum durch die Optimierung von Antriebsstrang und Exterieur bei beiden autonomen Varianten überkompensiert werden. Bei den optimierten, autonomen Fahrzeugen mit reduzierten Fahrleistungen ist ein minimal höherer Verbrauch festzustellen als bei der autonomen Variante mit unveränderten Fahrleistungen. Eine Erklärung dafür und eine detailliertere Untersuchung des Einflusses der Fahrleistungen auf den Verbrauch findet in dem späteren Kapitel 4.2.1 statt.

Das Package vom konventionellen, nicht optimierten Fahrzeug ist in Abbildung 4.2a und Abbildung 4.3a dargestellt. Bei der Optimierung des Antriebsstrangs ist die gewählte Allrad-Topologie statt der Heckantriebs-Topologie im Ausgangsfahrzeug erkennbar (Abbildung 4.2b). Zur Verteilung des Drehmoments der beiden Maschinen wurde 30% für die Vorder- und 70% für die hintere Maschine vom Optimierer gewählt. Das bestätigt die Ergebnisse von Angerer [216], der je nach Motorleistung ähnliche Verteilungen für eine bestmögliche Effizienz ermittelt hat.

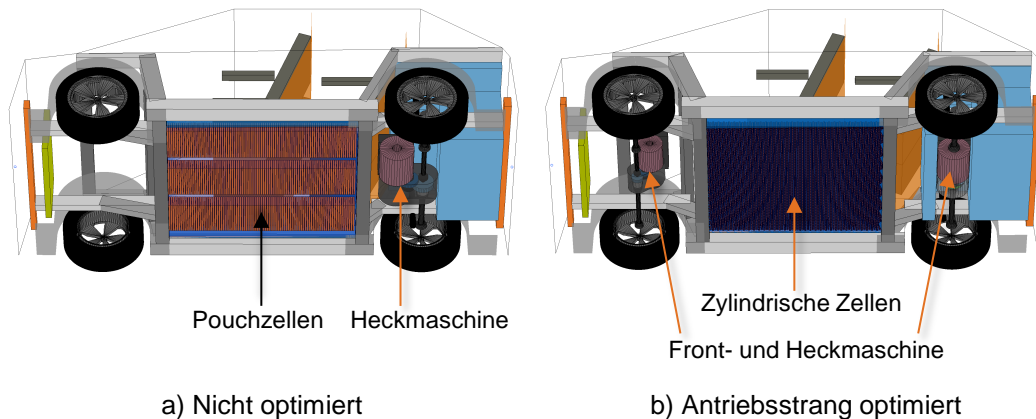


Abbildung 4.2: Vergleich der Packages zwischen a) autonomen VW ID.3 ohne Optimierung und b) autonomen VW ID.3 mit optimiertem Antriebsstrang

Bei der zusätzlichen Optimierung des Exterieurs wurden neben der Allrad-Topologie auch einige Punkte des Exterieurs angepasst (Abbildung 4.3c). Bei jeder Optimierung wurde der Batteriezelltyp von Pouch im Originalfahrzeug auf zylindrische Zellen geändert (Abbildung 4.2b und Abbildung 4.3b), weil dadurch höhere Packagedichten möglich sind. Das bestätigt die Ergebnisse von Nicoletti [31]. Die Scheibenwinkel wurden steiler gestaltet und ein Stufenheck gewählt, um das Karosserievolumen und folglich die Masse zu reduzieren. Die Reifenmaße konnten durch die niedrigere Masse auf 175/60 R19 geändert werden, was einer Standardbereifung eines BMW i3 entspricht. Damit wurde der Reifenradius zum Originalfahrzeug nur leicht verringert, die Breite jedoch deutlich reduziert, was in Summe zu einer Verringerung des Rollwiderstands führt. Das Kofferraumvolumen wurde wie im Originalfahrzeug vollständig im Hinterwagen untergebracht. Der Überhang konnte reduziert werden, weil unter anderem durch die schmälere Reifen und die damit kleineren Radhäuser mehr Breite für den Kofferraum zur Verfügung steht. Für diese Lösung wäre zu diskutieren, ob durch die limousinenförmige Heckform nicht Nachteile für den Kunden entstehen, weil sich die lichte Höhe im Laderaum reduziert.

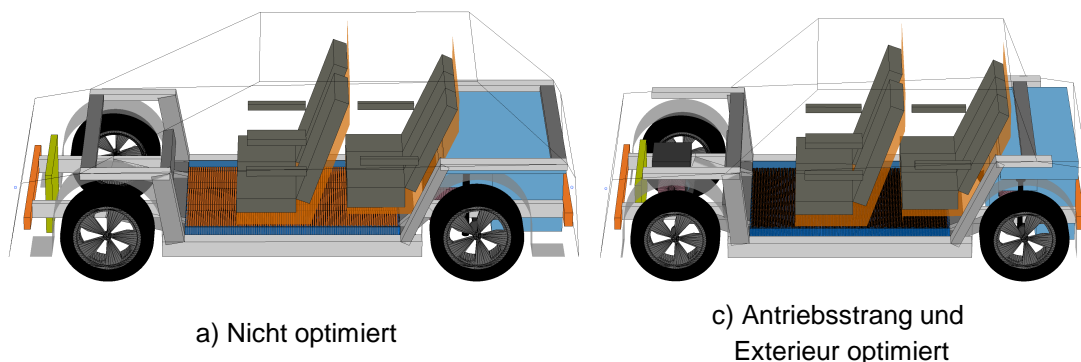


Abbildung 4.3: Vergleich der Packages zwischen a) autonomen VW ID.3 ohne Optimierung und b) autonomen VW ID.3 mit optimiertem Antriebsstrang und Exterieur

Am Beispiel des VW ID.3 kann für Privatfahrzeuge zusammenfassend festgestellt werden, dass die Automatisierung durch die benötigte Sensorik und den erhöhten Verbrauch zunächst zu einer Erhöhung der Anschaffungs- und Betriebskosten führen würde. Eine optimierte Variante des Antriebsstrangs könnte den Verbrauch in geringem Umfang zum Ausgangsniveau verbessern und bestätigt die Ergebnisse von Angerer [216] hinsichtlich der Verbrauchsvorteile eines elektrischen Allradantriebs.

Die Reduzierung der Fahrleistungen führt zu einer Einsparung bei der nicht optimierten Variante mit einer Maschine, weil die Diskrepanz zwischen Maximalbeschleunigung und Beschleunigung im Zyklus reduziert wird. Bei den Allradvarianten in den optimierten Fahrzeugen ist kein merklicher Unterschied zu erkennen, weil durch die Anpassung der Maschinengrößen an der Vorder- und Hinterachse die Diskrepanz zwischen Zyklus und Beschleunigungsanforderung für die kleinere Maschine geringgehalten wird. Die Herstellkosten sind bei der Variante mit niedrigeren Fahrleistungen wiederum geringer, weil der Antriebsstrang kleiner und deshalb günstiger ausfällt.

Sollen die Herstellkosten bestmöglich auf das Ausgangsniveau reduziert werden, müssen zusätzlich zum Antriebsstrang deutliche Veränderungen im Exterieur vorgenommen werden. Diese Veränderungen können weitere negative Folgen haben, die in dieser Arbeit nicht modelliert wurden. So könnte ein steilerer Scheibenwinkel den c_w -Wert verschlechtern und eine veränderte Heckform die Nutzbarkeit des Kofferraums.

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben prognostizieren zahlreiche Autoren, dass bei einer Einführung des autonomen Fahrens für konventionelle Privatfahrzeuge ohne Veränderung bestehender Geschäftsmodelle und Kundenanforderungen die Einsparpotentiale gering ausfallen. Die gezeigten Ergebnisse bestätigen diese Prognose. Erhöhte Verbräuche und Kosten können durch Anpassungen am Fahrzeug zwar ausgeglichen werden, eine Kosteneinsparung ist am Beispiel des VW ID.3 jedoch nicht möglich. Ein abweichendes Purpose Design im Vergleich zu BEV ist ebenfalls nicht erkennbar. Autonomes Fahren stellt in diesem Bereich deshalb eine Komfortfunktion dar, die nur dann zu keiner Verbrauchserhöhung führt, wenn die Fahrleistungen reduziert und der Antriebsstrang entsprechend angepasst wird.

4.1.2 Autonomes Taxi für eine Großstadt

Ein Verkehrsmittel, das besonders im urbanen Raum bereits heute für individuelle Mobilität ohne Zugriff auf ein eigenes Fahrzeug oder eine Fahrerlaubnis sorgt, ist das Taxi. Es ist deshalb eine naheliegende Möglichkeit, bei der das autonome Fahren zeitnah Einzug halten könnte, insbesondere weil die Fahrerkosten entfallen könnten [226, S. 1]. Selbst Systemkosten von 100.000 € sollen sich durch Ersparnisse aufgrund des Entfalls des Fahrers amortisieren [227, S. 1060]. Als Ausgangslage soll das bereits in Großstädten wie München als Taxi verwendete Tesla Model S dienen, das ein elektrisches Pendant zu den meist dieselbetriebenen Mercedes E-Klassen darstellt. Eine stufenweise Anpassung und Optimierung dieses Ausgangsfahrzeugs, im Weiteren auch als „Taxi München“ bezeichnet, soll zeigen, wie ein autonomes Taxi für eine Großstadt angepasst werden müsste und welche Potentiale dadurch entstehen. Bereits im Ausgangsfahrzeug wird ein Sensorsetup und eine Recheneinheit berücksichtigt.

Die Herstellungskosten und der Verbrauch wurden erneut als Zielgrößen für die Optimierung gewählt. Für die Berechnung der Kosten und des Antriebsstrangs wurde das Jahr 2025 gewählt, weil eine Einführung eines fahrerlosen, autonomen Taxis für den Stadtverkehr erst in einigen Jahren denkbar ist.

Es wurden vier Anpassungen der Anforderungen an das Fahrzeug jeweils einzeln und zusammen untersucht (Abbildung 4.4): Die Wahl eines realitätsnahen Zyklus, die Variation des Sitzkonzepts, die Anpassung der Reichweite und die Reduktion der Fahrleistungen. Bei jeder dieser Veränderung wurden einzelne Eingangsgrößen im Vergleich zum Originalfahrzeug verändert und jeweils zusätzlich eine Optimierung durchgeführt. Die für die Entscheidungsvariablen der Optimierung gewählten Wertebereiche sind in Tabelle I.3 und Tabelle I.4 im Anhang aufgelistet und wurden ausreichend groß gewählt, um auch unkonventionelle Lösungen nicht auszuschließen. Die Auswirkungen jeder Änderung und Optimierung werden im Folgenden detailliert erläutert.

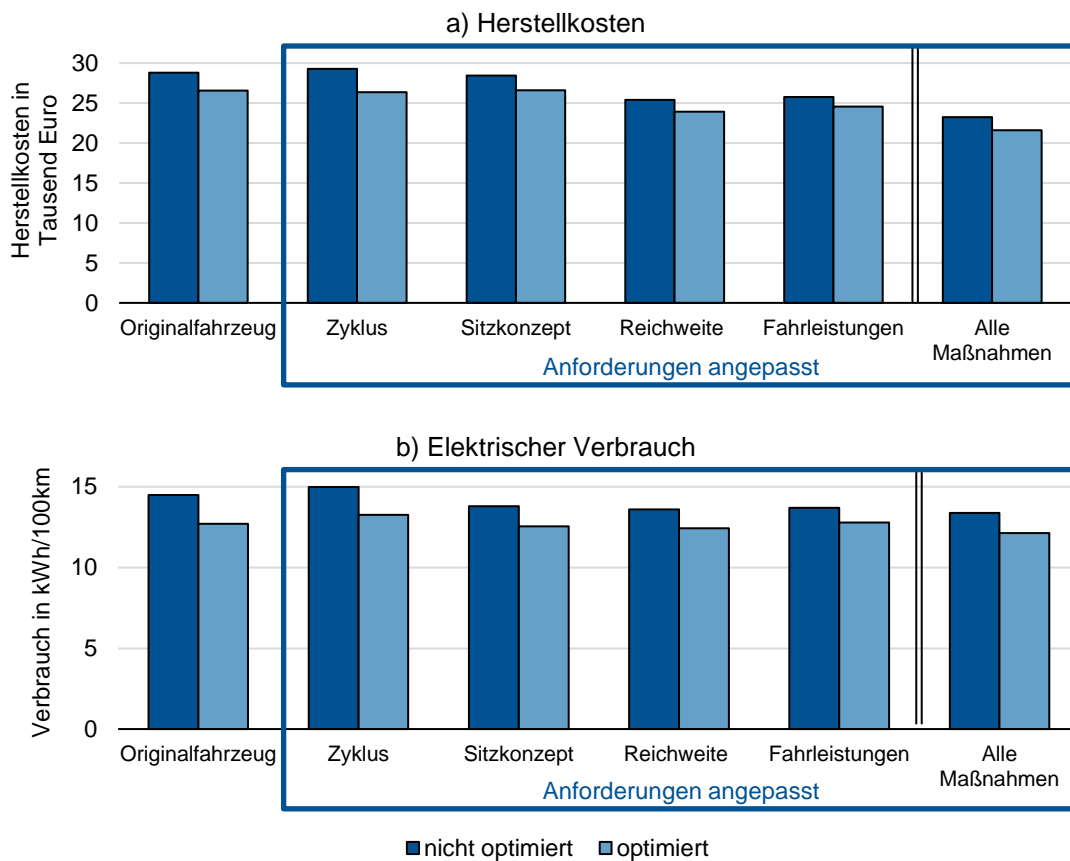


Abbildung 4.4: Verschiedene Anpassungen und Optimierung eines autonomen Taxis für München

Originalfahrzeug

Vor der Untersuchung der vier Anpassungen wird das Originalfahrzeug mit unveränderten Anforderungen (also z.B. gleicher Zyklus, gleiches Sitzkonzept, etc.) optimiert. Abbildung 4.5 zeigt das Package des unveränderten und des optimierten Originalfahrzeugs (jeweils zwei Balken bei „Originalfahrzeug“ für a) Herstellkosten und b) Verbrauch in Abbildung 4.4).

Der Optimierer hat dabei insbesondere die Übergänge weitgehend reduziert und die Scheibenwinkel verringert. Das Kofferraumvolumen wurde vollständig auf den hinteren Kofferraum umverteilt und durch einen erhöhten Kofferraumdeckel die Unterbringung des geforderten Volumens gewährleistet. Die Antriebstopologie bleibt weitgehend unverändert und besteht auch in der optimierten Variante aus jeweils einer Maschine pro Achse. Die Batterie konnte vollständig unter die Sitze verlagert werden, was zu einem ähnlich niedrigen Fahrzeug

führt, das aber ein höheres H30-Maß hat. Das führt zu einem besseren Komfort ähnlich wie bei einem SUV, der über ein höheres H30 Maß verfügt [111, S. 93]. Die Verlagerung der Batterie unter den Sitz statt in den Unterboden stellt damit eine Auflösung des Zielkonfliktes aus Fahrzeughöhe und bequemer Sitzhaltung dar.

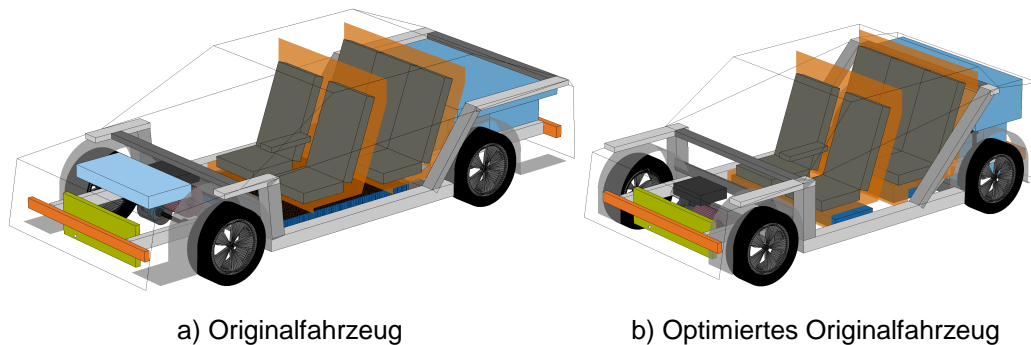


Abbildung 4.5: Vergleich des Packages des Originalfahrzeugs ohne Optimierung (a) und mit Optimierung (b) in konventioneller Sitzkonfiguration

Die Einsparungen bei Verbrauch und Kosten von einem optimierten Fahrzeug werden vor allem durch die reduzierte Masse und kompaktere Außenabmessungen ermöglicht. Diese führen zu Sekundäreffekten wie schmälere Reifen, die wiederum einen niedrigeren Rollwiderstand und eine größere Breite für den Kofferraum im Hinterwagen zur Folge haben. Ob der Kofferraum trotz gleichen Volumens eine ähnlich gute Praktikabilität für einen Taxibetrieb gewährleisten kann, müsste analog zum Beispiel aus dem vorherigen Kapitel 4.1.1 in einer weiteren Untersuchung geprüft werden.

Anpassung des Fahrzyklus

Im nächsten Schritt wurde der Fahrzyklus vom WLTP [99], mit dem das Originalfahrzeug ausgelegt wurde, auf den ARTEMIS Urban [157, S. 1] bei gleichbleibender Reichweite geändert. Hintergrund ist die überwiegende Nutzung des Taxis in der Stadt und damit eine schlechte Eignung des WLTP wegen des großen Überland- und Autobahnanteils. Diese Maßnahme führt zu einer Erhöhung des Verbrauchs um 4,4%, obwohl im ARTEMIS Urban niedrigere Geschwindigkeiten gefahren werden. Ursache ist der in Kapitel 3.2.4 genannte zeitabhängige Energiebedarf der Nebenverbraucher. Dieser kann in Fahrzyklen mit niedrigen Geschwindigkeiten dazu führen, dass durch die längere Fahrdauer bei gleicher Reichweite der geringere Verbrauch durch niedrigere Fahrwiderstände überkompensiert wird. Dieser Effekt wird im späteren Kapitel 4.2.1 ausführlicher untersucht.

Bei den Herstellkosten des optimierten Fahrzeugs wird eine leichte Verbesserung um ca. 1% zum Originalfahrzeug erreicht. Grund dafür ist die Reduktion der Anzahl der Antriebseinheiten auf eine Heckmaschine, was die gestiegenen Batteriekosten durch den Mehrverbrauch überkompensieren kann. Im Gegensatz zum WLTP, wo ein Allradantrieb in den bisher gezeigten Beispielen zu einer höheren Effizienz geführt hat, ist bei der Auslegung mit dem ARTEMIS Urban Zyklus eine Maschine effizienter.

Anpassung der Sitzkonfiguration

AV gewinnen durch den Entfall des Fahrerarbeitsplatzes neue Freiheiten in Bezug auf mögliche Sitzkonfigurationen. Bei einem Fahrzeug mit zwei Sitzreihen stehen drei sinnvolle Konfigurationen zur Verfügung (Konventionell, Vis-à-vis, Rücken-an-Rücken). Die optimierte Vis-à-vis Konfiguration (Abbildung 4.6a) zeigte in diesem Beispiel mit 1,24% Einsparung im Verbrauch bei nahezu gleichen Kosten leichte Vorteile gegenüber dem optimierten konventionellen Fahrzeug (Abbildung 4.5b). Auffallend ist auch hier eine mögliche Platzierung der Batterie unter den Sitzen und eine damit einhergehende Erhöhung des H30 Maßes. Zoox begründet die Vorteile der Vis-à-vis Anordnung ebenfalls durch den möglichen Platz für Batterie und Antriebsstrang unterhalb der Sitze [187, S. 1].

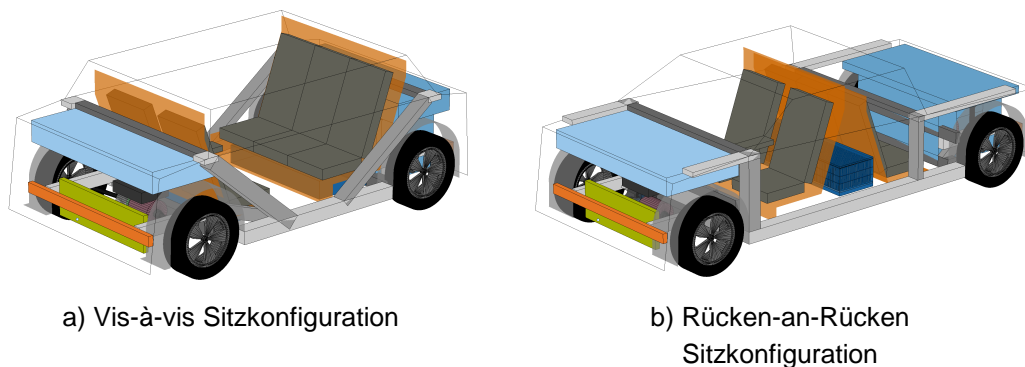


Abbildung 4.6: Package der optimierten Fahrzeuge mit a) Vis-à-vis Sitzkonfiguration und b) Rücken-an-Rücken Sitzkonfiguration

Die Rücken-an-Rücken Anordnung bietet laut dem Start-Up Page Roberts [169] deutliche Vorteile gegenüber einer reinen Unterbodenbatterie. Bei der Optimierung mit dieser Sitztopologie ist vor allem der deutlich gestiegene Radstand auffällig (Abbildung 4.6b). Dieser führt zu einem deutlichen Massenanstieg und einer Kosten- und Verbrauchserhöhung um ca. 7% im Vergleich zum optimierten Fahrzeug mit konventioneller Sitzanordnung. Die von Page Roberts genannten Vorteile der niedrigeren Stirnfläche durch die Platzierung der Batterie zwischen den Sitzen können zwar bestätigt werden, im WLTP wiegen diese die höhere Masse aber nicht auf. Die einzige Anwendung, bei der Vorteile mit dieser Sitzkonfiguration denkbar wären, ist somit ein Langstreckenfahrzeug, das sich die meiste Zeit mit höheren Geschwindigkeiten bewegt.

Anpassung der Reichweite

Es wird eine Reduktion der Reichweite von 450km auf 350km untersucht, weil bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 17,65km/h im städtischen Raum (ARTEMIS Urban [158]) eine Fahrstrecke von 450 km mehr als 25 Betriebsstunden entspricht und die Anforderungen an einen Taxibetrieb damit deutlich übererfüllt werden. 350 km hingegen entsprechen ca. 20 Stunden Betrieb, womit eine vierstündige Pause für Wartungs- und Reinigungsarbeiten, sowie Laden möglich wäre. Zoox plant für ihr AV mit 16 Stunden eine ähnliche Betriebsdauer [187, S. 2].

Im Vergleich zum optimierten Originalfahrzeug kann durch die Reduzierung der Reichweitenanforderung um 22,2% und zunächst einer erneuten Verwendung des WLTP

Zyklus eine Kosteneinsparung von 9,9% und eine Verbrauchsreduktion von 2,1% erreicht werden. Die geringe Einsparung im Verbrauch wird vor allem durch den höheren Anteil der masseunabhängigen Fahrwiderstände im WLTP verursacht. Während in einem Stadtzyklus ca. 80% des Verbrauchs auf masseabhängige Fahrwiderstände zurückzuführen sind, sind es bei Überlandfahrten nur 40% bis 50% [62, S. 8]. Durch die Rekuperationsmöglichkeit des elektrischen Antriebsstrangs wird der Einfluss der Masse auf den Verbrauch weiter reduziert.

Anpassung der Fahrleistungen

Weil die Fahrleistungen des Originalfahrzeugs deutlich zu hoch für eine reguläre Taxifahrt in einem städtischen Gebiet sind (Tesla Model S 75D: 0-100km/h: 4,4s, v_{\max} : 225km/h [228]), werden die Auswirkung deren Reduzierung auf das Gesamtfahrzeug untersucht. Analog zu Kapitel 4.1.1 werden diese auf 130km/h und 11s von 0 auf 100km/h verringert. Während der Verbrauch des optimierten Fahrzeugs dadurch nahezu identisch mit dem optimierten Originalfahrzeug ist, kann durch die Reduzierung der Anforderungen und damit kleinere Dimensionierung des Antriebsstrangs eine Kosteneinsparung von 7,6% realisiert werden.

Anwendung aller Anpassungen

Werden alle bisherigen Maßnahmen zusammengeführt, kann eine optimale Lösung (Abbildung 4.7) ähnlich der Lösung mit Vis-à-vis Konfiguration (Abbildung 4.6a) gefunden werden. Die Maßnahmen, die zu Einsparungen führen (Sitzkonzept, Reichweite, Fahrleistungen) wirken dabei der Änderung des Fahrzyklus entgegen, die zu einer Erhöhung der Kosten und des Verbrauches führt. Dies resultiert im Vergleich zum nicht optimierten Originalfahrzeug in Summe in einer Reduktion der Herstellkosten um 25% und einer Verringerung des Verbrauchs um 16%. Die Erhöhung des Verbrauchs durch die Wahl des Stadtzyklus konnte demnach durch andere, positive Maßnahmen kompensiert werden.

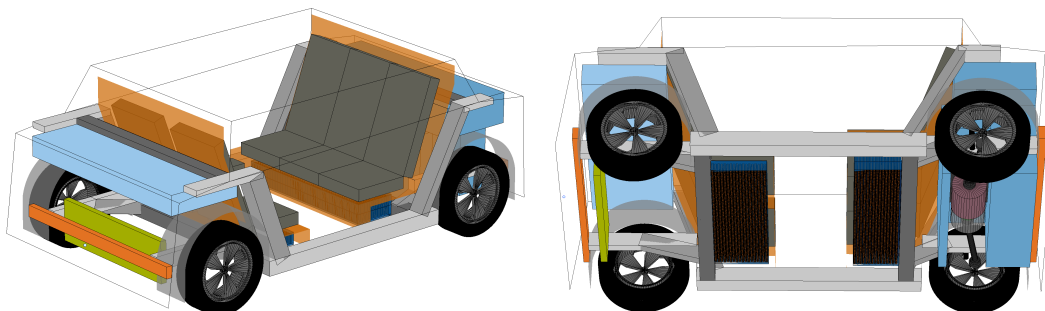


Abbildung 4.7: Package der optimalen Lösung unter Anwendung aller vorherigen Maßnahmen

Das gesamte Einsparpotential aller Maßnahmen zusammen entspricht dabei nicht der Summe der Einsparungen aller Einzelmaßnahmen. Die Ursache ist die Anpassung der gleichen Parameter in den einzelnen Optimierungen wie z.B. die Verkürzung der Überhänge zur Reduzierung der Fahrzeugmasse. Nachdem diese Maßnahme in jeder Einzeloptimierung durchgeführt wurde, tritt sie in der Gesamtoptimierung nur einfach und nicht als Summe aller Einzeloptimierungen in Erscheinung.

Im Vergleich zur Optimierung des VW ID.3 (Kapitel 4.1.1) wird deutlich, dass eine größere Freiheit in der Anpassung der Fahrzeugeigenschaften auch zu höheren Potentialen führt. Neben

der Optimierung von ausgewählten Parametern sollte gleichzeitig eine Anpassung der Anforderungen an ein AV überprüft und überarbeitet werden. Dies gilt insbesondere für spezifische Anwendungsfälle (hier: ein Taxi für den städtischen Raum), weil diese deutlich vom Anwendungsfall des konventionellen Privatfahrzeugs abweichen können. Maßnahmen wie reduzierte Anforderungen an die Längsdynamik oder auf das Szenario angepasste Reichweiten können dann insbesondere die Herstellkosten reduzieren. Es wird weiter deutlich, dass für spezifische Nutzungsszenarien neuartige Topologien (hier: Vis-à-vis Sitzkonfiguration und Unter-Sitz-Batterie) geeigneter sein können als die konventionelle Topologie (konventionelle Sitzkonfiguration, Unterbodenbatterie) von bisherigen Fahrzeugen. Ein Purpose Design eines AV kann demnach anders als das eines BEV ausfallen und muss für jeden Nutzungsfall neu ermittelt werden.

4.1.3 UNICARagil - autoTAXI

Im vorherigen Kapitel wurde ein BEV, das für den Privatbesitz gestaltet wurde und als Taxi eingesetzt wird, für den Anwendungsfall eines autonomen Taxis für den urbanen Raum angepasst. Im Projekt UNICARagil [30], das die Entwicklung einer modularen Plattform für automatisierte und elektrische Fahrzeuge für den städtischen Raum zum Ziel hat, wurde genau solch ein Fahrzeug bereits entworfen: das autoTAXI [222].

Das autoTAXI ist mit einer Vis-à-vis Sitzkonfiguration ausgestattet und soll die Funktion eines Taxis im städtischen Verkehr übernehmen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus dem vorherigen Kapitel wurde allerdings eine Unterbodenbatterie statt einer Unter-Sitz-Batterie gewählt. Im Folgenden soll mit dem autoTAXI als Ausgangspunkt überprüft werden, welche Optimierungen möglich wären und welche Einsparpotentiale sie zur Folge hätten. Als Zeitraum wurde das Jahr 2030 gewählt, um Einflüsse wie die sich verbessernden Batterieeigenschaften und sinkenden Kosten für Sensorik zu berücksichtigen. Insbesondere die prognostizierten Kosten für LiDAR und Recheneinheit sinken bis zum Jahr 2030 (Tabelle E.2).

Für das autoTAXI mussten einige Annahmen getroffen werden, weil teilweise Daten nicht bekannt waren oder Technik verwendet wurde, die durch den Prototypenstatus der Fahrzeuge für einen Serieneinsatz nicht geeignet wäre. Im Projekt wurden keine genauen Anforderungen an die Längsdynamik gestellt. Deshalb wird für das Originalfahrzeug eine Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h und eine Beschleunigungszeit von 11 s von 0 auf 100 km/h angenommen. Das Realfahrzeug würde voraussichtlich durch die geringe Leistung der vier Maschinen schlechtere Werte erreichen, für die Berechnung mussten diese Mindestwerte jedoch verwendet werden, um innerhalb der Modellgrenzen für den Antriebsstrang zu bleiben. Im gebauten Prototypen wurden weiterhin Dynamikmodule von Schäffler verwendet, die Radnabenmotoren und fast um 180° lenkbare Radstelleinheiten umfassen. Weil in dieser Arbeit aufgrund ihrer Nachteile weder die Radnabenmotoren (Kapitel 3.2.2), noch die nicht serienerprobten Radstelleinheiten umgesetzt wurden, werden für die Grundkonfiguration vier radnahe Maschinen und eine Allradlenkung mit einem Wendekreis von 7 m gewählt.

Mehrere Anforderungen und daraus resultierende Veränderungen am Fahrzeug werden analog zum Kapitel 4.1.2 überprüft (Abbildung 4.8):

- Die Erhöhung der Reichweite von 200 km auf 400 km soll zeigen, ob sich bei steigender Anforderung die optimale Lösung verändert.
- Gegenläufig zum Taxi im vorherigen Kapitel soll überprüft werden, ob das konventionelle Sitzlayout Vor- oder Nachteile bringen würde.

- Im Falle eines Einsatzes im rein autonomen Verkehr wird eine Reduktion der Crashlänge von 700 mm auf 100 mm überprüft.
- Weil das autoTAXI bisher über keinen separaten Gepäckraum verfügt, soll untersucht werden, ob die Ergänzung eines Gepäckraums von 900 Litern das Fahrzeug verändert.
- Der Erhöhung des klein gewählten Wendekreises auf 12 m soll zeigen, ob dadurch positive Auswirkungen auf das Fahrzeugpackage entstehen.

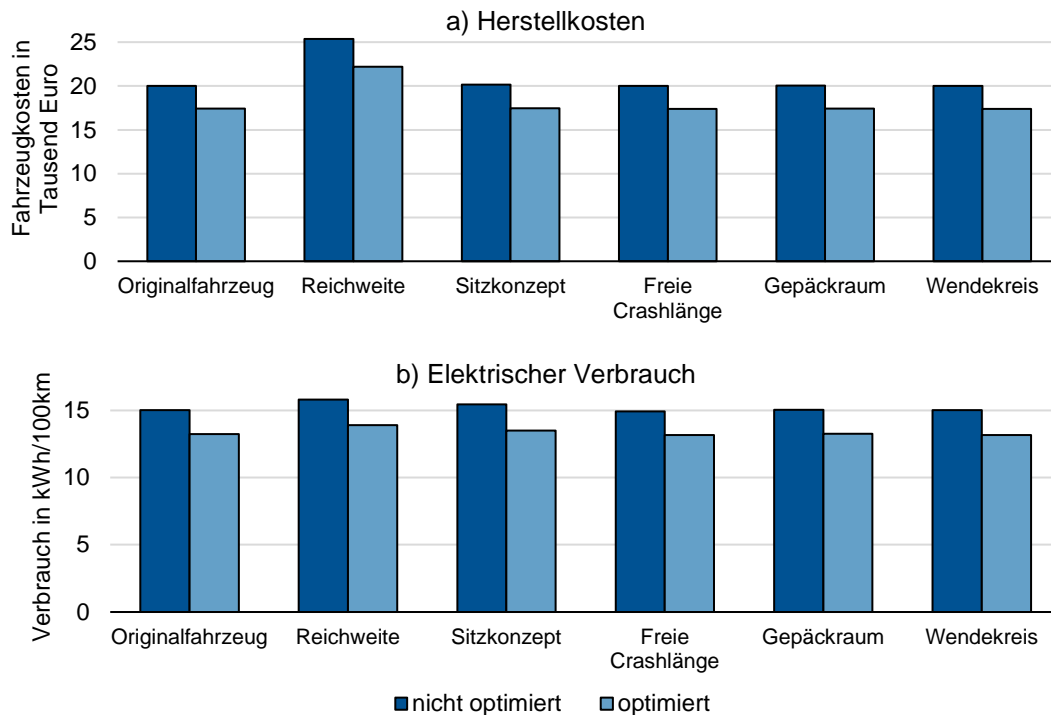


Abbildung 4.8: Verschiedene Anpassungen und Optimierungen des autoTAXI aus dem Projekt UNICARagil

Originalfahrzeug

Die Optimierung des Originalfahrzeuges führt zu einer Reduktion der Kosten um 13,0% und einer Verbrauchsreduktion von 13,5% (Abbildung 4.8). Für letztere ist insbesondere der Wechsel von vier Maschinen an zwei Achsen auf eine Maschine an der Hinterachse verantwortlich (Abbildung 4.9a/b). Dadurch können durch die Verbindung aus niedrigen Längsdynamikanforderungen und dem städtischen ARTEMIS Urban Fahrzyklus bessere Betriebspunkte im Maschinenkennfeld erreicht und der Verbrauch deutlich reduziert werden.

Die Karosserie mit dem ursprünglichen One-Box-Design wurde mit einer Stufenheck-Front und einem -Heck versehen und die Überhänge so weit reduziert, dass die freie Crashlänge gerade eingehalten wird. Das führt zu Masseinsparungen in der Karosserie, die keinen ungenutzten Raum mehr umschließen muss.

Zuletzt wurde die Batterie unter die Sitze verschoben, damit eine niedrigere Stirnfläche erreicht wird. Im autoTAXI Prototypen sind unterhalb der Sitze großvolumige Standard-PCs platziert, die herkömmliche Grafikkarten verwenden. Weil in einem Serienfahrzeug die Recheneinheit deutlich kleiner ausfallen würde, kann bei der optimierten Variante dieser Raum für die Batterie

genutzt werden. Das Fahrzeug fällt damit flacher aus und erreicht trotzdem ein ähnliches H30-Maß wie im Originalfahrzeug.

Anpassung der Anforderungen

Eine Unter-Sitz-Batterie und eine Heckmaschine wird auch für die konventionelle Sitzkonfiguration gewählt (Abbildung 4.9c). Hier fällt der Verbrauch im Vergleich zur optimierten Vis-à-vis Variante (Abbildung 4.9b) um 2% höher aus (Abbildung 4.8), weil durch die Sitzkonfiguration ein längerer Radstand benötigt wird. Trotz Reduzierung des vorderen Überhangs und einer ähnlichen Gesamtlänge ergibt sich dadurch eine größere Masse.

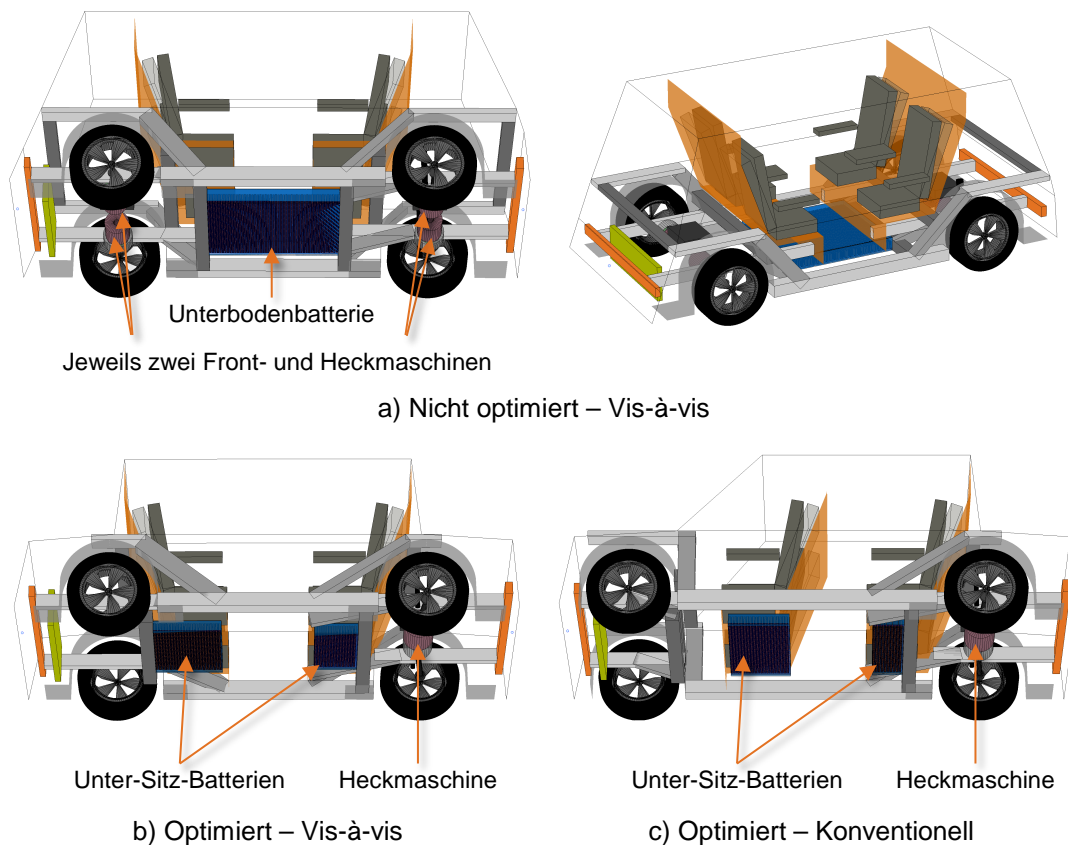


Abbildung 4.9: Vergleich des Packages von a) Originalfahrzeug und optimierter Variante in der b) Vis-à-vis und c) konventionellen Sitzkonfiguration am Beispiel des autoTAXI

Die Reduktion der vorderen und hinteren freien Crashlänge von 700 mm auf 100 mm (Abbildung 4.10a) bringt eine Kosten- und Verbrauchseinsparung von weniger als 1% (Abbildung 4.8). Weil hier lediglich die Überhänge weiter reduziert werden und damit nur die Karosserie an den äußeren Stellen betroffen ist, fällt die Auswirkung für das Fahrzeug gering aus. Eine umfassendere Untersuchung findet in Kapitel 4.2.1 statt.

Das Hinzufügen von Gepäckvolumen (Abbildung 4.10b) und die Erhöhung des Wendekreises haben einen kaum feststellbaren Einfluss auf das Fahrzeug, sowohl im optimierten als auch nicht optimierten Zustand (Abbildung 4.8). Die Ursache dafür ist die geringe nötige Veränderung am Fahrzeug. So beeinflusst der Gepäckraum die Überhänge lediglich in einem geringen Umfang, während der Wendekreis trotz schmalerer Radhäuser keine Veränderung der Fahrzeugbreite zur Folge hat, weil diese beim autoTAXI durch den Fahrzeuginnenraum bestimmt wird.

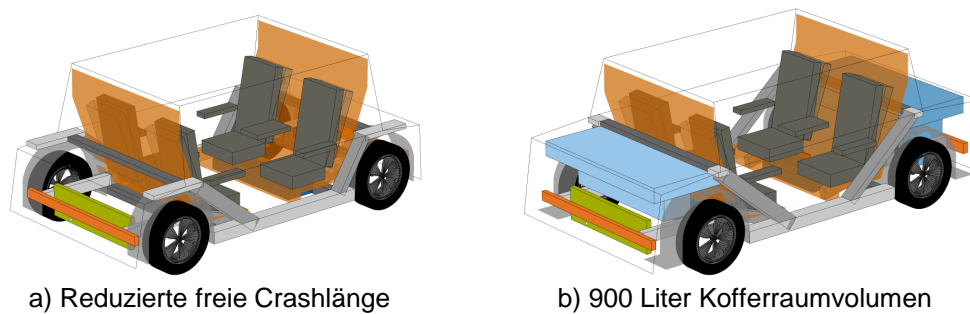


Abbildung 4.10: Package der optimalen Varianten mit a) reduzierter freier Crashlänge und b) 900 Liter Kofferraumvolumen am Beispiel des autoTAXI

Dieses Kapitel zeigt ein ähnliches Fazit wie Kapitel 4.1.2: Die ideale Topologie, die ein innerstädtisches Fahrzeug für den Taxibetrieb haben sollte, entspricht nicht dem bekannten Fahrzeugdesign von BEV. Stattdessen sollte die Batterie möglichst unter den in Vis-à-vis angeordneten Sitzen platziert werden, um eine niedrige Einstiegshöhe und ein komfortables H30-Maß zu erreichen. Die genannten Ergebnisse scheint Zoox ebenfalls ermittelt zu haben (Kapitel 3.3.2), weil diese die gleiche Topologie für ihr Fahrzeug gewählt haben. Für den Fall, dass eine Trennung der Sitzreihen erfolgen soll oder Bedenken aufgrund einer möglichen Reisekrankheit von entgegen der Fahrtrichtung ausgerichteten Sitzen bestehen, kann unter Mehrkosten und -verbrauch weiterhin ein konventionelles Sitzlayout gewählt werden.

4.2 Szenarienabhängige Potentiale von autonomen Fahrzeugkonzepten

Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben sind die Potentiale durch AV in vielen Fällen abhängig von deren Durchdringungsrate. In dieser Arbeit werden nur Potentiale abgeschätzt, die sich auf ein einzelnes Fahrzeug beziehen. Eine Hochrechnung der Gesamteinsparung muss im Rahmen einer Arbeit erfolgen, die gesamte Flotten oder Verkehrssysteme untersucht.

Die Untersuchung von Potentialen erfolgt in zwei Schritten. Zunächst sollen unterschiedliche Verkehrsszenarien betrachtet werden, die das Fahrzeug hinsichtlich der Anforderung an Längsdynamik und Crashesicherheit beeinflussen können (Kapitel 4.2.1). Im Anschluss sollen die Auswirkungen von veränderten Anforderungen durch neue Geschäftsmodelle untersucht werden (Kapitel 4.2.2). Dazu gehört unter anderem eine spezialisiertere Auslegung des Fahrzeugs auf einzelne Nutzungsfälle und die Vermeidung einer Überdimensionierung des Fahrzeugs.

4.2.1 Einfluss der Verkehrsszenarien

Würde eine Einführung von AV heute stattfinden, wäre der Betrieb nur im Mischverkehr mit anderen, von menschlichen Fahrern gesteuerten Fahrzeugen möglich. Während in Deutschland eine solche Einführung auch in naher Zukunft wahrscheinlich ist, gibt es in anderen Ländern wie China stark regulierte Städte, in denen eine schlagartige Umstellung zu einem rein autonomen Verkehr denkbar ist [17, S. 19]. Weil in diesem Fall die Anforderungen sowohl an die Crashesicherheit als auch an die Längsdynamik überdacht werden müssen, soll in diesem Kapitel detailliert untersucht werden, welche Potentiale deren Anpassung für das Fahrzeug hat.

Einfluss der passiven Sicherheit in Form der freien Crashlänge

Das Verletzungsrisiko wird nach Unselt [48, S. 230] als das Produkt aus Unfallrisiko und Insassenschutz definiert. Fällt das Verletzungsrisiko unterhalb eines gewissen Schwellenwerts, wird das Verkehrsmittel vom Nutzer akzeptiert. Wird durch autonomes Fahren das Unfallrisiko minimiert, kann zur Kostenreduktion der Insassenschutz verringert werden und dennoch ein gleiches Verletzungsrisiko gehalten werden [48, S. 231]. Im Mischverkehr wird voraussichtlich keine Änderung des Insassenschutzes möglich sein, weil das Unfallrisiko weiterhin von manuell gefahrenen Fahrzeugen bestimmt wird. Im Gegensatz dazu kann in einem Verkehrsszenario, in dem nur noch AV teilnehmen, der Insassenschutz und damit auch Kosten voraussichtlich reduziert werden.

Der Insassenschutz im Bereich der passiven Sicherheit wird in der vorliegenden Arbeit über die freie Crashlänge repräsentiert. Inwieweit die Reduktion dieses Wertes Einsparungen mit sich bringt, soll am Beispiel des autonomen Taxis für München (Kapitel 4.1.2) und des autoTAXI von UNICARagil (Kapitel 4.1.3) untersucht werden. Die Anforderungen an z.B. Längsdynamik und Reichweite werden jeweils vom Originalfahrzeug übernommen und eine Optimierung für jede geforderte Crashlänge durchgeführt.

Die vordere und hintere freie Crashlänge wird gleichzeitig zwischen 0mm und 750mm variiert, die seitliche zwischen 0mm und 300mm (Abbildung 4.11). Die vordere und hintere Crashlänge hat für beide Fahrzeuge nur einen geringen Einfluss auf die Kosten und den Verbrauch. Während beim autoTAXI eine maximale Kosten- und Verbrauchsreduktion von ca. 1% möglich ist, liegt der Unterschied beim Taxi München unter 0,5%.

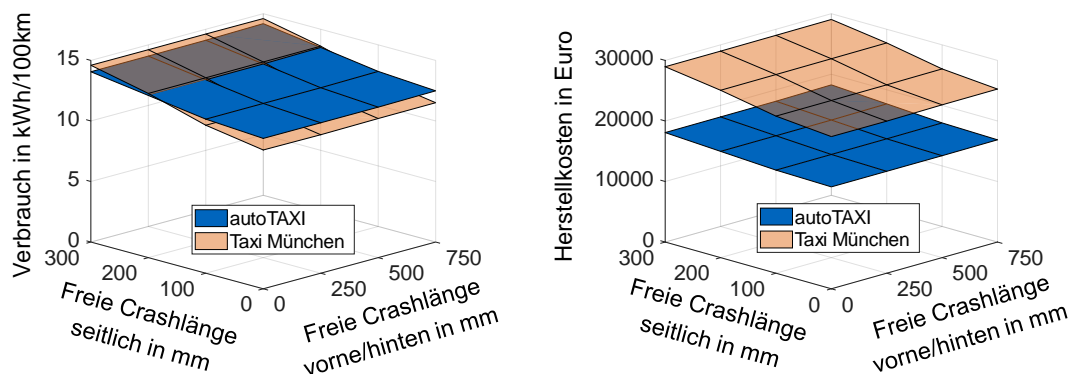


Abbildung 4.11: Auswirkungen der geforderten freien vorderen/hinteren und seitlichen Crashlänge auf die Kosten und den Verbrauch am Beispiel des autoTAXI (ARTEMIS Urban Zyklus) und Taxi München (WLTP Zyklus)

Der Grund des niedrigen Potentials bei Verringerung der vorderen und hinteren Crashlänge liegt zum einen daran, dass nur der Vorder- bzw. Hinterwagen verkürzt wird. Weil der Vorder- und Hinterwagen nur einen geringen Masseanteil am Gesamtfahrzeug haben, ändert sich deshalb die Gesamtmasse des Fahrzeugs nur gering. Zum anderen wird beim autoTAXI und Taxi München die tatsächliche Crashlänge im Ausgangszustand (Abbildung 3.18) zwischen ca. 250mm und 500mm erreicht, was zu keiner weiteren Veränderung des Fahrzeuges ab diesem Punkt führt. Die Ursache für den Unterschied zwischen dem autoTAXI und dem Taxi München sind die unterschiedlichen Fahrzyklen, die bei der Auslegung verwendet werden. Weil die masseabhängigen Fahrwiderstände beim WLTP Zyklus des Taxi München geringer sind [62, S. 8], fällt die Reduktion des Verbrauchs noch geringer aus als beim autoTAXI.

Weil der Anteil des masseunabhängigen Luftwiderstands beim Taxi München im WLTP Zyklus durch höhere Geschwindigkeiten wiederum größer ist, lässt sich ein höherer Einfluss der seitlichen Crashlänge erkennen (Abbildung 4.11). Zwischen 0mm und 300mm reduziert sich der Verbrauch um bis zu 22%, während beim autoTAXI nur bis zu 12% Einsparung möglich sind. Die Kosten verringern sich entsprechend um 13% beim Taxi München bzw. um 7% beim autoTAXI.

Die optimalen Lösungen der beiden Fahrzeuge in Abhängigkeit von der freien Crashlänge weichen auch in Bezug auf ihr Package voneinander ab (Abbildung 4.12). Beim autoTAXI findet nur eine geringe Veränderung statt. Durch die Verkürzung des Vorderwagens muss dieser erhöht werden, damit das geforderte Komponentenvolumen (Kapitel 3.2.3) weiterhin untergebracht werden kann. Das Taxi München wird wiederum hinsichtlich der Kofferraumverteilung am meisten verändert. Hier findet eine Verteilung des gesamten Volumens auf den Hinterwagen statt, damit im Vorderwagen ausreichen Platz für das Komponentenvolumen bleibt.

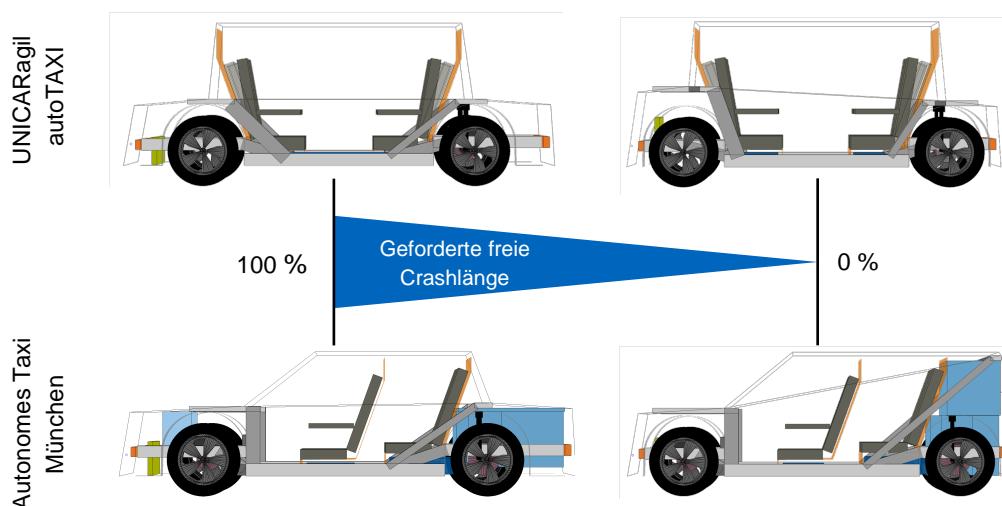


Abbildung 4.12: Veränderung des autoTAXI und Taxi München durch die Optimierung in Abhängigkeit von der freien Crashlänge

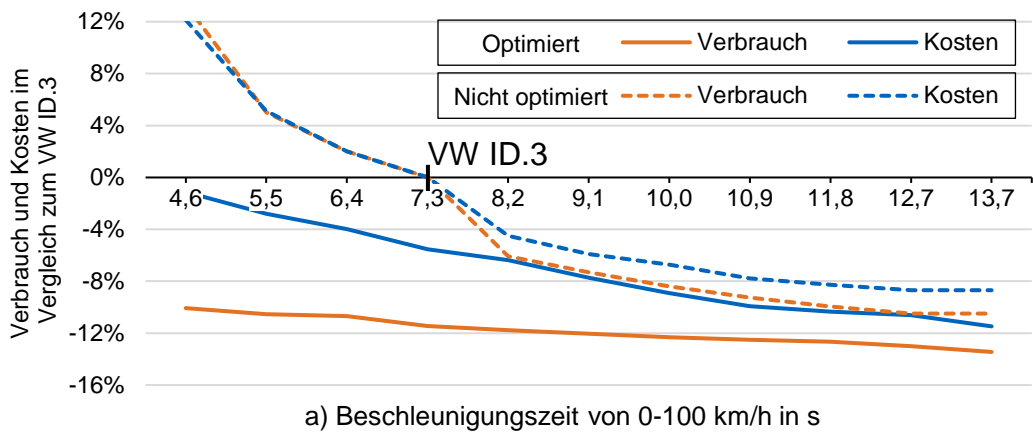
Zusammenfassend hat insbesondere die seitliche freie Crashlänge einen großen Einfluss auf den Verbrauch ($(0,55 \text{ kWh}/100 \text{ km})/100 \text{ mm}$) und die Kosten ($416 \text{ €/}100 \text{ mm}$) des Fahrzeugs. Weil aber wie in Kapitel 2.1.4 erwähnt eine Veränderung der Häufigkeit in Richtung seitlicher Kollisionen für autonome Fahrzeuge denkbar ist, entsteht ein Zielkonflikt. Fahrzeuge im Mischverkehr werden durch ähnliche Anforderungen hinsichtlich der passiven Sicherheit folglich wenig Einsparpotential aufweisen. Im rein autonomen Verkehr würde wiederum die Reduktion der seitlichen freien Crashlänge zu einer Einsparung hinsichtlich Kosten und Verbrauch führen. Das größte Potential ergibt sich dann bei Fahrzeugen, die mit hohen Geschwindigkeiten betrieben werden.

Einfluss von Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit

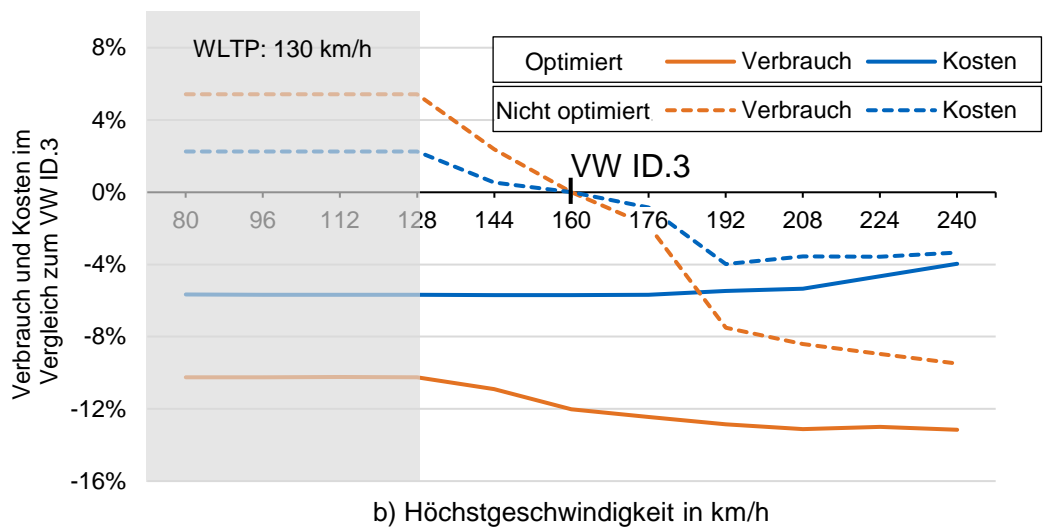
Am Beispiel des autonomen VW ID.3 (Kapitel 4.1.1) und des Taxis für eine Großstadt (Kapitel 4.1.2) wurde bereits gezeigt, dass eine Anpassung der Fahrleistungen zu Einsparungen führen kann. Für AV ohne manuelle Fahrfunktion bietet sich diese Maßnahme an, weil zum einen eine Maschine die Regelung der Längsdynamik übernimmt und damit die Fahrweise bereits bei der Auslegung bekannt ist. Zum anderen kann durch eine Spezialisierung der Fahrzeuge für Stadt

oder Überlandfahrten eine spitzere Auslegung gewählt werden. Aus diesen Gründen wird in diesem Unterkapitel der Einfluss der Längsdynamikanforderungen auf den Verbrauch und die Herstellkosten eines Fahrzeugs untersucht. Der VW ID.3 (Kapitel 4.1.1) dient als Ausgangsfahrzeug, weil seine Beschleunigungszeit und Höchstgeschwindigkeit zwischen den anderen bisher verwendeten Fahrzeugen liegt (Taxi München, autoTAXI).

Ausgehend von den Fahrleistungen des VW ID.3 (7,3s von 0-100km/h, 160km/h) wird die Beschleunigung und die Höchstgeschwindigkeit separat voneinander erhöht (Abbildung 4.13).



a) Beschleunigungszeit von 0-100 km/h in s



b) Höchstgeschwindigkeit in km/h

Abbildung 4.13: Auswirkungen der geforderten Beschleunigung von 0-100km/h und Höchstgeschwindigkeit auf Kosten und Verbrauch im WLTP Zyklus

Einerseits wird nur die Beschleunigung oder die Höchstgeschwindigkeit des nicht optimierten Originalfahrzeugs verändert und der Antriebsstrang erneut passend dimensioniert. Die Antriebsstrangtopologie des Originalfahrzeugs (Heckmaschine) bleibt dabei erhalten. Andererseits wird für jede Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsanforderung eine Optimierung des Antriebsstrangs durchgeführt. Das Interieur und Exterieur des Fahrzeugs bleibt in beiden Fällen unverändert.

Einfluss der Beschleunigungsanforderung

Die Kosten und der Verbrauch in Abhängigkeit von der Beschleunigungszeit zeigen, dass ein geringeres Beschleunigungsvermögen in jedem Fall zu einer Einsparung führt. Die optimierte und nicht optimierte Variante nähern sich dabei bei immer niedriger Beschleunigung bzw. höherer Beschleunigungszeit einander an. Das kann dadurch erklärt werden, dass die Antriebsstrangtopologie des VW ID.3 (Heckmaschine) für niedrigere Beschleunigungen zu besseren Betriebspunkten in der elektrischen Maschine während des Fahrzyklus führt. Wird hingegen eine hohe Beschleunigung gefordert, wählt der Optimierer eine kleine Maschine an der Vorderachse und eine große Maschine an der Hinterachse. Die große Maschine wird genutzt, damit die hohe Beschleunigung erzielt wird, die kleine Maschine führt zu guten Betriebspunkten im WLTP Zyklus. Das führt zu deutlichen Vorteilen gegenüber einer großen Heckmaschine mit ungünstig liegenden Betriebspunkten im nicht optimierten Originalfahrzeug. Die Kosten sinken bzw. steigen in beiden Varianten entsprechend mit dem Verbrauch, weil eine kleinere bzw. größere Batterie und elektrische Maschine benötigt wird.

Einfluss der geforderten Höchstgeschwindigkeit

Die Variation der Höchstgeschwindigkeit zeigt hingegen ein unerwartetes Verhalten. Unterhalb von ca. 130 km/h gibt es keine Veränderung mehr, weil die Höchstgeschwindigkeit unter die Zyklusgeschwindigkeit des WLTP fällt. In diesem Fall wird die maximale Zyklusgeschwindigkeit als Höchstgeschwindigkeit verwendet (Kapitel 3.2.2). Bei Geschwindigkeiten, die höher sind, sinkt der Verbrauch unerwartet mit steigender Geschwindigkeit. Grund dafür ist die Verlagerung der Betriebspunkte im Zyklus in einen Bereich des Effizienzkennfelds mit besserem Wirkungsgrad (Abbildung 4.14).

Während bei einer Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h (Abbildung 4.14a) die Betriebspunkte bei höheren Drehzahlen auch in schlechtere Bereiche verschoben sind, liegen die Punkte bei 240 km/h (Abbildung 4.14b) in einem engeren Bereich bei niedrigeren Drehzahlen. Ein wichtiger Grund für dieses Verhalten ist die Wahl des Effizienzkennfeldes des Tesla Model 3 (Kapitel 3.2.2). Dieses Fahrzeug wurde ebenfalls für Zyklen ähnlich des WLTP hinsichtlich des Verbrauchs ausgelegt, kann aber eine Höchstgeschwindigkeit von 225 km/h leisten (Tabelle F.1). Das Ergebnis belegt damit, dass dieses Kennfeld für diese Anforderungen optimiert wurde. Kalt [160] beschreibt diese Art der Maschinenauslegung bereits als Nachteil und schlägt deshalb einen anwendungsbezogenen Ansatz vor. Das sinkende Maximalmoment beider Maschinen bei größerer Höchstgeschwindigkeit aber gleichbleibender Beschleunigungsanforderung wird durch ein länger anliegendes Maximalmoment verursacht (Kapitel 3.2.2).

Die Veränderung der Kosten bei steigender Höchstgeschwindigkeit ergeben sich aus der Differenz zwischen einer kleiner werdenden Batterie aufgrund eines sinkenden Verbrauchs und größer werdenden elektrischen Maschinen mit höheren Leistungen. Erst ab ca. 190 km/h überwiegen die Maschinenkosten und führen zu steigenden Herstellkosten.

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung, dass die Reduzierung der Beschleunigungsanforderung bei AV eine sinnvolle Maßnahme ist, um die Herstellkosten und den Verbrauch zu reduzieren. Die Verringerung der Höchstgeschwindigkeit und die daraus resultierende niedrigere Maximaldrehzahl der Maschine kann, wie oben gezeigt, sogar negative Auswirkungen auf Verbrauch und Kosten haben. Eine auf den Anwendungsfall optimierte Auslegung der elektrischen Maschine mit angepasstem Effizienzkennfeld sollte stattdessen durchgeführt werden.

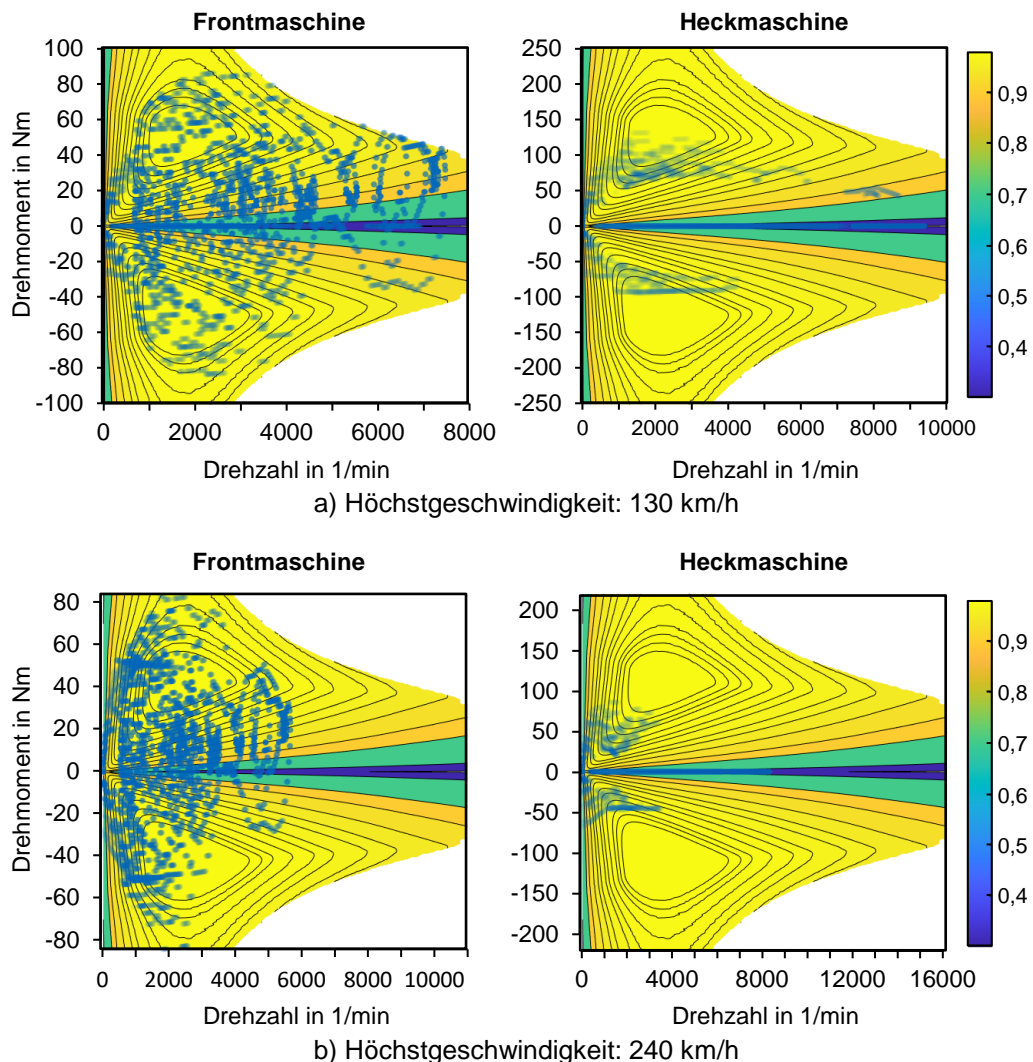


Abbildung 4.14: Betriebspunkte im Effizienzkennfeld der Elektromaschinen an der Vorder- und Hinterachse in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit a) 130 km/h und b) 240 km/h. Die Farbintensität der Betriebspunkte entspricht Häufigkeit, in der ein Punkt angefahren wurde.

Einfluss der Nebenverbraucher

In vorherigen Kapiteln wurde bereits gezeigt, dass Nebenverbraucher in Kombination unterschiedlicher Fahrzyklen eine entscheidende Rolle bei der Auslegung eines AV spielen. Zwei Untersuchungen in diesem Kapitel sollen darlegen, wie Nebenverbraucher konkret in der Auslegung berücksichtigt werden können und welche Maßnahmen helfen, den Einfluss des Nebenverbrauchs auf den Gesamtverbrauch zu verringern. Die erste Untersuchung soll zeigen, welchen Einfluss der Nebenverbrauch bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten auf den Verbrauch und die folglich benötigte Batteriekapazität hat. Die zweite Untersuchung analysiert den Einfluss der Klimatisierung und Heizung als größte Nebenverbraucher und deren Auswirkungen auf die Auslegung des Gesamtfahrzeugs.

1. Untersuchung: Nebenverbraucher bei verschiedenen Fahrzyklen

Die meisten Nebenverbraucher sind nicht von der Fahrtstrecke, sondern von der Fahrzeit abhängig [84, S. 4]. Welche Fahrzeit für eine bestimmte Fahrtstrecke benötigt wird, hängt wiederum von der gefahrenen Geschwindigkeit ab. Im Gegensatz zum Nebenverbrauch wird der Bedarf des Antriebsstrangs von zahlreichen Parametern wie der Geschwindigkeit und der Fahrzeugmasse beeinflusst und meistens in Bezug auf die Fahrtstrecke ermittelt (Kapitel 3.2.2). Der Anteil des Nebenverbrauchs am Gesamtverbrauch ist demnach von vielen Randbedingungen abhängig und soll im Folgenden untersucht werden.

Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrprofile und Geschwindigkeiten wurde ein Stadt- und ein Autobahnzyklus mit variablen Höchstgeschwindigkeiten erstellt (Anhang J) und der Einfluss des Nebenverbrauchs auf die Auslegung des Fahrzeugs untersucht. Der Stadtzyklus deckt ein einfaches Stop-and-Go Verhalten ab, wobei auf unterschiedliche Geschwindigkeiten beschleunigt wurde, bis erneut gestoppt werden muss (Abbildung J.1a). Die Höhe einer Beschleunigung wurde vom ARTEMIS Urban Fahrzyklus übernommen. Der Autobahnzyklus basiert auf dem Fahrzyklus ARTEMIS Motorway [157, S. 1, 158] und wurde mit unterschiedlichen Reisegeschwindigkeiten modifiziert (Abbildung J.1b). Für die Auslegung des Fahrzeugs werden diese Fahrzyklen so oft durchfahren, bis die geforderte Reichweite erreicht wird. Die dafür benötigte Gesamtenergie bestimmt die benötigte Batteriekapazität.

Der VW ID.3 dient in diesem Beispiel erneut als Ausgangsfahrzeug mit einer Reichweitenanforderung von 150 km im Stadtzyklus und 250 km im Autobahnzyklus. Diese Werte mussten gewählt werden, damit für alle Zyklusgeschwindigkeiten die Batterie noch im Fahrzeugpackage untergebracht werden kann. Für die Untersuchung wird bei der Auslegung nur der Nebenverbrauch und der Fahrzyklus, der zur Bestimmung des Verbrauchs für die Auslegung der Batterie benötigt wird, verändert. Die resultierende Batteriekapazität, die für das Erreichen der Reichweite von 150 km bzw. 250 km nötig ist, ist in Abhängigkeit von der Zyklusgeschwindigkeit in Abbildung 4.15 dargestellt.

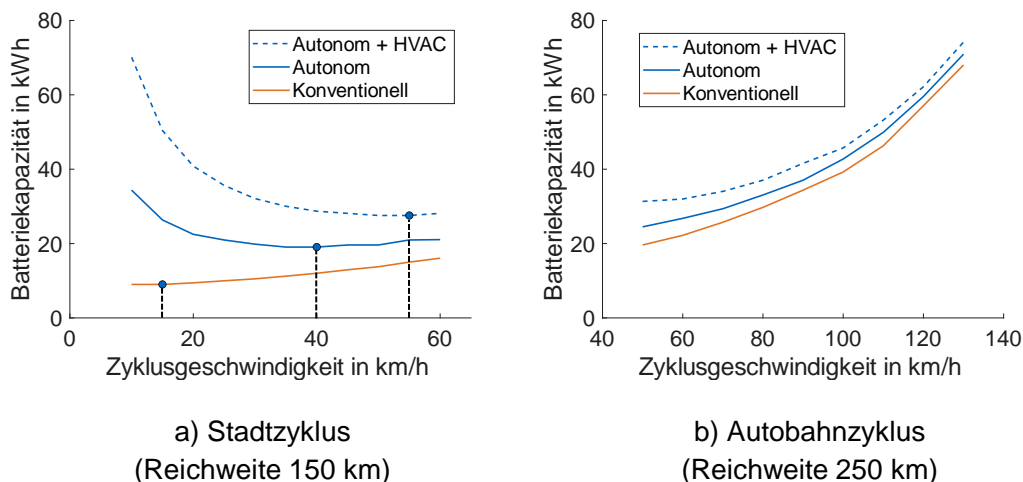


Abbildung 4.15: Vergleich von unterschiedlichen Zyklusgeschwindigkeiten eines Stadtzyklus bei einer Reichweitenanforderung von 150 km (a) und Autobahnzyklus bei einer Reichweitenanforderung von 250 km (b). Die Zyklusgeschwindigkeiten für minimale Batteriekapazität sind als blaue Punkte gekennzeichnet.

Beim konventionellen VW ID.3, bei dem nur die zum Fahrbetrieb nötigen Nebenverbraucher berücksichtigt werden, bedeutet eine niedrigere Fahrgeschwindigkeit auch einen verringerten

Gesamtverbrauch, der folglich zu einer geringeren Batteriekapazität führt. Erst unterhalb von 15 km/h überwiegen schlechte Bereiche im Maschinenkennfeld und die für den Fahrbetrieb nötigen Nebenverbraucher.

Beim autonomen VW ID.3 sollte durch den zeitabhängigen Nebenverbrauch von Sensorik und Rechner, die knapp 780 W Leistung benötigen, auf eine ideale Geschwindigkeit von 40 km/h im Stadtzyklus beschleunigt werden, damit ein minimaler Gesamtverbrauch erreicht werden kann. Kommt ein zusätzlicher Nebenverbrauch durch die Klimaanlage von ca. 1 kW hinzu, führt das zu einer weiteren Verschiebung auf 55 km/h. Es kann demnach eine Idealgeschwindigkeit, die von der Höhe des Nebenverbrauchs abhängig ist, für ein AV berechnet werden. Fährt das AV mit dieser Geschwindigkeit, kann die geforderte Reichweite bei minimal möglicher Batteriekapazität erreicht werden. Bei niedrigerer Geschwindigkeit erhöhen die Nebenverbraucher durch die längere Fahrzeit den Gesamtverbrauch. Bei höheren Geschwindigkeiten sinkt zwar die Fahrzeit und damit der anteilige Nebenverbrauch, dafür steigt aber der Fahrverbrauch durch die exponentiell steigenden Fahrwiderstände an (Kapitel 3.2.2).

Der Autobahnzyklus, bei dem ebenfalls die Reisegeschwindigkeit variiert wurde, zeigt, dass der Unterschied zwischen den Fahrzeugen bei höheren Geschwindigkeiten immer kleiner wird. Grund dafür ist der Anteil des Nebenverbrauchs am Gesamtverbrauch, der wegen steigender Fahrwiderstände und sinkender Fahrzeit bei gleicher Fahrtstrecke immer geringer wird. Obwohl sich das Fahrzeug hier bereits oberhalb der Idealgeschwindigkeit befindet und eine Erhöhung der Geschwindigkeit zwangsläufig zu einem höheren Gesamtverbrauch führt, kann zumindest der Einfluss des Nebenverbrauchs auf den Gesamtverbrauch mit steigender Geschwindigkeit reduziert werden.

2. Untersuchung: Einfluss der Klimatisierung auf die Auslegung

In der vorherigen Untersuchung wurde die Klimatisierung anhand eines beispielhaften Verbrauchswerts berücksichtigt. Im Folgenden soll die Klimatisierung und deren Auswirkungen auf das optimale Fahrzeugkonzept noch detaillierter betrachtet werden. Dafür wurde statt des VW ID.3 das autonome Taxi für eine Großstadt aus Kapitel 4.1.2 verwendet, weil neben dem Antriebsstrang auch das Exterieur unter Berücksichtigung der Klimaanlage in der Auslegung optimiert werden soll. Die Untersuchung soll zeigen, ob die optimalen Lösungen von den Ergebnissen aus Kapitel 4.1.2 abweichen.

Die erste Untersuchung hat gezeigt, dass die Wahl eines realitätsnahen Geschwindigkeitsprofils unter Berücksichtigung von Nebenverbrauchern einen großen Einfluss auf die Auslegung des Fahrzeugs hat. Deshalb wurde der Fahrzyklus ARTEMIS Urban verwendet, weil er für den Anwendungsfall eines Großstadttaxis ein realistisches Geschwindigkeitsprofil darstellt.

Es wurden zwei Szenarien untersucht: Der Heizfall im Winter bei einer Umgebungstemperatur von 5 °C und Vernachlässigung der Sonneneinstrahlung und der Kühlfall im Sommer bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C und starker Sonneneinstrahlung von 850 W/m². Für beide Szenarien wurde jeweils die konventionelle und die Vis-à-vis Sitzkonfiguration untersucht, weil sie zu anderen Fahrzeugsilhouetten mit unterschiedlichen Oberflächen von Karosserie und Scheiben führen. Neben der Anpassung der Anforderung wurde jedes Fahrzeug analog zu Kapitel 4.1.2 optimiert. Die Herstellkosten und der Verbrauch aller Fahrzeuge sind in Abbildung 4.16 visualisiert.

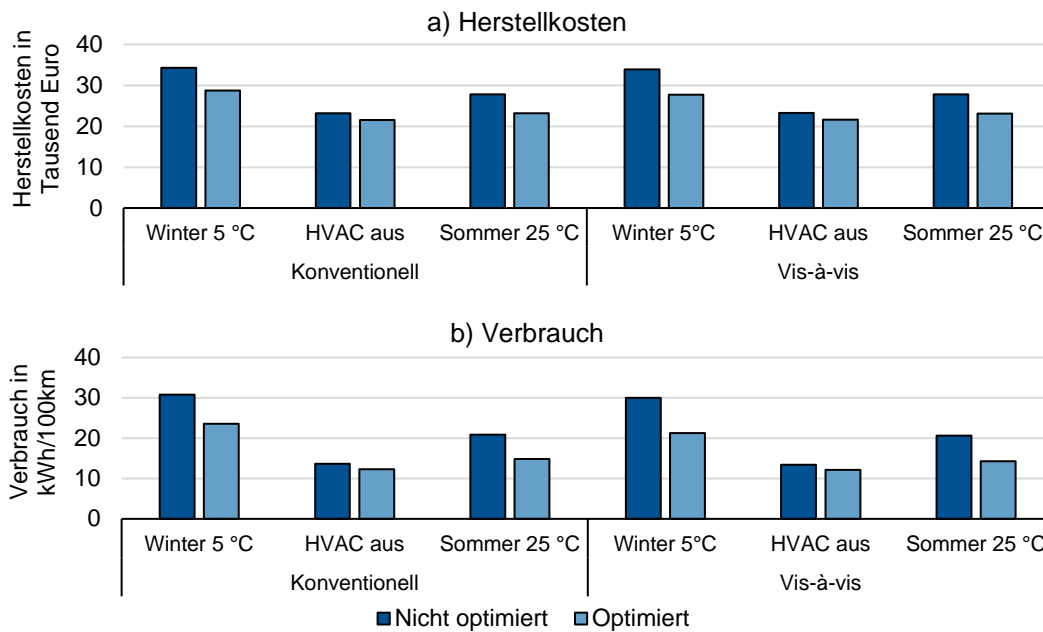


Abbildung 4.16: Auswirkungen der Klimatisierung auf die a) Herstellkosten und den b) Verbrauch am Beispiel des autonomen Taxis für eine Großstadt aus Kapitel 4.1.2

Ähnlich wie bereits in einer früheren Veröffentlichung [146] gezeigt, steigt der Verbrauch und damit die benötigte Batteriekapazität sowie die Herstellkosten bei aktivierter Heizung oder Klimaanlage deutlich an. Im Winter erreicht die elektrische Heizung einen Wirkungsgrad von knapp unter eins. Die verbrauchte elektrische Energie liegt folglich oberhalb der benötigten Heizungsenergie. Im Sommer arbeitet statt einer elektrischen Heizung ein Kältemittelverdichter, der mit einem Coefficient of Performance (CoP) von deutlich über eins (2,6 – 5,8) arbeitet. Der CoP bewegt sich in Abhängigkeit von der Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Massenstrom in diesen oder niedrigeren Bereichen [229, S. 7, 230, S. 32]. Ein CoP über eins bedeutet, dass die erzeugte Kühlleistung größer ist als die zum Betrieb benötigte elektrische Leistung. Das ist ein Grund, wieso die Verbrauchserhöhung im Sommer niedriger ausfällt, weil für die gleiche Klimatisierungsleistung deutlich weniger elektrische Leistung notwendig ist als im Winter. Ein weiterer Grund ist die niedrigere Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Umgebung im Sommer ($\Delta 3^\circ\text{C}$) im Vergleich zum Winter ($\Delta 17^\circ\text{C}$).

Wie bereits am Beispiel von Abbildung 4.15 gezeigt, führen geringere Geschwindigkeiten und hoher Nebenverbrauch zu einem hohem Gesamtenergiebedarf. Durch die niedrigen Geschwindigkeiten im ARTEMIS Urban steigt der Verbrauch im Winter mit 127% (konventionell) und 124% (Vis-à-vis) auf über den doppelten Wert im nicht optimierten Fahrzeug an. Im optimierten Fall verursacht die Heizung eine Steigerung von 91% (konventionell) und 75% (Vis-à-vis). Im Sommer kann die Erhöhung von ca. 54% (konventionell und Vis-à-vis) im nicht optimierten Fall auf 18% (Vis-à-vis) und 20% (konventionell) im optimierten Fall reduziert werden. Die Erhöhung der Kosten fällt entsprechend geringer aus, weil sie sich auf einen vergrößerten Batteriespeicher und daraus folgende Sekundäreffekte beschränkt. Wird aufgrund dieses Kostenanstiegs auf eine Erhöhung der Batteriekapazität verzichtet, muss umgekehrt mit einer starken Einschränkung bezüglich der Reichweite gerechnet werden. Bei einer Verdopplung des Verbrauchs, ist dann nur noch mit der Hälfte der Reichweite zu rechnen.

Trotz der Erkenntnisse aus Abbildung 4.16 bleibt weiterhin die Frage offen, ob die optimalen Lösungen der klimatisierten Fahrzeuge ähnlich zu der der Fahrzeuge mit ausgeschalteter Klimatisierung sind. Wird die Vis-à-vis Sitzkonfiguration betrachtet, so ist eine ähnliche optimale Konfiguration wie in Kapitel 4.1.2 zu erkennen (Abbildung 4.17b). In diesem Fall würde die optimale Variante, die mit ausgeschaltetem HVAC-System ermittelt wurde, auch zu guten Ergebnissen mit eingeschaltetem HVAC führen. Die steilen und durch den hohen Gepäckraum klein ausfallenden Front- und Heckscheiben, die auch ohne aktives HVAC-System zu guten Ergebnissen geführt haben, sind bereits gute Voraussetzungen, um die Sonneneinstrahlung gering zu halten.

Bei der konventionellen Sitzkonfiguration wird hingegen eine abweichende Lösung ermittelt (Abbildung 4.17a). Die Innenraumhöhe wurde deutlich angehoben, sodass die hintere Sitzbank oberhalb der hinteren Radhäuser liegt und der Radstand verkürzt werden kann. Ein Grund dafür ist die Regression zur Ermittlung der seitlichen Scheibenfläche, die von Radstand, Fahrzeughöhe und den Scheibenwinkeln abhängt. Die Lösung, die vom Optimierer gefunden wurde, ist folglich nicht zwingend eine optimale Lösung, zeigt aber, dass eine Minimierung der seitlichen Scheibenfläche einen deutlichen Vorteil für die Klimatisierung hat. Durch die größer ausfallenden Front- und Heckscheiben liegt der Verbrauch dennoch 4 % über dem der Vis-à-vis Konfiguration.

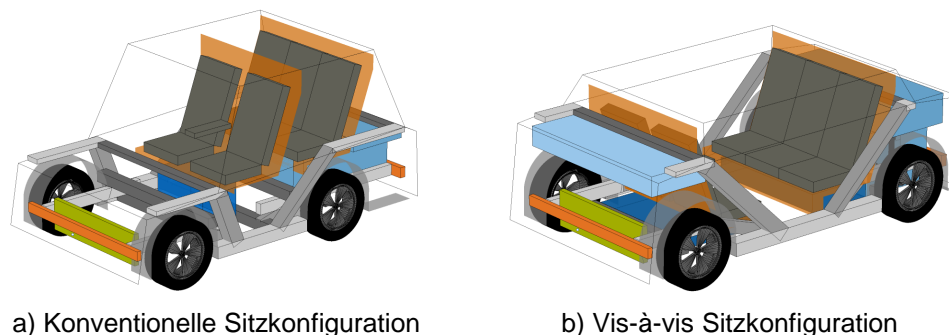


Abbildung 4.17: Optimale Konfigurationen bei aktivierter Klimatisierung für die a) konventionelle und b) Vis-à-vis Sitzkonfiguration am Beispiel des autonomen Taxis für München aus Kapitel 4.1.2

Sensorik, Rechner und Klimatisierung führen bei AV zu einem steigenden Anteil der Nebenverbraucher am Gesamtverbrauch. Wird ein Fahrzeug im städtischen Verkehr überwiegend bei niedrigen Geschwindigkeiten betrieben, ist der Anteil des Nebenverbrauchs am größten. Dieses Kapitel hat gezeigt, dass sowohl die Wahl der richtigen Fahrgeschwindigkeit als auch die Anpassung des Fahrzeugs helfen können, den steigenden Nebenverbrauch durch Maßnahmen im Gesamtfahrzeug teilweise zu kompensieren. Zusätzlich wird der Bedarf an intelligenten und effizienten Lösungen, insbesondere bei der Klimatisierung, bei solchen Fahrzeugen zunehmend an Bedeutung gewinnen und beschäftigt bereits Firmen wie Zoox im Bereich des autonomen Fahrens [187].

4.2.2 Einfluss der Geschäftsmodelle

Das volle Potential des autonomen Fahrens wird nur in Verbindung mit neuen Geschäftsmodellen entfaltet (Kapitel 2.1.3). Der Schlüssel liegt darin, die Fahrzeuge nicht nur zu automatisieren, sondern spitzer für einzelne Anwendungsfälle auszulegen und diese mit anderen Mitfahrern zu teilen. Eine Untersuchung verschiedener kostensensitiver Anforderungen wie der Reichweite

oder der Anwendung von mehreren, spezialisierten Fahrzeugen statt einem Allrounder soll zeigen, welche Potentiale diese Ansätze aus der Literatur liefern.

Einfluss der Reichweitenanforderung

Kapitel 4.1 hat bereits gezeigt, dass die geforderte Reichweite einen großen Einfluss auf die Herstellkosten und den Verbrauch hat. Hauptursache dafür ist die schwere und kostenintensive Batterie, die für höhere Reichweiten vergrößert werden muss.

Für die folgende Analyse wird beispielhaft das autoTAXI aus Kapitel 4.1.3 verwendet, weil das Originalfahrzeug ausreichend Platz für hohe Batteriekapazitäten im Package bietet. Dieser Platz wird benötigt, weil die Reichweite von 200km schrittweise auf 600km erhöht wird. Für jede Reichweite wird jeweils ein Fahrzeug mit dem WLTP Zyklus und dem ARTEMIS Urban Zyklus ausgelegt. Zusätzlich dazu erfolgt auch eine Optimierung analog zum Kapitel 4.1.3. Die daraus resultierenden Herstellkosten und Verbräuche für jedes Fahrzeug sind in Abbildung 4.18 zusammengefasst.

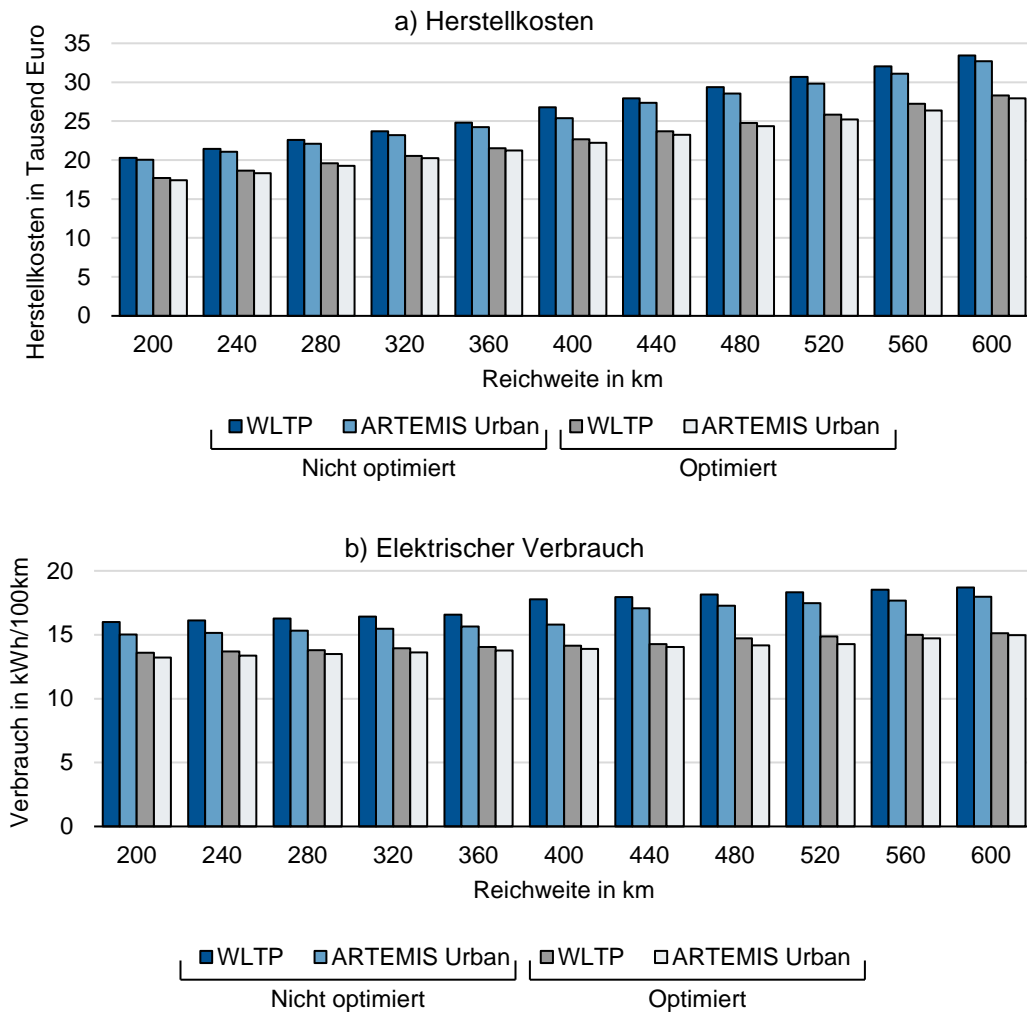


Abbildung 4.18: Einfluss der Reichweitenanforderung bei unterschiedlichen Fahrzyklen (WLTP/ARTEMIS Urban) auf a) die Herstellkosten und b) den elektrischen Verbrauch am Beispiel vom autoTAXI

Die Reduktion der Reichweite um 1 % führt beim nicht optimierten autoTAXI im Durchschnitt zu einer Verringerung der Herstellkosten um 0,61 % im WLTP und 0,63 % im ARTEMIS Urban (Abbildung 4.18a). Bei den optimierten Fahrzeugen sind es 0,60 % im WLTP und 0,63 % im ARTEMIS Urban. Die Einsparung pro 1 % Reichweite ist ausgehend von einem Fahrzeug mit 600 km Reichweite noch etwas größer als bei etwa 200 km, womit das Einsparpotential mit abnehmender Reichweite leicht sinkt.

Der Verbrauch kann nicht im gleichen Maße reduziert werden (Abbildung 4.18b), weil dieser neben der Fahrzeugmasse auch von anderen Einflussgrößen wie dem Luftwiderstand abhängig ist und sich der Nebenverbrauch durch die reduzierte Reichweitenanforderung nicht ändert. Im ARTEMIS Urban Zyklus reduziert sich der Verbrauch mit 0,26 % beim nicht optimierten Ausgangsfahrzeug etwas mehr als beim WLTP mit 0,20 % für 1 % weniger Reichweite. Bei den optimierten Fahrzeugen sind es 0,22 % im ARTEMIS Urban Zyklus und 0,16 % im WLTP. Dies zeigt erneut den höheren, masseunabhängigen Anteil des Luftwiderstands im WLTP Zyklus und auf der anderen Seite die masseabhängigen, höheren Beschleunigungen im ARTEMIS Urban.

Während die Herstellkosten gleichmäßig steigen, ergibt sich bei den nicht optimierten Fahrzeugen ein Sprung im Verbrauch zwischen einer Reichweite von 400 km und 440 km beim ARTEMIS Urban Zyklus bzw. zwischen 360 km und 400 km im WLTP Zyklus (Abbildung 4.18b). Dieser Anstieg entsteht durch eine Erhöhung der Reifenbreite. Eine größere Reifenbreite wird benötigt, weil die Reifentraglast durch eine schwerere Batterie überschritten wird. Die Wahl eines breiteren Reifens zur Vergrößerung des Reifenvolumens und einer damit verbundenen höheren Traglast führt zu einer Verschlechterung des Rollwiderstands und einer erhöhten Radmasse. Beide Veränderungen ziehen einen Anstieg des Verbrauchs nach sich. Ähnliche Sprünge basierend auf der gleichen Ursache sind in abgeschwächter Form auch bei den optimierten Fahrzeugen zu erkennen.

Für Stadtfahrzeuge bietet demnach eine Reichweiten- und Massenreduktion ein größeres Potential als für Fahrzeuge, die für schnellere Fahrten ausgelegt sind. Für Letztere sollten neben einer Reichweitenreduktion auch Maßnahmen zur Verringerung des Luftwiderstands umgesetzt werden. In jedem Fall führt eine Reduktion der Reichweitenanforderung durch die hohen Batteriekosten zu einer deutlichen Kostenersparnis auf der Gesamtfahrzeugebene.

Einfluss der Anzahl und Qualität der Sitzplätze

Ein Fahrzeug hat die primäre Aufgabe, seinen Passagier von einem Ort zum anderen zu befördern. Weil bei einem Privatfahrzeug nahezu der gesamte Mobilitätsbedarf abgedeckt werden soll, wird der Innenraumkomfort meist für lange Strecken ausgelegt, obwohl diese nur selten vorkommen. Nach Peters [20, S. 173] haben 90 % aller Fahrten in Deutschland eine Strecke von unter 14 km und benötigen nur zwei Sitzplätze. 10 % der Fahrten führen demnach zu einer Überdimensionierung des Fahrzeugs für 90 % aller Fahrten. Im Folgenden soll deshalb untersucht werden, welches Einsparpotential eine konsequente Reduzierung der Sitzplätze mit sich bringt. Weiterhin soll der Einfluss der Sitzhaltung und -dimensionen auf das Gesamtfahrzeug untersucht werden, um auch hier Einsparpotentiale aufzuzeigen.

Am Beispiel des optimierten autoTAXI soll analysiert werden, wie die Eigenschaften der Sitze und eine geringere Anzahl der Sitzplätze das Gesamtfahrzeug beeinflussen. Dieses Fahrzeug wurde zum einen gewählt, weil die symmetrische Ausführung der vorderen und hinteren Sitzreihe eine transparente Untersuchung ermöglicht, zum anderen lässt das hohe H30-Maß eine ausreichende große Änderung der Sitzdicke zu.

Zur Untersuchung der Sitzhaltung und -qualität werden die Bein- und Kopffreiheit, die Sitzpols-
terdicken und die geteilte Armlehne zwischen den Sitzen um 50 mm verkleinert bzw. vergrößert.
Weiterhin wird die Verstellmöglichkeit der Rückenlehne um 10° reduziert bzw. erhöht (Abbildung
4.19). Mit diesen scheinbar geringen Veränderungen können im Falle von geringeren Maßen
und damit weniger Komfort ca. 6% des Verbrauchs und ca. 2% der Kosten eingespart werden.
Im Falle von mehr Komfort und größeren Abmessungen sind es trotz betragsmäßig gleicher
Veränderung ca. 8% mehr Verbrauch und fast 4% mehr Kosten. Das liegt zum einen an dem
gestiegenen Lehnenwinkel, der zu einer mit dem Winkel wachsenden Zunahme des Radstands
und der Fahrzeuglänge führt. Zum anderen nimmt die Masse durch die Änderung des Volumens
in alle drei Raumrichtungen mit kubischem Wachstum zu.

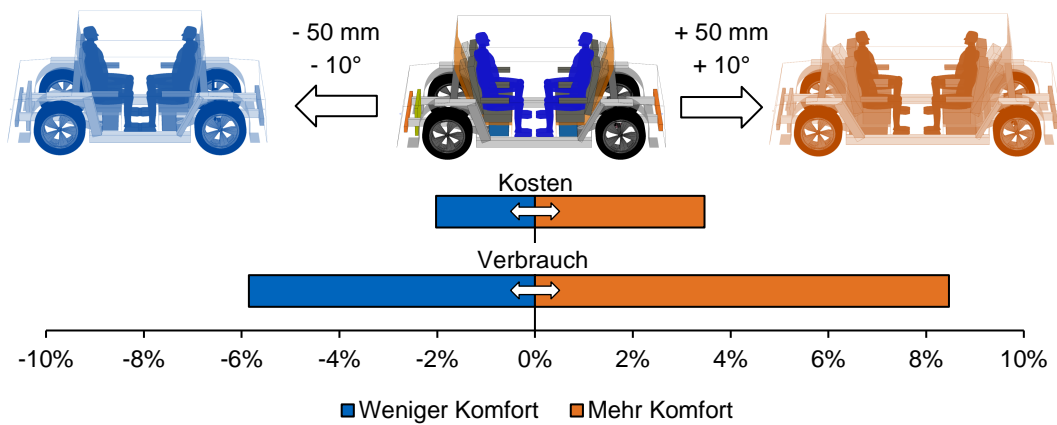


Abbildung 4.19: Einfluss des Innenraumkomforts bei Betrachtung von Abmessungen in mm und Lehnenverstellwinkel in ° am Beispiel des autoTAXI

Werden wie oben genannt nur noch zwei Sitzplätze benötigt, kann auf eine zweite Sitzreihe
verzichtet und das Fahrzeug verkleinert werden. Diese Maßnahme führt trotz Halbierung der
Passagierkapazität zu geringen Einsparungen (Abbildung 4.20). Ursache für das geringe Potent-
ial ist einerseits der geringe Anteil der Karosseriekosten an den Gesamtkosten (Kapitel 3.2.6).
Andererseits werden durch eine gleichbleibende Stirnfläche nur der Roll-, Beschleunigungs- und
Steigungswiderstand aufgrund der Massenreduktion von 234 kg verringert.

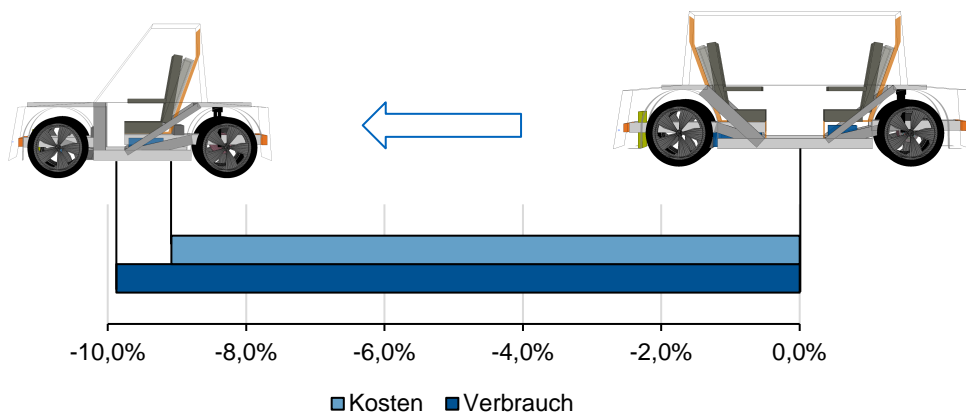


Abbildung 4.20: Einfluss der Anzahl der Sitzreihen auf die Kosten und den Verbrauch am Beispiel des autoTAXI

Weil die Einsparung trotz des großen Eingriffs in das Fahrzeug gering ausfällt, soll die Untersuchung mit dem Smart fortwo EQ [231] und Smart forfour EQ [232] verglichen werden. Dieser ist das einzige bekannte BEV, das sowohl als einreihige als auch als zweireihige Ausführung verfügbar war. Der Vergleich zwischen dem Smart fortwo EQ und Smart forfour EQ bestätigt das geringe Potential aus der oberen Untersuchung. Mit 12,56 kWh/100km verbraucht die zweisitzige Version nur 3% weniger als die viersitzige Version mit 12,95 kWh/100km. Die Preise der Fahrzeuge unterscheiden sich ebenfalls nur um einen ähnlichen Prozentsatz. Die noch geringere Abweichung als in der vorherigen Untersuchung wird voraussichtlich durch die Verwendung von Gleichteilen, insbesondere im Antriebsstrang, in beiden Smart-Modellen verursacht.

Anwendungsspezialisierte Fahrzeuge

Bernhart et al. [15, S. 17] prognostizieren durch die Einführung autonomen Fahrens eine größere Spezialisierung der Fahrzeuge. Statt eines Fahrzeugs, mit dem der Kunde seinen kompletten Mobilitätsbedarf abdeckt, kann es mehrere Fahrzeuge geben, die je nach Einsatzgebiet unterschiedlich dimensioniert sind. Peters et al. [20, S. 172] analysieren wiederum das Mobilitätsverhalten in Deutschland und stellen fest, dass eine Reichweite von 140 km für 99% aller Fahrten ausreichen würde, während eine Reichweite von 450 km sogar 99,9% aller Wege abdecken würde.

Die Kombination aus Spezialisierung und tatsächlichem Mobilitätsbedarf soll an folgendem Beispiel getestet werden. Ausgangsfahrzeug ist ein autonomer VW ID.3 (analog zu Kapitel 4.1.1) im alleinigen Privatbesitz mit einer Reichweite von 427 km im WLTP. Im städtischen ARTEMIS Urban Zyklus wird mit diesem Fahrzeug eine Reichweite von 441 km erreicht, im autobahnähnlichen ARTEMIS Motorway Zyklus hingegen nur 314 km. Wird nun von einer Spezialisierung ausgegangen, müssen zunächst zwei Fahrzeuge anstelle von einem angeschafft werden (Abbildung 4.22). Ein Fahrzeug soll dabei für die Stadt- und Überlandfahrten eingesetzt werden, das andere für die Autobahnfahrten.

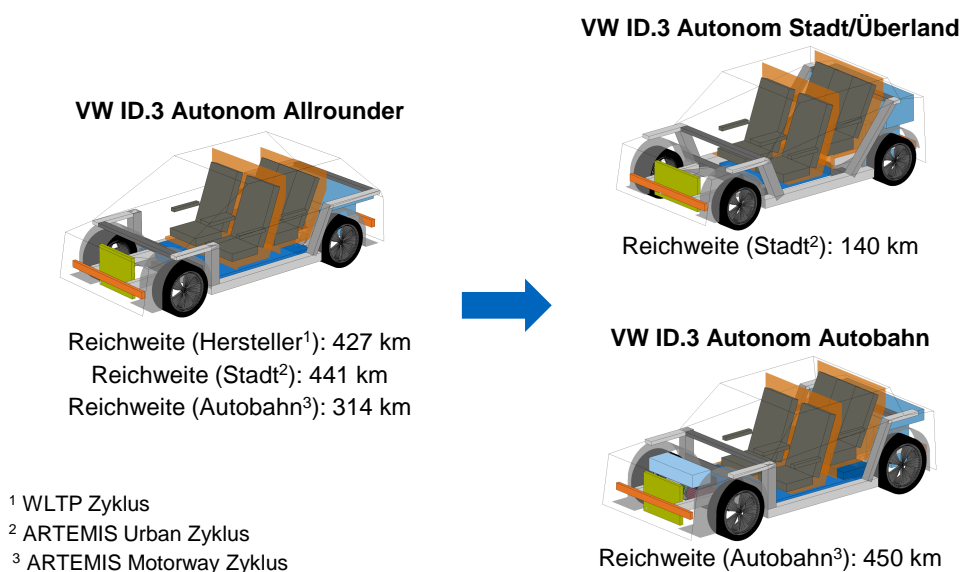


Abbildung 4.21: Austausch eines autonomen VW ID.3 mit zwei spezialisierten Varianten für Stadt/Überland und Autobahn

Beide Fahrzeuge sollen jeweils die gleichen Kundenanforderungen wie der ursprüngliche VW ID.3 erfüllen und unterscheiden sich nur in ihrer Reichweite. Das im Folgenden genannte „Primärfahrzeug“ deckt mit einer geringeren Reichweite von 140km nach Peters 99% der Fahrten überwiegend im städtischen Bereich ab. Die 99% entsprechen in Summe ungefähr zwei Drittel der gesamten Fahrtstrecke (Herleitung im Anhang K). Das „Sekundärfahrzeug“ kann für die restlichen 1% der Fahrten (bzw. ein Drittel der Fahrtstrecke) genutzt werden und schafft im Gegensatz zum ursprünglich ausgelegten ID.3 tatsächlich 450km im MOTORWAY Zyklus. Es wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge im betrachteten Zeitraum eine Abschreibung von 50% des Anschaffungspreises haben und die Ladepreise bei 0,45€/kWh AC und 0,55€/kWh DC liegen [233].

Obwohl durch den geringeren Verbrauch des leichteren Primärfahrzeug im laufenden Betrieb Kosten eingespart werden können, wiegen diese die hohen Abschreibungskosten durch zwei Fahrzeuge nicht auf (Abbildung 4.22). Wird davon ausgegangen, dass das Primärfahrzeug weiter im individuellen Besitz ist und das Sekundärfahrzeug mit nur einer weiteren Person geteilt wird, kann bereits bei etwas mehr als 150.000 km Laufleistung pro Nutzer eine Kostengleichheit erreicht werden. Wird das Sekundärfahrzeug mit zwei anderen Personen geteilt, können trotz ähnlicher Anschaffungskosten ca. 3700€ bis 150.000 km eingespart werden.

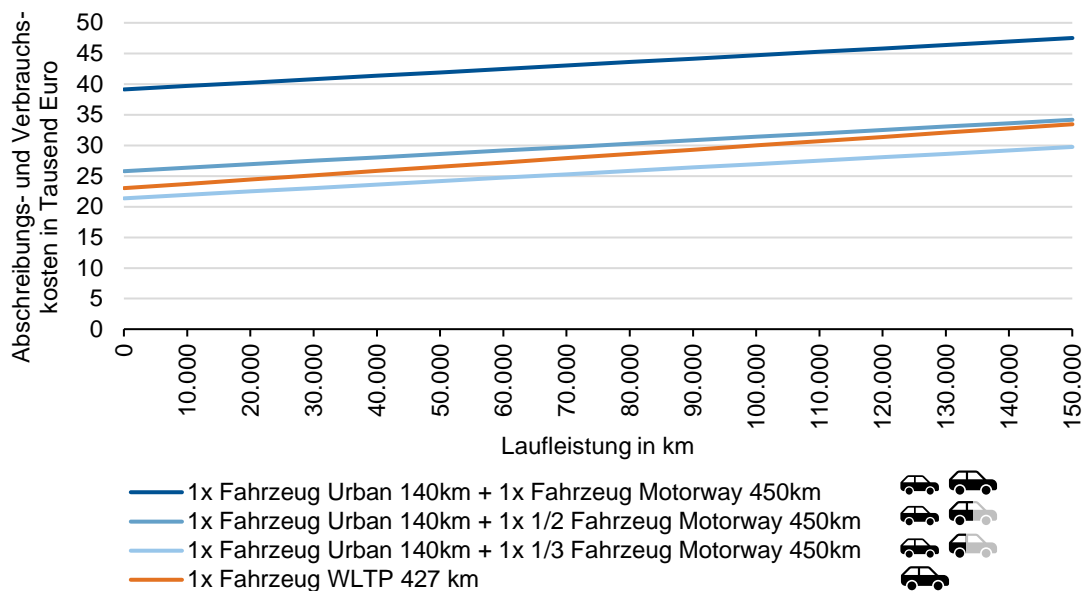


Abbildung 4.22: Kostenanalyse der Auswirkungen von Spezialisierung (Primär/Stadt- und Sekundär-/Autobahnfahrzeug) und geteilter Nutzung (zwei oder drei Personen pro Sekundär-/Autobahnfahrzeug) von autonomen Fahrzeugen

Die Kombination aus spezialisierter und geteilter Mobilität erweist sich damit als guter möglicher Kompromiss zwischen individuellem Fahrzeugbesitz und Reduzierung der Kosten durch das Teilen von Fahrzeugen. Ein weiterer Vorteil der Spezialisierung ist die bessere Erfüllung der Kundenanforderungen in den einzelnen Nutzungsfällen. So erreicht das ID.3 Langstreckenfahrzeug in einem autobahnähnlichen Zyklus 450km, während der auf den WLTP ausgelegte, originale ID.3 in diesem Zyklus nur 314km erreicht. Wie gezeigt reichen bereits drei Nutzer aus, dass die Anschaffung von zwei spezialisierten statt einem generalistischem Fahrzeug zu Einsparungen führt. Eine Spezialisierung ohne die geteilte Nutzung der Fahrzeuge ist wiederum ökonomisch nicht rentabel. Ob ein solches Mobilitätsmodell von Kunden akzeptiert werden würde, müsste ebenfalls untersucht werden.

5 Diskussion und Ausblick

In Kapitel 2.3 wurden zwei Fragestellungen und die daraus folgenden Ziele für diese Arbeit formuliert. Das erste Ziel war die Anpassung der Methodik zur Fahrzeugkonzeptauslegung und -optimierung für autonome Fahrzeuge. Obwohl die Anpassung der Methodik und Umsetzung in Form des AuVeCoDe-Tools gemäß den Anforderungen aus Tabelle 2.6 erfolgreich in Kapitel 3 angewendet wurde, bestehen einige Einschränkungen. Diese werden im Folgenden diskutiert, bevor auf die zweite Fragestellung eingegangen wird.

Neue Technologien führen meist zu dem Problem, dass noch keine validierten Simulationsmodelle vorliegen [25, S. 20]. Das erschwert insbesondere Prognosen für Fahrzeuge mit diesen neuen Technologien. In dieser Arbeit wurden deshalb wenn möglich bereits existierende oder angepasste Modelle verwendet, die mit bestehenden Fahrzeugen validiert werden können. Der Nachteil dieses Vorgehens ist die Extrapolation auf neue Fahrzeugformen und -konfigurationen, weil diese sich in Bereichen bewegen, die nicht validiert sind.

Bei der Masseberechnung wurden Modellgrenzen eingeführt, damit keine unrealistischen Werte durch die linearen Regressionen entstehen. Wird ein Eingangsmaß unterschritten, so wird der letzte plausible Ausgangswert im Modell gewählt. Das kann dazu führen, dass insbesondere bei kleinen Fahrzeugen das Potential in der Realität größer wäre, durch die genannten Einschränkungen aber zu wenig Potential prognostiziert wird. Für Bereiche, in denen solche Probleme vorherrschen, sollte zukünftig geprüft werden, ob statt einer empirischen eine physikalische Modellierung möglich ist. Obwohl nach Fuchs [62, S. 32-33] diese Modellierungsart bei nicht-technischen Einflüssen wie dem Design nicht hinreichend genau ist, lässt sich eine Extrapolation zu neuen Fahrzeugformen besser gestalten.

Die Modellierung des Antriebsstrangs, insbesondere die elektrische Maschine und Inverter, sollte in zukünftigen Arbeiten weiter detailliert werden. Während in dieser Arbeit symmetrische Maschinenkennfelder verwendet wurden, ist das Verlustkennfeld aufgrund mechanischer Verluste und Eisenverluste in der Realität asymmetrisch zur Null-Moment-Linie [161, S. 78]. Weiterhin wird durch die Verwendung von Effizienz- statt Verlustkennfeldern vereinfachend angenommen, dass bei einem Maschinenmoment von null keine Verluste in der Maschine verzeichnet werden. Weil das bei einer PSM nicht zutreffend ist [161, S. 84], müsste nochmals detailliert geprüft werden, in welchen Bereichen ein elektrischer Zweiachs Antrieb tatsächlich besser ist als ein Einachs Antrieb.

Die zukünftig verwendeten Sensorik- und Recheneinheiten für AV sind noch unklar (Kapitel 3.2.4). Die Modellierung dieser Komponenten ist deshalb sowohl geometrisch als auch elektrisch noch nicht genau durchführbar. In dieser Arbeit wurde deshalb mit Abschätzungen aus der Literatur gearbeitet. Sobald möglich, sollten aber Messungen und genauere Modelle von Sensorik und Rechnern verwendet werden. Diese sollten auch die Anforderungen an die Karosserie berücksichtigen, die durch die Positionierung der Sensorik entstehen. Die Integration eines solchen Modells in das Karosseriemodell dieser Arbeit wäre denkbar.

Die Modellierung der Fahrzeugklimatisierung dient für eine nutzungsnahe Auslegung des Fahrzeugs. Die Umsetzung erfordert jedoch zahlreiche Annahmen und Vereinfachungen, weil beispielsweise Materialeigenschaften schwer bestimmbar sind und Wärmeübertragungsmechanismen in Wechselwirkung treten [234, S. 2]. Obwohl das verwendete Modell in [146] validiert wurde, ist besonders die Validität der erfolgten Extrapolation im Simulationsmodell in KULI schwer zu überprüfen. Weiterhin wurden neue Technologien wie eine körpernahe Flächenheizung, intelligente Regelung und Wärmepumpen im Heizfall [104, S. 398] nicht betrachtet. Die Ergebnisse aus Kapitel 4.2.1 zeigen aber bereits den deutlichen Einfluss der Klimatisierung auf den Verbrauch und die daraus abzuleitende Motivation, in diesem Bereich Maßnahmen zur Effizienzsteigerung zu identifizieren. Weil die Klimatisierung ab voraussichtlich 2025 auch einen offiziellen Beitrag zur Reduzierung des Fahrzeugverbrauchs in Form einer Eco-Innovation haben soll [100, S. 8], wird auch das Interesse der Fahrzeughersteller wachsen, Weiterentwicklungen in diesem Bereich voranzutreiben.

Einer der wichtigsten Bestandteile eines BEV ist der Batteriespeicher. In Kapitel 4 stellte sich in einigen Fällen die Untersitzbatterie als die am besten geeignete Topologie heraus. Weil die Kosten der Batteriespeicher ausschließlich von deren Gesamtkapazität abhängig sind, wird eine Trennung der Batterie in mehrere Teilbatterien monetär nicht berücksichtigt. In Zukunft müsste untersucht werden, zu welchen zusätzlichen Kosten eine Trennung der Batterie durch z.B. doppelte Bauteile und längere Leitungen führen würde. Ein weiterer Bereich, bei dem die Kosten bei einer Teilung nur beschränkt betrachtet werden konnten, ist der restliche Antriebsstrang. So wurde zwar für die elektrische Maschine ein fester und ein mit der Leistung variabler Teil angenommen, um die steigenden spezifischen Kosten bei kleineren Maschinen zu abbilden. Beim Getriebe, Differenzial und der Antriebswelle wird aber nicht unterschieden, ob es sich um ein großes Bauteil oder mehrere kleinere handelt. Eine Allradtopologie könnte folglich zu günstig geschätzt werden.

Neben der bisher diskutierten, ersten Frage aus Kapitel 2.3, wurde in der vorliegenden Arbeit das Ziel formuliert, Potentiale des autonomen Fahrens in Abhängigkeit von gewählten Nutzungsszenarien zu bestimmen. In Kapitel 4 wurden deshalb zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, die im Folgenden diskutiert werden.

Die genannten Optimierungen und Untersuchungen aus Kapitel 4 wurden mit den Zielgrößen Verbrauch und Herstellkosten durchgeführt, um insbesondere das ökonomische Potential zu ermitteln. Bei AV entstehen jedoch außerhalb des Fahrzeugs zusätzliche Kosten durch die Nutzung von Internet und externer Datenverarbeitung [24, S. 3]. Diese wurden in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet, müssten für einen ganzheitlichen Vergleich aber mit einbezogen werden. Darüber hinaus muss bei einem geteilten AV neben dem Fahrzeug selbst seine Rolle in der Flotte untersucht werden. Benötigte Leerfahrten zwischen zwei Kunden sollten beispielsweise ebenfalls in eine Vergleichsrechnung einfließen, weil sie einen Anteil an den Gesamtkosten verursachen.

In Kapitel 4 wurde nur mit den Zielgrößen Verbrauch und Herstellkosten optimiert. Grundlage dafür war die Annahme, dass der Komfort in Form des Innenraums als einer der ersten Parameter unveränderbar festgelegt wird, weil er die Basis für eine nutzerzentrierte Auslegung von innen nach außen darstellt [73, S. 154]. Das Generieren einer Paretofront aus Komfort, Verbrauch und Kosten ist somit nicht direkt möglich, weil keine Bewertung des Komforts stattfindet. Die Modellierung des Sitzkomforts in Abhängigkeit von der Sitzhaltung wäre ein aufwändiger Schritt, um den Komfort direkt gegen Verbrauch und Kosten aufwiegen zu können. Weil der Aufwand und die dafür benötigten Probandenstudien zu umfangreich für dieses

Forschungsvorhaben waren, fand eine solche Abwägung nicht statt. Die Voraussetzungen für die Integration eines solchen Modells sind aber gegeben. Wird zuletzt eine Auslegung von außen nach innen gewählt, weil die Außenmaße beispielsweise bei einem kleinen Stadtfahrzeug von höherer Bedeutung sind [25, S. 30], müsste das vorgestellte Entwicklungstool ebenfalls angepasst werden.

Während in dieser Arbeit überwiegend die Hardware des Fahrzeugs betrachtet wurde, muss durch die immer stärker wachsende Rolle der Software diese zukünftig mit betrachtet werden. Proff [3, S. 30] beschreibt diesbezüglich die Zunahme des Wertschöpfungsanteils der Software bereits über die letzten Jahre hinweg und auch das Wachstum in der Zukunft. Eine Untersuchung, inwieweit diese das Gesamtfahrzeug beeinflussen kann, müsste in zukünftigen Arbeiten noch durchgeführt werden.

6 Zusammenfassung

Kapitel 1 beschreibt die Motivation und den Aufbau dieser Arbeit. Die Automatisierung der Fahrfunktion als einer der großen Trends in der Automobilindustrie führt zu Veränderungen in der Nutzung und Entwicklung von Fahrzeugen. Die größte Herausforderung in der Entwicklung ist es, die sich durch autonomes Fahren verändernden Randbedingungen bereits in frühen Phasen in neue Fahrzeuge einfließen zu lassen. Virtuelle Werkzeuge, die die Suche nach optimalen Lösungen unterstützen, haben sich bisher bewährt, weil sie die Komplexität durch neue Technologien in der Fahrzeugauslegung beherrschbar machen.

Das erste Kapitel im Stand der Technik (Kapitel 2.1) definiert autonomes Fahren für diese Arbeit und betrachtet dessen Auswirkungen auf das Fahrzeug. Weil die zukünftigen Anwendungen von AV vielseitig sind, werden mögliche Nutzungsszenarien aus der Literatur gesammelt und kategorisiert. Die sich daraus ergebenden Verbesserungs- und Risikopotentiale von AV werden im Anschluss zusammengefasst. Ein direktes Aufwiegen von Verbesserungen und Risiken ist aufgrund fehlender Quantifizierung der Potentiale in den meisten Fällen aber nicht möglich. Zuletzt findet in diesem Kapitel eine Betrachtung der in der Literatur genannten Veränderungen der Baugruppen eines Fahrzeugs durch autonomes Fahren statt.

Das zweite Kapitel im Stand der Technik (Kapitel 2.2) ordnet die Arbeit in den PEP ein. Nach der Definition der FKE als Teil des PEP werden die wichtigsten Forschungsarbeiten in diesem Bereich analysiert. Die Untersuchung zeigt, dass es zahlreiche Arbeiten im Bereich der FKE von BEV gibt, eine ganzheitliche Betrachtung von AV jedoch bisher nicht stattgefunden hat. Die daraus entstehende Forschungslücke in der FKE wird in Kapitel 2.3 abgeleitet. Zusätzlich wird in Kapitel 2.3 aus Kapitel 2.1 die Fragestellung abgeleitet, wie mit dieser Arbeit Potentiale von AV in Abhängigkeit des Nutzungsszenarios quantitativ bestimmt werden können.

In Kapitel 3 wird die Methodik zur Auslegung von Fahrzeugkonzepten für AV vorgestellt. Nach der Formulierung von Anforderungen, die aus Kapitel 2 abgeleitet werden, wird die Umsetzung der Methodik in das Open-Source Softwaretool AuVeCoDe [145] beschrieben. Bei der Modellierung müssen insbesondere das Package und die Nebenverbraucher für AV angepasst werden, um die neuen Anforderungen zu erfüllen. Im Anschluss wird das Gesamtmodell anhand von bestehenden BEV validiert und mit Konzept- und Prototypen-AV verifiziert. Zuletzt wird in Kapitel 3 die Implementierung von zwei Optimierungsalgorithmen beschrieben, die eine schnelle Lösungssuche unterstützen sollen.

Kapitel 4 zeigt eine erfolgreiche Anwendung des AuVeCoDe-Tools auf verschiedene Anwendungsfälle (Kapitel 4.1) und liefert einen ersten Beitrag zur Bestimmung von quantitativen Potentialen von AV in Abhängigkeit vom gewählten Nutzungsszenario (Kapitel 4.2). Kapitel 4.1 zeigt auf der einen Seite, dass autonomes Fahren nur zu geringen Veränderungen eines Fahrzeugs mit heutigen Anforderungen und Auslegungsmethoden führt. Auf der anderen Seite demonstriert es auch, dass bei der Anpassung der Anforderungen auf den Anwendungsfall in

Kombination mit einer Optimierung ein AV deutliche Vorteile gegenüber einem BEV erzielt werden können. Das Beispiel eines autonomen Taxis für eine Großstadt ist hier hervorzuheben, weil dort die optimale Topologie der Batterie und des Innenraums von herkömmlichen BEV abweicht.

In Kapitel 4.2 werden die Potentiale von AV unter Berücksichtigung von verschiedenen Verkehrsszenarien und Geschäftsmodellen ermittelt. Zur Reduktion des Verbrauchs und der Herstellkosten können unter anderem niedrigere Längsdynamikanforderungen durch den Entfall des menschlichen Fahrers beitragen. Für eine möglichst realitätsnahe Auslegung von AV müssen sowohl Nebenverbraucher als auch geeignete Fahrzyklen berücksichtigt werden. Die Untersuchung in dem Kapitel zeigt, dass die Kombination aus beiden einen starken Einfluss auf das Gesamtfahrzeug hat. Zuletzt zeigt das Kapitel in Übereinstimmung mit der Literatur, dass die Einsparpotentiale von AV durch passende Geschäftsmodelle erhöht werden können. Die Kombination aus der Verwendung von mehreren spezialisierten Fahrzeugen und die geteilte Nutzung der teuren und selten gebrauchten Langstreckenfahrzeuge stellt sich als guter Kompromiss heraus.

In Kapitel 5 werden zum Abschluss der Arbeit Einschränkungen in der Methodik und den Modellen diskutiert. Zudem werden einige Möglichkeiten als Ausblick genannt, wie Erweiterungen dieser Arbeit zukünftig möglich sind.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 1.1: | Aufbau der Arbeit..... | 4 |
| Abbildung 1.2: | Einordnung der Arbeit in das Gesamtvorhaben am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München..... | 5 |
| Abbildung 2.1: | Produktentstehungsprozess (PEP) nach Widmann et al. [110, S. 1272]..... | 21 |
| Abbildung 2.2: | Fahrzeugkonzeptentwicklungsprozess nach [112] | 22 |
| Abbildung 3.1: | Methodik zur Auslegung von autonomen Fahrzeugkonzepten..... | 27 |
| Abbildung 3.2: | Beispiele für Innenraummaße in der UNECE R107 [139] und SAE J1100 [137] | 31 |
| Abbildung 3.3: | Ablauf der Konzeptauslegung aufbauend auf [101] und [146]..... | 35 |
| Abbildung 3.4: | Ablauf der Längsdynamiksimulation nach [154] | 37 |
| Abbildung 3.5: | Validierung der Beschleunigungssimulation der Längsdynamiksimulation anhand des VW eGolf [154] und Tesla Model 3 von 0 auf 100 km/h | 39 |
| Abbildung 3.6: | Validierung des Verbrauchssimulation der Längsdynamiksimulation anhand des Tesla Model 3 im WLTP-Fahrzyklus..... | 39 |
| Abbildung 3.7: | Komponenten im Fahrzeugpackage des AuVeCoDe-Tools [145]..... | 41 |
| Abbildung 3.8: | Aufbau der Methodik zur Packageauslegung nach [67] | 42 |
| Abbildung 3.9: | Festlegung eines geeigneten Koordinatenursprungs für die Methodik in dieser Arbeit..... | 42 |
| Abbildung 3.10: | Auslegung des Innenraumpackages nach [67] | 43 |
| Abbildung 3.11: | Maßkette ausgehend vom Insasse bis zur Grenzfläche in Anlehnung an [170] am Beispiel der konventionellen Sitzkonfiguration. Alle Maße sind für jede Reihe separat einstellbar. | 44 |
| Abbildung 3.12: | Maßkette der Innenraumgrenzfläche (orange) am Beispiel der konventionellen Sitzkonfiguration. Alle Maße außer $x_{\text{Überlappung}}$ sind für jede Reihe separat einstellbar. | 45 |
| Abbildung 3.13: | Implementierung eines 95-Perzentil Mannes mit einer dem Fußraum entsprechender Beinhaltung zur Visualisierung des Platzes im Innenraum. | 45 |
| Abbildung 3.14: | Positionierung des parallelen Stirnradgetriebes | 46 |
| Abbildung 3.15: | Auslegung des Vorder- und Hinterwagenpackages nach [67]..... | 47 |
| Abbildung 3.16: | Aufbau von blockbildenden Komponenten | 47 |

| | | |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 3.17: | Berechnung der freien Crashlänge in der Höhe $z = h$ mit den blockbildenden Komponenten 1 und 2 und der verfügbaren Wagenlänge $x_{\text{Wagenlänge_min}}$ | 48 |
| Abbildung 3.18: | Verhalten von tatsächlicher im Vergleich zur geforderten Crashlänge nach [67, S. 2377]..... | 49 |
| Abbildung 3.19: | Modellierung des Kofferraumvolumens im Vorder- und Hinterwagen nach Mast [180]..... | 51 |
| Abbildung 3.20: | Modellierung der wichtigsten Karosserieteile und Silhouette nach Mast [181]. | 52 |
| Abbildung 3.21: | Maßketten zur Berechnung der verfügbaren Bauräume Second Level 1 und 2 (SL1/2) und Underfloor (UF) für den Energiespeicher bei der konventionellen Sitzkonfiguration | 52 |
| Abbildung 3.22: | Aufbau der Verbrauchssimulation zur Ermittlung des elektrischen Verbrauchs durch Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)..... | 54 |
| Abbildung 3.23: | Ablauf der Erstellung eines Metamodells mit Simulationsdaten für ein festgelegtes Winter- oder Sommerszenario..... | 55 |
| Abbildung 3.24: | Neue Methode zur Bestimmung des Ersatzvolumens für die Berechnung der Karosseriemasse nach Fuchs [62]..... | 57 |
| Abbildung 3.25: | Vergleich der geschätzten Herstellkosten eines VW ID.3 mit einer 50 kWh Batterie zwischen dem AuVeCoDe-Kostenmodell und der Literatur [201, 202] | 59 |
| Abbildung 3.26: | Packagedarstellung der für die Validierung verwendeten Elektrofahrzeuge | 61 |
| Abbildung 3.27: | Beispiele für autonome Konzeptfahrzeuge zur Darstellung der Variabilität des AuVeCoDe-Tools | 62 |
| Abbildung 3.28: | Modellierung des a) Gesamtfahrzeugs und b) des Antriebsstrangs des AV von Zoox [208]..... | 63 |
| Abbildung 4.1: | Verschiedene Anpassungen und Optimierungen eines konventionellen Fahrzeugs am Beispiel des VW ID.3 | 70 |
| Abbildung 4.2: | Vergleich der Packages zwischen a) autonomen VW ID.3 ohne Optimierung und b) autonomen VW ID.3 mit optimiertem Antriebsstrang | 72 |
| Abbildung 4.3: | Vergleich der Packages zwischen a) autonomen VW ID.3 ohne Optimierung und b) autonomen VW ID.3 mit optimiertem Antriebsstrang und Exterieur .. | 72 |
| Abbildung 4.4: | Verschiedene Anpassungen und Optimierung eines autonomen Taxis für München | 74 |
| Abbildung 4.5: | Vergleich des Packages des Originalfahrzeugs ohne Optimierung (a) und mit Optimierung (b) in konventioneller Sitzkonfiguration..... | 75 |
| Abbildung 4.6: | Package der optimierten Fahrzeuge mit a) Vis-à-vis Sitzkonfiguration und b) Rücken-an-Rücken Sitzkonfiguration | 76 |
| Abbildung 4.7: | Package der optimalen Lösung unter Anwendung aller vorherigen Maßnahmen | 77 |

| | | |
|-----------------|---|--------|
| Abbildung 4.8: | Verschiedene Anpassungen und Optimierungen des autoTAXI aus dem Projekt UNICARagil | 79 |
| Abbildung 4.9: | Vergleich des Packages von a) Originalfahrzeug und optimierter Variante in der b) Vis-à-vis und c) konventionellen Sitzkonfiguration am Beispiel des autoTAXI | 80 |
| Abbildung 4.10: | Package der optimalen Varianten mit a) reduzierter freier Crashlänge und b) 900 Liter Kofferraumvolumen am Beispiel des autoTAXI | 81 |
| Abbildung 4.11: | Auswirkungen der geforderten freien vorderen/hinteren und seitlichen Crashlänge auf die Kosten und den Verbrauch am Beispiel des autoTAXI (ARTEMIS Urban Zyklus) und Taxi München (WLTP Zyklus) | 82 |
| Abbildung 4.12: | Veränderung des autoTAXI und Taxi München durch die Optimierung in Abhängigkeit von der freien Crashlänge | 83 |
| Abbildung 4.13: | Auswirkungen der geforderten Beschleunigung von 0-100km/h und Höchstgeschwindigkeit auf Kosten und Verbrauch im WLTP Zyklus | 84 |
| Abbildung 4.14: | Betriebspunkte im Effizienzkennfeld der Elektromaschinen an der Vorder- und Hinterachse in Abhängigkeit von der Höchstgeschwindigkeit a) 130 km/h und b) 240 km/h. Die Farbintensität der Betriebspunkte entspricht Häufigkeit, in der ein Punkt angefahren wurde | 86 |
| Abbildung 4.15: | Vergleich von unterschiedlichen Zyklusgeschwindigkeiten eines Stadtzyklus bei einer Reichweitenanforderung von 150 km (a) und Autobahnzyklus bei einer Reichweitenanforderung von 250 km (b). Die Zyklusgeschwindigkeiten für minimale Batteriekapazität sind als blaue Punkte gekennzeichnet. | 87 |
| Abbildung 4.16: | Auswirkungen der Klimatisierung auf die a) Herstellkosten und den b) Verbrauch am Beispiel des autonomen Taxis für eine Großstadt aus Kapitel 4.1.2 | 89 |
| Abbildung 4.17: | Optimale Konfigurationen bei aktivierter Klimatisierung für die a) konventionelle und b) Vis-à-vis Sitzkonfiguration am Beispiel des autonomen Taxis für München aus Kapitel 4.1.2 | 90 |
| Abbildung 4.18: | Einfluss der Reichweitenanforderung bei unterschiedlichen Fahrzyklen (WLTP/ARTEMIS Urban) auf a) die Herstellkosten und b) den elektrischen Verbrauch am Beispiel vom autoTAXI | 91 |
| Abbildung 4.19: | Einfluss des Innenraumkomforts bei Betrachtung von Abmessungen in mm und Lehnenverstellwinkel in ° am Beispiel des autoTAXI | 93 |
| Abbildung 4.20: | Einfluss der Anzahl der Sitzreihen auf die Kosten und den Verbrauch am Beispiel des autoTAXI | 93 |
| Abbildung 4.21: | Austausch eines autonomen VW ID.3 mit zwei spezialisierten Varianten für Stadt/Überland und Autobahn | 94 |
| Abbildung 4.22: | Kostenanalyse der Auswirkungen von Spezialisierung (Primär/Stadt- und Sekundär-/Autobahnfahrzeug) und geteilter Nutzung (zwei oder drei Personen pro Sekundär-/Autobahnfahrzeug) von autonomen Fahrzeugen | 95 |
| Abbildung D.1: | Maßkette der Innenraumgrenzfläche (orange) der vis-à-vis Sitzkonfiguration. Alle Maße außer xÜberlappung sind für jede Reihe separat einstellbar | xxxvii |

| | | |
|----------------|---|---------|
| Abbildung D.2: | Maßkette der Innenraumgrenzfläche (orange) der Rücken-an-Rücken Sitzkonfiguration. Alle Maße außer x_{Wand} sind für jede Reihe separat einstellbar. | xxxvii |
| Abbildung D.3: | Maßkette der Innenraumgrenzfläche (orange) der einreihigen Sitzkonfiguration | xxxviii |
| Abbildung D.4: | Maßketten zur Berechnung der verfügbaren Bauräume Second Level 1 und 2 (SL1/2) und Underfloor (UF) für den Energiespeicher bei der vis-à-vis Sitzkonfiguration | xxxviii |
| Abbildung D.5: | Maßketten zur Berechnung der verfügbaren Bauräume Second Level 1 und 2 (SL1/2) und Underfloor (UF) für den Energiespeicher bei der Rücken-an-Rücken Sitzkonfiguration. | xxxix |
| Abbildung D.6: | Maßketten zur Berechnung der verfügbaren Bauräume Second Level 1 (SL1) und Underfloor (UF) für den Energiespeicher bei der einreihigen Sitzkonfiguration | xxxix |
| Abbildung D.7: | Berechnung der Maße der zweiten Untersitzbatterie für die Rücken-an-Rücken Sitzkonfiguration | xl |
| Abbildung J.1: | Generische Zyklen zur Untersuchung des Einflusses des Nebenverbrauchs in Abhängigkeit von Zyklusart und -geschwindigkeit..... | liv |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------|---|--------|
| Tabelle 2.1: | Level der Automatisierung nach SAE J3016 [34]..... | 8 |
| Tabelle 2.2: | Kategorien zur Einteilung der Nutzungsszenarien von AV..... | 9 |
| Tabelle 2.3: | Verbesserungs- und Risikopotentiale vom autonomen Fahren..... | 11 |
| Tabelle 2.4: | Sitzkonfigurationen von verschiedenen autonomen Konzeptfahrzeugen [67] | 16 |
| Tabelle 2.5: | Anzahl der Sensoren für verschiedene Konzept- und Prototypenfahrzeuge | 19 |
| Tabelle 2.6: | Methoden zur Konzeptauslegung und -optimierung | 23 |
| Tabelle 3.1: | Verwendung von Normen (N), Verordnung (V) und Verbrauchertests (VT) in bisherigen Arbeiten zur Auslegung von Fahrzeugkonzepten..... | 29 |
| Tabelle 3.2: | Einordnung von Normen (N), Verordnung (V) und Verbrauchertests (VT) hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die Auslegung von autonomen Fahrzeugkonzepten..... | 29 |
| Tabelle 3.3: | Folgen für die Auslegung von AV für jede Kategorie der Nutzungsszenarien (Kapitel 2.1.2)..... | 32 |
| Tabelle 3.4: | Fahrzeuggrundformen und Anwendungsbeispiele nach [73, S. 141] | 50 |
| Tabelle 3.5: | Verbrauch von autonomen Fahrsystemen in Abhängigkeit von deren Autonomiestufe | 53 |
| Tabelle 3.6: | Validierungsergebnisse des Gesamtmodells für existierende Elektrofahrzeuge unter Angabe der Simulationsergebnisse und der relativen Abweichung zum Realfahrzeug | 61 |
| Tabelle 3.7: | Technische Daten des AV von Zoox [187, 208] | 63 |
| Tabelle 4.1: | Herstellkosten (K) und Verbrauch (V) von optimierten und/oder autonomen Varianten des VW ID.3 im Vergleich zum nicht optimierten konventionellen Fahrzeug..... | 71 |
| Tabelle A.1 | Art des Designs für verschiedene Konzept- und Prototypenfahrzeuge | xxxii |
| Tabelle B.1 | Abschnitt mit allgemeinen Anforderungen „1. General“ | xxxiii |
| Tabelle B.2 | Abschnitt mit Einstellungen zur Klimaanlage „2. HVAC“ | xxxiii |
| Tabelle B.3 | Abschnitt mit Einstellungen zum Innenraum „3. Interior“ | xxxiv |
| Tabelle B.4 | Abschnitt mit Einstellungen zur Sonderausstattung „4. Extras“ | xxxv |
| Tabelle C.1 | Umgesetzte Antriebsstrangtopologien im AuVeCoDe-Tool | xxxvi |

| | | |
|-------------|---|--------|
| Tabelle E.1 | Angenommene Kosten im AuVeCoDe-Tool zusammengefasst in [198] unter Verwendung von [62, 196, 197] Teil (1/3) | xlii |
| Tabelle E.2 | Angenommene Kosten im AuVeCoDe-Tool zusammengefasst in [198] unter Verwendung von [62, 196, 197] Teil (2/3) | xliii |
| Tabelle E.3 | Angenommene Kosten im AuVeCoDe-Tool zusammengefasst in [198] unter Verwendung von [62, 196, 197] Teil (3/3) | xliv |
| Tabelle F.1 | Eingangsparameter für die Validierung der Gesamtfahrzeugsimulation..... | xlv |
| Tabelle G.1 | Ein Ausschnitt der besten und schlechtesten Parametersets für den NSGA-II während der Metaoptimierung..... | xlvi |
| Tabelle H.1 | Optimierungsparameter | xlvii |
| Tabelle I.1 | Optimierungsparameter für die Optimierung des konventionellen Fahrzeugs (Teil 1/2)..... | xlviii |
| Tabelle I.2 | Optimierungsparameter für die Optimierung des konventionellen Fahrzeugs (Teil 2/2)..... | xlix |
| Tabelle I.3 | Optimierungsparameter für die Optimierung des Taxis (Teil 1/2) | l |
| Tabelle I.4 | Optimierungsparameter für die Optimierung des Taxis (Teil 2/2) | li |
| Tabelle I.5 | Optimierungsparameter für die Optimierung des autoTAXI (Teil 1/2) | lii |
| Tabelle I.6 | Optimierungsparameter für die Optimierung des autoTAXI (Teil 2/2) | liii |

Literaturverzeichnis

- [1] P. Schiekhofer, „Development of a Technology Demonstrator for Autonomous and Electric Driving“, *ATZ Worldw*, Jg. 122, Nr. 3, S. 50–55, 2020, doi: 10.1007/s38311-019-0192-2.
- [2] A. Fritz, *Die Elektromobilität weltweit auf dem Vormarsch*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/themen/elektromobilitaet/marktentwicklung-europa-international> (Zugriff am: 15. August 2022).
- [3] H. Proff, T. Pottebaum und P. Wolf, *Autonomous Driving: Moonshot Projekt with Quantum Leap from Hardware to Software & AI Focus*. [Online]. Verfügbar unter: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/consumer-industrial-products/POV_Autonomous-Driving_Deloitte.pdf (Zugriff am: 8. Februar 2021).
- [4] Nikolaus Lang *et al.*, *Self Driving Vehicles, Robo-Taxis, and the Urban Mobility Revolution*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bcg.com/de-de/publications/2016/automotive-public-sector-self-driving-vehicles-robo-taxis-urban-mobility-revolution.aspx> (Zugriff am: 19. Juli 2019).
- [5] A. Kriebitz, R. Max und C. Lütge, „The German Act on Autonomous Driving: Why Ethics Still Matters“ (eng), *Philosophy & technology*, Jg. 35, Nr. 2, S. 1–13, 2022, doi: 10.1007/s13347-022-00526-2.
- [6] K. Heineke, P. Kampshoff, A. Mkrtychyan und E. Shao, *Self-driving car technology: When will the robots hit the road?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Automotive%20and%20Assembly/Our%20Insights/Self%20driving%20car%20technology%20When%20will%20the%20ro-bots%20hit%20the%20road/Self-driving-car-technology-When-will-the-robots-hit-the-road.pdf?shouldIndex=false> (Zugriff am: 8. Februar 2021).
- [7] F. Kröger, „Das automatisierte Fahren im gesellschaftsgeschichtlichen und kulturwissenschaftlichen Kontext“ in *Autonomes Fahren*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 41–67, doi: 10.1007/978-3-662-45854-9_3.
- [8] S. Trommer, V. Kolarova, E. Fraedrich, L. Kröger, B. Kickhöfer, T. Kuhnimhof, B. Lenz und P. Phleps, „Autonomous Driving: The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behavior“, Institute for Mobility Research (ifmo), 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ifmo.de/publications.html?t=45>. Zugriff am: 13. Oktober 2021.
- [9] C. Ulrich, B. Frieske, P. Bickel, F. Marthaler, S. Stieler, S. Schmid und S. Ott, „Analysis and Presentation of the Development Status of Vehicle Technologies for Electrification and Automation by Creating a Technology Calendar“ in *Proceedings, 21. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss und A. Wagner, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 321–332, doi: 10.1007/978-3-658-33466-6_22.

- [10] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, *Gesetz zum autonomen Fahren tritt in Kraft*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html> (Zugriff am: 30. Juni 2022).
- [11] C. Andrej, S. Schmidt, P. Wittlinger und F. Herrmann, „Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen: Industriepolitische Schlussfolgerungen“, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. [Online]. Verfügbar unter: https://cdn0.scrvt.com/fokus/6eea2c65d64705d0/38c9ac84490e/BMWi_Studie_hochautomatisiertes-fahren-auf-autobahnen.pdf. Zugriff am: 4. September 2018.
- [12] Verband der Automobilindustrie e.V., „Automatisierung: Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren“, *VDA MAGAZIN - AUTOMATISIERUNG*, S. 1–28, 2015, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://docplayer.org/8522457-Automatisierung-von-fahrerassistenzsystemen-zum-automatisierten-fahren.html>. Zugriff am: 11. Mai 2022.
- [13] A. Aldakkhelallah und M. Simic, „Autonomous Vehicles in Intelligent Transportation Systems“ in *Smart Innovation, Systems and Technologies, Human Centred Intelligent Systems*, A. Zimmermann, R. J. Howlett, L. C. Jain und R. Schmidt, Hg., Singapore: Springer Singapore, 2021, S. 185–198, doi: 10.1007/978-981-16-3264-8_18.
- [14] T. Litman, *Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning*. [Online]. Verfügbar unter: <https://nationalcenterformobilitymanagement.org/wp-content/uploads/2020/03/avip.pdf> (Zugriff am: 5. Februar 2021).
- [15] W. Bernhart *et al.*, *Autonomous Driving: Disruptive innovation that promises to change the automotive industry as we know it - it's time for every player to think:act!* [Online]. Verfügbar unter: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_tab_autonomous_driving.pdf (Zugriff am: 8. Februar 2021).
- [16] Xavier Mosquet *et al.*, *Revolution in the Driver's Seat: The Road to Autonomous Vehicles*. [Online]. Verfügbar unter: http://image-src.bcg.com/Images/BCG-Revolution-in-the-Divers-Seat-Apr-2015_tcm9-64351.pdf (Zugriff am: 16. Juli 2019).
- [17] I. Feige, M. Mischke und L. Gropman, *City Archetypes: How might specific needs of cities be best addressed in considering urban mobility?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ifmo.de/publikationen.html?t=165> (Zugriff am: 9. Juli 2019).
- [18] B. Collie, J. Rose, R. Choraria und A. Wegscheide, *The Reimagined Car: Shared, Autonomous, and Electric*. [Online]. Verfügbar unter: https://image-src.bcg.com/Images/BCG-The-Reimagined-Car-Dec-2017_tcm9-179717.pdf (Zugriff am: 5. Februar 2021).
- [19] M. Friedrich und M. Hartl, *MEGAFON: Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des oeffentlichen Nahverkehrs*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ptvgroup.com/de/mobilitynext/public/media/PDF/MEGAFON_Abschlussbericht.pdf (Zugriff am: 16. Mai 2018).
- [20] P. L. Peters, R. Demuth und D. Schramm, „Ableitung von objektivierten Auslegungsprämissen zukünftiger Fahrzeugkonzepte auf der Basis von Prognosen zum Mobilitätsverhalten in Deutschland im Jahr 2035“ in *Mobilität in Zeiten der Veränderung*, H. Proff, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 157–179, doi: 10.1007/978-3-658-26107-8_13.

- [21] Z. Wadud, D. MacKenzie und P. Leiby, „Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 86, S. 1–18, 2016, doi: 10.1016/j.tra.2015.12.001.
- [22] J. I. Peters, „Accelerating Road Vehicle Automation“ in *Lecture Notes in Mobility, Road Vehicle Automation*, G. Meyer und S. Beiker, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 25–35, doi: 10.1007/978-3-319-05990-7_3.
- [23] J. H. Gawron, G. A. Keoleian, R. D. de Kleine, T. J. Wallington und H. C. Kim, „Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects“ (eng), *Environmental science & technology*, Jg. 52, Nr. 5, S. 3249–3256, 2018, doi: 10.1021/acs.est.7b04576.
- [24] M. Krail, *Auto tankt Internet: Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/auto-tankt-internet/> (Zugriff am: 5. Februar 2021).
- [25] P. Roszbacher, *Beitrag integrierter Konzeptmodelle zur virtuellen Gesamtfahrzeugentwicklung in der frühen Entwurfsphase*. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2020.
- [26] P. L. Peters, R. Demuth und D. Schramm, „Evaluation of the effects of trends on vehicle concepts based on a forecast of travel demand“ in *Proceedings, 19. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss, A. Wagner und J. Wiedemann, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 571–587, doi: 10.1007/978-3-658-25939-6_46.
- [27] M. Tschochner, „Comparative Assessment of Early Development Phase Powertrain Concepts“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2018.
- [28] T. Tzivanopoulos, J. Stieg, P. Krasteva und T. Vietor, „Analysis of new freedoms in future vehicle interiors“ in *14. Internationales Stuttgarter Symposium*, Stuttgart, 2014, 669-682, doi: 10.1007/978-3-658-05130-3.
- [29] K. Kuchenbuch, „Methodik zur Identifikation und zum Entwurf packageoptimierter Elektrofahrzeuge“. Dissertation, Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig, 2012.
- [30] T. Woopen, L. Eckstein, S. Kowalewski, D. Moormann, M. Maurer, R. Ernst, H. Winner, S. Katzenbeisser, M. Becker, C. Stiller, K. Furmans, K. Bengler, M. Lienkamp, H.-C. Reuss, K. Dietmayer, H. Lategahn, N. Siepenkötter, M. Elbs, E. v. Hinüber, M. Dupuis und C. Hecker, „UNICARagil - Disruptive modulare Architektur für agile, automatisierte Fahrzeugkonzepte“ in *27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2018*, doi: 10.18154/RWTH-2018-229909.
- [31] L. Nicoletti, „Parametric Modeling of Battery Electric Vehicles in the Early Development Phase“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2022.
- [32] F. Schockenhoff, „Fahrzeugkonzeptentwicklung für autonome, geteilte und elektrische Mobilität“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2022, in Bearbeitung.

- [33] A. Koch, „Energieeffizientes Fahren und optimale elektrische Antriebsstränge für automatisierte Fahrzeuge“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2022, in Bearbeitung.
- [34] *Surface Vehicle: Recommended Practice*, SAE J3016, SAE International, Jun. 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/
- [35] H. Winner und W. Wachenfeld, „Auswirkungen des autonomen Fahrens auf das Fahrzeugkonzept“ in *Autonomes Fahren*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 265–285, doi: 10.1007/978-3-662-45854-9_13.
- [36] M. Barth, K. Boriboonsomsin und G. Wu, „Vehicle Automation and Its Potential Impacts on Energy and Emissions“ in *Lecture Notes in Mobility, Road Vehicle Automation*, G. Meyer und S. Beiker, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 103–112, doi: 10.1007/978-3-319-05990-7_10.
- [37] M. Krail, J. Hellekes, U. Schneider, E. Dütschke, Schellert, Maximilian, Rüdiger, David und A. Steindl, *Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iml.fraunhofer.de/content/dam/iml/de/documents/OE%20320/Energie-und_Treibhausgaswirkungen_des_automatisierten_und_vernetzten_Fahrens_im_Stra%C3%9Fenverkehr.pdf (Zugriff am: 9. Februar 2021).
- [38] W. Wachenfeld, H. Winner, C. Gerdes, B. Lenz, M. Maurer, S. A. Beiker, E. Fraedrich und T. Winkle, „Use-Cases des autonomen Fahrens“ in *Autonomes Fahren*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 9–37, doi: 10.1007/978-3-662-45854-9_2.
- [39] A. Brown, J. Gonder und B. Repac, „Erratum to: An Analysis of Possible Energy Impacts of Automated Vehicles“ in *Lecture Notes in Mobility, Road Vehicle Automation*, G. Meyer und S. Beiker, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2014, E1-E1, doi: 10.1007/978-3-319-05990-7_22.
- [40] Y. Okumura, „Activities, Findings and Perspectives in the Field of Road Vehicle Automation in Japan“ in *Lecture Notes in Mobility, Road Vehicle Automation*, G. Meyer und S. Beiker, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 37–46, doi: 10.1007/978-3-319-05990-7_4.
- [41] A. Talebpour und H. S. Mahmassani, „Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 71, S. 143–163, 2016, doi: 10.1016/j.trc.2016.07.007.
- [42] M. Baumgartner, „Entwicklung von Lösungsansätzen für Innenraumkonzepte in vollautomatisierten zukünftigen Fahrzeugkonzepten“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, München, 2018.
- [43] A. Filatov, J. M. Scanlon, A. Bruno, S. S. K. Danthurthi und J. Fisher, „Effects of Innovation in Automated Vehicles on Occupant Compartment Designs, Evaluation, and Safety: A Review of Public Marketing, Literature, and Standards“ in *WCX SAE World Congress Experience*, 2019, doi: 10.4271/2019-01-1223.

- [44] J. Becker, M.-B. A. Colas, S. Nordbruch und M. Fausten, „Bosch's Vision and Roadmap Toward Fully Autonomous Driving“ in *Lecture Notes in Mobility, Road Vehicle Automation*, G. Meyer und S. Beiker, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 49–59, doi: 10.1007/978-3-319-05990-7_5.
- [45] Atkins, „Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow: Summary Report“, Department of Transport (UK). [Online]. Verfügbar unter: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/530091/impacts-of-connected-and-autonomous-vehicles-on-traffic-flow-summary-report.pdf. Zugriff am: 13. Mai 2022.
- [46] D. J. Fagnant und K. Kockelman, „Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 77, S. 167–181, 2015, doi: 10.1016/j.tra.2015.04.003.
- [47] G. Meyer und S. Deix, „Research and Innovation for Automated Driving in Germany and Europe“ in *Lecture Notes in Mobility, Road Vehicle Automation*, G. Meyer und S. Beiker, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 71–81, doi: 10.1007/978-3-319-05990-7_7.
- [48] T. Unselt, R. Schöneburg und J. Backker, „Insassen- und Partnerschutz unter den Rahmenbedingungen der Einführung autonomer Fahrzeugsysteme“ in *9. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit - Sicherheit 2.0: Berlin, 20. und 21. November 2013*, 2013, S. 229–244.
- [49] T. Winkle, „Sicherheitspotenzial automatisierter Fahrzeuge: Erkenntnisse aus der Unfallforschung“ in *Autonomes Fahren*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 351–376, doi: 10.1007/978-3-662-45854-9_17.
- [50] K. Golowko, V. Zimmermann und D. Zimmer, „Automatisiertes Fahren: Einflüsse auf die Rückhaltesysteme“, *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ*, Jg. 119, 07-08, S. 27–33, 2017.
- [51] J. Lee und K. Kockelman, „Energy Implications of Self-Driving Vehicles“ in *98th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., 2019.
- [52] D. J. Hicks, „The Safety of Autonomous Vehicles: Lessons from Philosophy of Science“, *IEEE Technology and Society Magazine*, Volume 37, S. 62–69, 2018, doi: 10.1109/MTS.2018.2795123.
- [53] Z. Vander Laan und K. F. Sadabadi, „Operational performance of a congested corridor with lanes dedicated to autonomous vehicle traffic“, *International Journal of Transportation Science and Technology*, Jg. 6, Nr. 1, S. 42–52, 2017, doi: 10.1016/j.ijtst.2017.05.006.
- [54] S. Oh, R. Seshadri, C. L. Azevedo, N. Kumar, K. Basak und M. Ben-Akiva, „Assessing the impacts of automated mobility-on-demand through agent-based simulation: A study of Singapore“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 138, S. 367–388, 2020, doi: 10.1016/j.tra.2020.06.004.
- [55] S. Salter, C. Diels, P. Herriotts, S. Kanarachos und D. Thake, „Motion sickness in automated vehicles with forward and rearward facing seating orientations“ (eng), *Applied ergonomics*, Jg. 78, S. 54–61, 2019, doi: 10.1016/j.apergo.2019.02.001.

- [56] M. L. H. Jones, V. C. Le, S. M. Ebert, K. H. Sienko, M. P. Reed und J. R. Sayer, „Motion sickness in passenger vehicles during test track operations“ (eng), *Ergonomics*, Jg. 62, Nr. 10, S. 1357–1371, 2019, doi: 10.1080/00140139.2019.1632938.
- [57] S. Matz, „Nutzerorientierte Fahrzeugkonzeptoptimierung in einer multimodalen Verkehrsumgebung“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2015.
- [58] H. Wallentowitz und A. Freialdenhoven, *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*, 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [59] M. Münster, M. Brost, R. Hahn, T. Siefkes, G. Kopp, S. Schmid und T. Knutzen, „U-Shift Vehicle Concept: Modular on the Road“ in *Proceedings, 21. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss und A. Wagner, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 333–346, doi: 10.1007/978-3-658-33466-6_23.
- [60] C. Raulf, C. Pethe, T. Vietor und R. Henze, „Dynamically Configurable Vehicle Concepts for Autonomous Driving“, *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ*, Jg. 12, Nr. 122, S. 46–50, 2020.
- [61] M. Münster, G. Kopp, H. E. Friedrich und T. Siefkes, „Autonomous Vehicle Concept for the Urban Transport of the Future“, *ATZ Worldw*, Jg. 122, Nr. 3, S. 26–31, 2020, doi: 10.1007/s38311-020-0202-4.
- [62] S. Fuchs, „Verfahren zur parameterbasierten Gewichtsabschätzung neuer Fahrzeugkonzepte“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2014.
- [63] A. Müller, „Systematische und nutzerzentrierte Generierung des Pkw-Maßkonzepts als Grundlage des Interior- und Exteriorsdesign“. Dissertation, Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2010.
- [64] R. E. Grünen, „Haltungen und Raumbedarf – Geänderte Randbedingungen für die Karosserie durch autonomes Fahren?“ in *Proceedings, Karosseriebautage Hamburg 2017*, A. Piskun, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 21–39, doi: 10.1007/978-3-658-18107-9_3.
- [65] T. Tzivanopoulos, H. Watschke, P. Krasteva und T. Vietor, „Neue Denkansätze in der Fahrzeugkonzeption“, *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 117, Nr. 9, S. 16–21, 2015, doi: 10.1007/s35148-015-0101-y.
- [66] K. Golowko, P. Mugele und D. Zimmer, „Neue Möglichkeiten der Innenraumgestaltung“, *ATZ Extra*, Jg. 22, S3, S. 42–45, 2017, doi: 10.1007/s35778-017-0030-3.
- [67] A. König, D. Telschow, L. Nicoletti und M. Lienkamp, „Package Planning of Autonomous Vehicle Concepts“, *Proc. Des. Soc.*, Jg. 1, S. 2369–2378, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.498.
- [68] J. Moon, I. Bae und S. Kim, „A Pre-Crash Safety System for an occupant sitting on a backward facing seat for fully automated vehicles in Frontal Crashes“ in *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, Wien, 2017, S. 168–171, doi: 10.1109/ICVES.2017.7991920.

- [69] H. Rist, U. Dierks und R. Wiik, „A Seat Mounted Restraint Solution for Far Side Impacts“ in *9. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit - Sicherheit 2.0: Berlin, 20. und 21. November 2013*, 2013, S. 99–118.
- [70] M. Alayan, „Motion Sickness Detection and Prevention“ in *Proceedings, 21. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss und A. Wagner, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 364–367, doi: 10.1007/978-3-658-33466-6_25.
- [71] M. L. H. Jones, K. Sienko, S. Ebert-Hamilton, C. Kinnaird, C. Miller, B. Lin, B.-K. Park, J. Sullivan, M. Reed und J. Sayer, „Development of a Vehicle-Based Experimental Platform for Quantifying Passenger Motion Sickness during Test Track Operations“ in *WCX World Congress Experience*, 2018, doi: 10.4271/2018-01-0028.
- [72] J. Tomforde, „Disruptiv innovative Fahrzeug- Plattformen und Design-Konzepte für die mobile Zukunft im urbanen Raum“ in *Proceedings, Karosseriebautage Hamburg 2017*, A. Piskun, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 3–9, doi: 10.1007/978-3-658-18107-9_1.
- [73] K. Wolff, H. D. Futschik, A. Achleitner, C. Burger und G. Döllner, „Gesamtfahrzeug“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, S. Pischinger und U. Seifert, Hg., 9. Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 125–167.
- [74] E. Beeh und H. E. Friedrich, „Vorderwagenstruktur mit einfach adaptierbaren Crasheigenschaften“, *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 117, Nr. 10, S. 78–85, 2015, doi: 10.1007/s35148-015-0128-0.
- [75] J. Kim, H. Lee, K. Chung, H. Lee, Y. Kang und J. Nam, „A New Body Concept for Electric Vehicle: PBC-EV“ in *Lecture Notes in Electrical Engineering, Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 579–591, doi: 10.1007/978-3-642-33835-9_53.
- [76] B. Erler, Lohmann Sven, C. Zorn und T. Okupnik, „Karosseriestruktur des Volkswagen e-up!“ in *Proceedings, Karosseriebautage Hamburg: 13. ATZ-Fachtagung ; [14. und 15. Mai 2015]*, G. Tecklenburg, Hg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 35–41.
- [77] E. Haberkorn, M. Pilaric und U. Müller, „Lastpfadgerechte Auslegung von Crashstrukturen in Elektrofahrzeugen“, *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ*, Jg. 123, Nr. 10, S. 43–48, 2021. [Online]. Verfügbar unter: emag.springerprofessional.de/public/data/atz/Ausgabe_10--2021/index.php#p=1
- [78] B. Marx, D. Kalka und U. Jankowski, „Crash-Sicherheit von Elektrofahrzeugen: Herausforderungen und Lösungsansätze“ in *Proceedings, Karosseriebautage Hamburg: 13. ATZ-Fachtagung ; [14. und 15. Mai 2015]*, G. Tecklenburg, Hg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 43–51.
- [79] T. Schütz, Hg., *Hucho - Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort ; mit 49 Tabellen*, 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [80] H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen und M. Vollrath, *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [81] C. Adler, D. Siedenberg und M. Töns, „Multicriteria Optimization of Electric Drivetrains“, *ATZ Worldw*, Jg. 122, Nr. 3, S. 40–45, 2020, doi: 10.1007/s38311-019-0189-x.

- [82] B. Frieske, M. Kloetzke und F. Mauser, „Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles“ in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, Barcelona, Spain, 17.11.2013 - 20.11.2013, S. 1–12, doi: 10.1109/EVS.2013.6914783.
- [83] A. Seeck, Gail, Jost Christian, B. Lorenz, M. Zöller, U. Seiffert, E. Fritzsche, H. Mankau, C. Repmann, A. Eilemann, M. Jung, E. Pantow, A. Wiebelt und J. Honeder, „Anforderungen, Zielkonflikte, Grundlagen“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, S. Pischinger und U. Seiffert, Hg., 9 Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 15–123.
- [84] T. Grube und D. Stolten, „The Impact of Drive Cycles and Auxiliary Power on Passenger Car Fuel Economy“, *Energies*, 11, Issue 4, 2018, doi: 10.3390/en11041010.
- [85] X. Duan, F. Schockenhoff und A. Koch, „Implementation of Driving Cycles Based on Driving Style Characteristics of Autonomous Vehicles“, *WEVJ*, Jg. 13, Nr. 6, S. 108, 2022, doi: 10.3390/wevj13060108.
- [86] P.-S. Huang und A. Pruckner, *Lenkungshandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [87] K. Jo, J. Kim, D. Kim, C. Jang und M. Sunwoo, „Development of Autonomous Car—Part I: Distributed System Architecture and Development Process“, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Jg. 61, Nr. 12, S. 7131–7140, 2014, doi: 10.1109/TIE.2014.2321342.
- [88] S. Y. Gelbal, B. A. Guvenc und L. Guvenc, „SmartShuttle: A Unified, Scalable and Replicable Approach to Connected and Automated Driving in a Smart City“ in *SCOPE '17*, Pittsburgh, PA, April 2017, S. 57–62, doi: 10.1145/3063386.3063761.
- [89] S. Muckenhuber, K. Softic, A. Fuchs, G. Stettinger und D. Watzenig, „Sensors for Automated Driving“ in *Perspectives in Law, Business and Innovation, Autonomous Vehicles*, S. van Uytsel und D. Vasconcellos Vargas, Hg., Singapore: Springer Singapore, 2021, S. 115–146, doi: 10.1007/978-981-15-9255-3_6.
- [90] J. Hecht, „Lidar for Self-Driving Cars“, *Optics & Photonics News*, January 2018, S. 26–33. [Online]. Verfügbar unter: https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_29/january_2018/features/lidar_for_self-driving_cars/
- [91] M. Peterson, *Apple's Upgraded Self-Driving Lexus SUVs Spotted in Sunnyvale*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.idropnews.com/news/upgraded-apple-self-driving-cars-spotted-california/48052/> (Zugriff am: 4. Juli 2022).
- [92] Aurora Innovation Inc., *The Aurora Driver: A Next-Generation Sensor Suite*. [Online]. Verfügbar unter: <https://aurora.tech/aurora-driver> (Zugriff am: 4. Juli 2022).
- [93] H. Somerville, P. Lienert und A. Sage, *Uber's use of fewer safety sensors prompts questions after Arizona crash*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reuters.com/article/us-uber-selfdriving-sensors-insight-idUSKBN1H337Q> (Zugriff am: 4. Juli 2022).
- [94] D. Keilhoff und H.-C. Reuss, „UNICARagil – Neue Architekturen für disruptive Fahrzeugkonzepte“ in *19. Stuttgarter International Symposium*, Stuttgart, 2019.
- [95] Volkswagen AG, *15 Laptops steuern diesen Golf: Seit März 2019 testet Volkswagen autonomes Fahren in Hamburg mit fünf umgerüsteten e-Golf im öffentlichen*

- Straßenverkehr. Bis 2025 soll ein eigenes, selbstfahrendes System marktreif sein.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/stories/15-laptops-steuern-diesen-golf-5556> (Zugriff am: 4. Juli 2022).
- [96] Y. Ahn, *Designing the 5th-generation Waymo Driver.* [Online]. Verfügbar unter: <https://blog.waymo.com/2020/03/designing-5th-generation-waymo-driver.html> (Zugriff am: 4. Juli 2022).
- [97] K. Wiggers, *Yandex let us ride in its autonomous Prius.* [Online]. Verfügbar unter: <https://venturebeat.com/2019/01/21/yandex-let-us-ride-in-its-autonomous-prius/> (Zugriff am: 4. Juli 2022).
- [98] Zoox, *The 'full-stack' behind autonomous driving.* [Online]. Verfügbar unter: <https://zoox.com/autonomy/> (Zugriff am: 4. Juli 2022).
- [99] *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen in Bezug auf die Kriterien Emissionen, Kohlendioxidemissionen und Kraftstoffverbrauch und/oder die Messung des Stromverbrauchs und der elektrischen Reichweite (WLTP), UNECE R154, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Nov. 2021.* [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2021.423.01.0001.01.DEU
- [100] The International Council on Clean Transportation, *Overview and evaluation of eco-innovations in European passenger car CO2 standards.* [Online]. Verfügbar unter: https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU_Eco_innovations_Briefing_20180712.pdf (Zugriff am: 27. Oktober 2021).
- [101] A. König, F. Schockenhoff, A. Koch und M. Lienkamp, „Concept Design Optimization of Autonomous and Driverless Vehicles“ in *8th International Conference on Power Science and Engineering*, Dublin, 2019, doi: 10.1109/ICPSE49633.2019.9041175.
- [102] Z. Liu, H. Tan, X. Kuang, H. Hao und F. Zhao, „The Negative Impact of Vehicular Intelligence on Energy Consumption“, *Journal of Advanced Transportation*, Jg. 2019, S. 1–11, 2019, doi: 10.1155/2019/1521928.
- [103] F. Bordes, „Verbindung von Batteriekühlung und Insassenkomfort“, *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ*, Jg. 123, Nr. 10, S. 17–21, 2021. [Online]. Verfügbar unter: emag.springerprofessional.de/public/data/atz/Ausgabe_10--2021/index.php#p=1
- [104] M. Jung, A. Kemle, T. Strauss und M. Wawzyniak, „Innenraumheizung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen“, *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 113, Nr. 5, S. 396–402, 2011, doi: 10.1365/s35148-011-0093-1.
- [105] J. Haug, *Ganzheitliches Thermomanagement im E-Fahrzeug: Untersuchung eines Kältekreismoduls zum Heizen und Kühlen der Fahrgastzelle eines E-Fahrzeugs.* [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2314/GBV:865960186> (Zugriff am: 1. Februar 2019).
- [106] N. Miyaji und J. Kleemann, „Waste Heat Recovery from Cabin Exhaust Air by Use of Heat Pump“ in *Proceedings, 21. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss und A. Wagner, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 106–118, doi: 10.1007/978-3-658-33466-6_8.
- [107] F. Schockenhoff, A. König, M. Zähringer und M. Lienkamp, „USER NEED-ORIENTED CONCEPT DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS VEHICLES“, *Proc. Des. Soc.*, Jg. 1, S. 3349–3358, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.596.

- [108] F. Schockenhoff, A. König, A. Koch und M. Lienkamp, „Customer-Relevant Properties of Autonomous Vehicle Concepts“, *Procedia CIRP*, Jg. 91, S. 55–60, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.150.
- [109] A. Prinz, „Struktur und Ablaufmodell für das parametrische Entwerfen von Fahrzeugkonzepten“. Dissertation, Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2010.
- [110] U. Widmann, J. Weissinger, T. Breitling, U. Hackenberg, K. Wundram und S. Goß, „Produktentstehungsprozess“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, S. Pischinger und U. Seiffert, Hg., 9 Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 1271–1382.
- [111] S. Macey und G. Wardle, *H-Point: The fundamentals of car design & packaging*, 1. Aufl. Culver City: Design Studio Press, 2009.
- [112] L. Nicoletti, M. Bronner, B. Danquah, A. Koch, A. König, S. Krapf, A. Pathak, F. Schockenhoff, G. Sethuraman, S. Wolff und M. Lienkamp, „Review of Trends and Potentials in the Vehicle Concept Development Process“ in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 9/10/ - 9/12/, S. 1–15, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9243115.
- [113] M. Münster, M. Schäffer, G. Kopp, G. Kopp und H. E. Friedrich, „New Approach for a Comprehensive Method for Urban Vehicle Concepts with Electric Powertrain and their Necessary Vehicle Structures“, *Transportation Research Procedia*, Jg. 14, S. 3686–3695, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.487.
- [114] A. König, P. Neuhaus, K. Alexander, S. Ferdinand, H. Philipp, B. Ingrid und L. Markus, „CONCEPT DEVELOPMENT PROCESS FOR DOORS OF AUTONOMOUS VEHICLES“, *Proc. Des. Soc.*, Jg. 1, S. 701–710, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.70.
- [115] U. Lindemann, M. Maurer und T. Braun, *Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [116] T. Tzivanopoulos, "Persönlicher Austausch über Dissertationsthema von Theodoros Tzivanopoulos", Mündlich, Nov. 2018.
- [117] M. Felgenhauer, „Automated Development of Modular Systems for Passenger Cars within the Vehicle Front“. Dissertation, Technische Universität München, 2019.
- [118] T. Dirr, T. Ross, A. Riddoch und H. Gronau, „Concept Methodology for Electric Vehicle Topology“, *ATZ Worldw*, Jg. 123, 5-6, S. 38–43, 2021, doi: 10.1007/s38311-021-0663-0.
- [119] S. Phadte, „Vehicle layout optimization using multi-objective genetic algorithms“ in *International Conference on Algorithms, Methodology, Models and Applications in Emerging Technologies*, Chennai, India, 2017, doi: 10.1109/ICAMMAET.2017.8186624.
- [120] Krammer, B. Philip, Lothar und C. Werner-Spatz, „Multidisciplinary Preliminary Aircraft Design with Integrated Noise Analysis Capabilities“ in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009*, Aachen, Deutschland, 08. - 10. Sept. 2009, S. 1–10.
- [121] W. Heinze, „Ein Beitrag zur quantitativen Analyse der technischen und wirtschaftlichen Auslegungsgrenzen verschiedener Flugzeugkonzepte für den Transport grosser Nutzlasten“. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 1994.

- [122] T.-H. Joung, K. Sammut und F. He, „Shape optimization of an autonomous underwater vehicle with an ducted propeller using computation fluid dynamics analysis“, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, S. 43–56, 2012, doi: 10.3744/JNAOE.2012.4.1.044.
- [123] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, *Internationale Harmonisierung der technischen Vorschriften für Kraftfahrzeuge*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/internationale-harmonisierung-der-technischen-vorschriften-fuer-kraftfahrzeuge.html> (Zugriff am: 4. März 2022).
- [124] Europäische Kommission, *Arten von EU-Rechtsvorschriften*. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/info/law/law-making-process/types-eu-law_de (Zugriff am: 29. April 2022).
- [125] *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Sichtfeldes des Fahrzeugführers nach vorn*, UNECE R125, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Jan. 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.020.01.0016.01.DEU
- [126] M. Münster, M. Schäffer, G. Kopp und H. E. Friedrich, „Modulare Karosseriebauweise für ein Stadt-Elektrofahrzeug“, *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ*, Jg. 119, Nr. 05, S. 16–23, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s35148-017-0023-y.pdf>
- [127] M. A. Schreurs und S. D. Steuer, „Autonomous Driving - Political, Legal, Social, and Sustainability Dimensions“ in *Autonomes Fahren*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 151–173, doi: 10.1007/978-3-662-45854-9_8.
- [128] *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und des Pflichtversicherungsgesetzes – Gesetz zum autonomen Fahren*, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Gesetze/Gesetze-19/gesetz-aenderung-strassenverkehrsgesetz-pflichtversicherungsgesetz-autonomes-fahren.pdf?__blob=publicationFile
- [129] V. Ilkova und A. Ilka, „Legal aspects of autonomous vehicles — An overview“ in *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, Strbske Pleso, Slovakia, 2017, S. 428–433, doi: 10.1109/PC.2017.7976252.
- [130] B. Husch und A. Teigen, „Regulating Autonomous Vehicles“, *LegisBrief*, NO. 13, Vol. 25, S. 1–2, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ncsl.org/documents/legis-briefs/2017/lb_2513.pdf
- [131] *Einheitliche Vorschriften für die Typgenehmigung von Fahrzeugen der Klassen M, N, und O hinsichtlich der Bremsen*, UNECE R13, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Okt. 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2016.042.01.0001.01.DEU
- [132] *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Luftreifen für Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger*, UNECE R30, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Nov. 2007. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:201:0070:0096:DE:PDF>

- [133] *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Schutzes der Insassen bei einem Frontalaufprall*, UNECE R94, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Jun. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2021.392.01.0001.01.DEU
- [134] *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Schutzes der Insassen bei einem Seitenaufprall*, UNECE R95, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Jun. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2021.392.01.0062.01.DEU
- [135] *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich ihrer Eigenschaften im Zusammenhang mit der Fußgängersicherheit*, UNECE R127, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Mai. 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2020.154.01.0001.01.DEU
- [136] *Passenger cars — Luggage compartments — Method of measuring reference volume*, ISO 3832:2002(E), International Standard, Jun. 2002.
- [137] *SAE J1100: Motor Vehicle Dimensions REV 2009-11*, Human Accom and Design Devices Stds Comm, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, Sep. 1973.
- [138] T. Dirr, T. Roß, A. Riddoch und H. Gronau, „Vehicle Topology Concept Methodology“ in *Proceedings, 21. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss und A. Wagner, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 297–308, doi: 10.1007/978-3-658-33466-6_20.
- [139] *Einheitliche Bestimmungen für die Genehmigung von Fahrzeugen der Klassen M2 oder M3 hinsichtlich ihrer allgemeinen Konstruktionsmerkmale*, UNECE R107, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Feb. 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.052.01.0001.01.DEU
- [140] *Road vehicles - Three-dimensional reference system and fiducial marks - Definitions*, ISO 4130:1978(E), International Standard, Aug. 1978.
- [141] *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich der Sitze, ihrer Verankerungen und Kopfstützen*, UNECE R17, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Mai. 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.266.01.0001.01.DEU
- [142] *Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung der Sitze von Kraftomnibussen sowie dieser Fahrzeuge hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit der Sitze und ihrer Verankerungen*, UNECE R80, Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Okt. 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.266.01.0031.01.DEU
- [143] B. Ma, D. Hu, X. Chen, Y. Wang und X. Wu, „The vehicle routing problem with speed optimization for shared autonomous electric vehicles service“, *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 161, S. 107614, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107614.

- [144] MathWorks, *MATLAB R2020b im Überblick*. [Online]. Verfügbar unter: https://de.mathworks.com/products/new_products/release2020b.html (Zugriff am: 14. Juli 2022).
- [145] A. König *et al.*, *Autonomous Vehicle Concept Development (AuVeCoDe): A tool for designing autonomous or conventional electric vehicles*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/AuVeCoDe> (Zugriff am: 4. Oktober 2022).
- [146] A. König, S. Mayer, L. Nicoletti, S. Tumphart und M. Lienkamp, „The Impact of HVAC on the Development of Autonomous and Electric Vehicle Concepts“, *Energies*, Jg. 15, Nr. 2, S. 441, 2022, doi: 10.3390/en15020441.
- [147] J. Reiß, "Abschätzung des c_w Wertes in der frühen Entwicklungsphase", E-Mail, Jan. 2021.
- [148] auto-motor-sport, *Spritspar-Supertruck aus München: MAN LKW-STUDIE CONCEPT S*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/man-lkw-studie-concept-s-spritspar-supertruck-aus-muenchen/#:~:text=MAN%20hat%20sich%20%C3%BCber%20diese,3%20in%20Pkw%2DBereiche%20vordringt.> (Zugriff am: 2. Mai 2022).
- [149] *Sinnbilder für Datenfluss- und Programmablaufpläne*, DIN 66 001, Deutsches Institut für Normung e.V., Sep. 1966.
- [150] L. Nicoletti, S. Mayer, M. Brönnert, F. Schockenhoff und M. Lienkamp, „Design Parameters for the Early Development Phase of Battery Electric Vehicles“, *WEVJ*, Jg. 11, Nr. 3, S. 47, 2020, doi: 10.3390/wevj11030047.
- [151] R. Isermann, *Automotive Control: Modeling and Control of Vehicles*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1902294>
- [152] M. Ersoy und S. Gies, *Fahrwerkhandbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [153] M. Mitschke und H. Wallentowitz, *Dynamik der Kraftfahrzeuge*, 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [154] A. König, L. Nicoletti, S. Kalt, K. Moller, A. Koch und M. Lienkamp, „An Open-Source Modular Quasi-Static Longitudinal Simulation for Full Electric Vehicles“ in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 9/10/ - 9/12/, S. 1–9, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9242981.
- [155] A. König, L. Nicoletti und K. Moller, *Modular Quasi Static Longitudinal Simulation for BEV*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/Modular-Quasi-Static-Longitudinal-Simulation-for-BEV> (Zugriff am: 13. Juni 2022).
- [156] K. Moller, „Antriebsstrangmodellierung zur Optimierung autonomer Elektrofahrzeuge“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [157] M. André, M. Keller, A. Sjödin, M. Gadrat und M. Mc Crae, *The ARTEMIS European tools for estimating the transport pollutant emissions*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/228850149_The_ARTEMIS_European_tools_for_estimating_the_Transport_pollutant_emissions/stats (Zugriff am: 15. März 2019).

- [158] M. André, „The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions“ (eng), *The Science of the total environment*, 334-335, S. 73–84, 2004, doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.04.070.
- [159] V. Kuptsov, P. Fajri, A. Trzynadlowski, G. Zhang und S. Magdaleno-Adame, „Electromagnetic Analysis and Design Methodology for Permanent Magnet Motors Using MotorAnalysis-PM Software“, *Machines*, Jg. 7, Nr. 4, S. 75, 2019, doi: 10.3390/machines7040075.
- [160] S. Kalt, „Automatisierte Auslegung elektrischer Antriebsmaschinen zur anwendungsspezifischen Optimierung“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://media-tum.ub.tum.de/doc/1593960/1593960.pdf>
- [161] L. Decker, M. Timmann, R. Inderka und M. Doppelbauer, „Electric Drive System Efficiency Modeling Based on Polynomial Functions“ in *Proceedings, 21. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss und A. Wagner, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 74–88, doi: 10.1007/978-3-658-33466-6_6.
- [162] N. Wassiliadis, M. Steinsträter, M. Schreiber, P. Rosner, L. Nicoletti, F. Schmid, M. Ank, O. Teichert, L. Wildfeuer, J. Schneider, A. Koch, A. König, A. Glatz, J. Gandlgruber, T. Kröger, X. Lin und M. Lienkamp, „Quantifying the state of the art of electric powertrains in battery electric vehicles: Range, efficiency, and lifetime from component to system level of the Volkswagen ID.3“, *eTransportation*, Jg. 12, S. 100167, 2022, doi: 10.1016/j.etran.2022.100167.
- [163] K. Moller, „Validierung einer MATLAB Längsdynamiksimulation für die Auslegung von Elektrofahrzeugen“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [164] RWTH Aachen, *Phyphox: Physical phone experiments*. [Online]. Verfügbar unter: <https://phyphox.org/de/home-de/> (Zugriff am: 12. Juni 2022).
- [165] M. Ried, A. Kelnberger, A. Gumm, M. Jung und D. Schramm, „Parametrische Geometriemodelle für die Konzeptgestaltung elektrifizierter Fahrzeuge“ in *Schritte in die künftige Mobilität*, H. Proff, W. Pascha, J. Schönharting und D. Schramm, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 19–33, doi: 10.1007/978-3-8349-4308-8_2.
- [166] M. Sabieraj, „Anpassung der Packageplanung für autonome Fahrzeuge“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [167] D. Telschow, „Auslegung und Optimierung autonomer Fahrzeugkonzepte“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [168] T. Brell, R. Philipsen und M. Ziefle, „sCARY! Risk Perceptions in Autonomous Driving: The Influence of Experience on Perceived Benefits and Barriers“ (eng), *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, Jg. 39, Nr. 2, S. 342–357, 2019, doi: 10.1111/risa.13190.
- [169] Page-Roberts, *Page-Roberts - Technology*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.page-roberts.com/technology/> (Zugriff am: 7. Juni 2021).
- [170] F. Fahn, „Innenraummodellierung von autonomen Elektrofahrzeugen“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.

- [171] *A2MAC1: Automotive Benchmarking*. [Online]. Verfügbar unter: <https://portal.a2mac1.com/> (Zugriff am: 28. Juni 2022).
- [172] L. Nicoletti, A. Romano, A. König, F. Schockenhoff und M. Lienkamp, „Parametric Modelling of Mass and Volume Effects for Battery Electric Vehicles, with Focus on the Wheel Components“, *WEVJ*, Jg. 11, Nr. 4, S. 63, 2020, doi: 10.3390/wevj11040063.
- [173] L. Nicoletti, P. Köhler, A. König, M. Heinrich und M. Lienkamp, „Parametric Modelling of Weight and Volume Effects in Battery Electric Vehicles, with Focus on the Gearbox“, *Proc. Des. Soc.*, Jg. 1, S. 2389–2398, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.500.
- [174] P. Köhler, „Semi-physikalische Modellierung von Antriebsstrangkomponenten für Elektrofahrzeuge“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [175] P. Köhler, „Semi-physikalische Modellierung von Antriebsstrangkomponenten für Elektrofahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [176] M. Böhme, „Potentiale passiver Sicherheit in Frontalcrashes: Kopfbelastungen bei geringer und Vorderwagenoptimierung für große Überdeckung“. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Wiesbaden, 2019.
- [177] F. Kramer, *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=749825>
- [178] *Kraftfahrzeugbau Teil 1: Personenkraftwagen: Begriffe, Grundlagen, Bestimmungen, Maßkurzzeichen*, DIN 70020-1, Deutsches Institut für Normung e.V., Apr. 2002.
- [179] S. Modi, A. Spulber und J. Jin, *Impact of Automated, Connected, Electric, and Shared (ACES) Vehicle on Design, Materials, Manufacturing, and Business Models*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2018/07/Impact-of-ACES.pdf> (Zugriff am: 29. Juni 2022).
- [180] M. Mast, „Packageplanung von autonomen Fahrzeugkonzepten im Vorder- und Hinterwagen“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [181] M. Mast, „Karosseriemodellierung autonomer Elektrofahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2022.
- [182] T. Stefaniak und D. Maiwald, „Ermittlung nutzbarer Bauräume für Energiespeicher auf Hochvoltebene in Elektrofahrzeugen mit dezentralisierten Antriebssträngen“ in *13. Magdeburger Maschinenbau-Tage 2017 - autonom - vernetzt - nachhaltig, 27. und 28. September 2017 : Tagungsband*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- [183] L. Nicoletti, S. Mirti, F. Schockenhoff, A. König und M. Lienkamp, „Derivation of Geometrical Interdependencies between the Passenger Compartment and the Traction Battery Using Dimensional Chains“, *WEVJ*, Jg. 11, Nr. 2, S. 39, 2020, doi: 10.3390/wevj11020039.
- [184] Environmental Protection Agency, „Final Regulations for Revisions: 40 CFR Part 86“. *Federal Register Vol. 61, No. 205, 1996*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-1996-10-22/pdf/96-24485.pdf>. Zugriff am: 22. April 2022.

- [185] E. K. Nam und A. D. Colvin, „An Experimental Procedure for Simulating an SC03 Emissions Test with Air Conditioner On“ in *SAE 2004 World Congress & Exhibition*, 2004, doi: 10.4271/2004-01-0594.
- [186] Continental, *Worldwide Emission Standards and Related Regulations*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.continental-automotive.com/getattachment/8f2dedad-b510-4672-a005-3156f77d1f85/EMISSIONBOOKLET_2019.pdf (Zugriff am: 22. April 2022).
- [187] Q. Zheng und P. Mueller, „An Overview of the Zoox Smart Automatic Thermal Control Design-- An Autonomous Electric Taxi“ in *2021 5th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*, Tianjin, China, 2021, S. 1–4, doi: 10.1109/CVCI54083.2021.9661241.
- [188] R. Pfeil, „Einleitung“ in *Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart, Methodischer Ansatz zur Optimierung von Energieladestrategien für elektrisch angetriebene Fahrzeuge*, R. Pfeil, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 1–7, doi: 10.1007/978-3-658-25863-4_1.
- [189] F. Ben Sethom, „Parametric Simulation of an HVAC System of an autonomous vehicle“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [190] ENGINEERING CENTER STEYR GmbH & Co KG, *KULIsoftware*. [Online]. Verfügbar unter: <https://kuli.magna.com/> (Zugriff am: 20. September 2022).
- [191] S. Mayer, „Modellbildung der Klimatisierung von Elektrofahrzeugen“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [192] A. König und S. Mayer, *HVAC Consumption Calculator*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/HVAC-Consumption-Calculator> (Zugriff am: 28. August 2022).
- [193] M. Felgenhauer, L. Nicoletti, F. Schockenhoff, C. Angerer und M. Lienkamp, „Empiric Weight Model for the Early Phase of Vehicle Architecture Design“ in *14. International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2019.
- [194] A. Romano, „Data-based Analysis for Parametric Weight Estimation of new BEV Concepts“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [195] L. Nicoletti, A. Romano, A. König, P. Köhler, M. Heinrich und M. Lienkamp, „An Estimation of the Lightweight Potential of Battery Electric Vehicles“, *Energies*, Jg. 14, Nr. 15, S. 4655, 2021, doi: 10.3390/en14154655.
- [196] A. König, L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw und M. Lienkamp, „An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles“, *WEVJ*, Jg. 12, Nr. 1, S. 1–29, 2021, doi: 10.3390/wevj12010021.
- [197] F. Jahncke, „Technische und wirtschaftliche Entwicklung der Komponenten von autonomen Fahrzeugen“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [198] D. Döndü Akgül, „Development of a Tool for the Cost Estimation of Autonomous Vehicles“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.

- [199] G. Hebermehl und U. Baumann, *Mercedes mit Level-3-Zulassung: Drive Pilot kostet wenigstens 5.950 Euro*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/mercedes-autonom-level-3-drive-pilot-haftung-unfall/> (Zugriff am: 22. Oktober 2022).
- [200] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, *Autokatalog: VW ID.3 Pure Performance (45 kWh) City (01/21 - 05/21)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/id3/1generation/319027/#technische-daten> (Zugriff am: 28. Juni 2022).
- [201] J. Miller, *Electric car costs to remain higher than traditional engines: Threat to carmakers' profit margins as industry shifts from petrol and diesel vehicles*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ft.com/content/a7e58ce7-4fab-424a-b1fa-f833ce948cb7> (Zugriff am: 27. Juni 2022).
- [202] G. H. Ruffo, *EVs Are Still 45% More Expensive To Make Than Combustion-Engined Cars: By 2030, Oliver Wyman estimates that the difference will be around 9 percent*. [Online]. Verfügbar unter: <https://insideevs.com/news/444542/evs-45-percent-more-expensive-make-ice/> (Zugriff am: 27. Juni 2022).
- [203] WirtschaftsWoche, *Zusammensetzung des Preises eines Neuwagens in Deutschland*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/387632/umfrage/zusammensetzung-des-neuwagenpreises-in-deutschland/> (Zugriff am: 28. Juni 2022).
- [204] I. Baranschee, *Bericht: VW macht 3000 Euro Verlust pro Elektroauto – Gewinn ab 2025*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.focus.de/auto/elektroauto/vw-id-3-kostet-29-900-euro-vw-rechnet-mit-3000-euro-verlust-pro-elektroauto_id_10625817.html (Zugriff am: 28. Juni 2022).
- [205] A. Albers, M. Behrendt, S. Klingler und K. Matros, „Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess“ in *Handbuch Produktentwicklung*, U. Lindemann, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016, S. 541–569, doi: 10.3139/9783446445819.019.
- [206] J. Geiser, *Computational Engineering 2*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.
- [207] M. Corona, „Benchmarking von autonomen Fahrzeugen“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [208] Zoox, *Vehicle brochure: Introducing Zoox: Built for riders, not drivers*. [Online]. Verfügbar unter: <https://zoox.com/wp-content/uploads/zoox-vehicle-brochure.pdf> (Zugriff am: 14. April 2022).
- [209] K. Weicker, *Evolutionäre Algorithmen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [210] P. Gritzmann, *Grundlagen der Mathematischen Optimierung: Diskrete Strukturen, Komplexitätstheorie, Konvexitätstheorie, Lineare Optimierung, Simplex-Algorithmus, Dualität*. Garching: Springer Spektrum, 2013.
- [211] F. Jarre und J. Stoer, *Optimierung*. Berlin: Springer, 2004.
- [212] M. Papageorgiou, M. Leibold und M. Buss, *Optimierung: Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*, 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.

- [213] E. Wiedemann, „Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Göttingen, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5022290>
- [214] Fister, Iztok, Jr., X.-S. Yang, I. Fister, J. Brest und D. Fister, „A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization“, *Elektrotehniški vestnik*, Jg. 80, Nr. 3, 2013, doi: 10.48550/arXiv.1307.4186.
- [215] J. Wang und Z. Yin, „C-NSGA-II-MOPSO: An Effective Multi-objective Optimizer for Engineering Design Problems“ in *Global Design to Gain a Competitive Edge*, X.-T. Yan, W. J. Ion und B. Eynard, Hg., London: Springer London, 2008, S. 519–528, doi: 10.1007/978-1-84800-239-5_51.
- [216] C. Angerer, „Antriebskonzept-Optimierung für batterieelektrische Allradfahrzeuge“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019.
- [217] F. Liemawan Adji, „Metaoptimierung von NSGA-II und MOPSO für Fahrzeugkonzeptoptimierung von autonomen elektrischen Fahrzeugen“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [218] S. Lin, *NGPM -- A NSGA-II Program in Matlab v1.4*. [Online]. Verfügbar unter: (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31166-ngpm-a-nsga-ii-program-in-matlab-v1-4>) (Zugriff am: 13. Juli 2022).
- [219] C. A. Coello Coello, „Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art“, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Jg. 191, 11-12, S. 1245–1287, 2002, doi: 10.1016/S0045-7825(01)00323-1.
- [220] R. Le Riche und R. T. Haftka, „Optimization of laminate stacking sequence for buckling load maximization by genetic algorithm“, *AIAA Journal*, Jg. 31, Nr. 5, S. 951–956, 1993, doi: 10.2514/3.11710.
- [221] M. Pavone, „Autonomous Mobility-on-Demand Systems for Future Urban Mobility“ in *Autonomes Fahren*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 399–416, doi: 10.1007/978-3-662-45854-9_19.
- [222] M. Kipp, I. Bubb, J. Schwiebacher, F. Schockenhoff, A. Koenig und K. Bengler, „Requirements for an Autonomous Taxi and a Resulting Interior Concept“ in *Communications in Computer and Information Science, HCI International 2020 - Posters*, C. Stephanidis und M. Antona, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 374–381, doi: 10.1007/978-3-030-50732-9_50.
- [223] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, *Autokatalog: VW ID.3 Pro Performance (58 kWh) 1st (09/20 - 11/20)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/id3/1generation/299585/#technische-daten> (Zugriff am: 12. Juli 2022).
- [224] Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles, „Proposal for the 01 series of amendments to UN Regulation No. 157 (Automated Lane Keeping Systems)“ in *World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations*, Geneva, 21. - 24. Juni 2022.

- [225] M. Schönfeld, *1er, Leon und Golf im Dreizylinder-Clinch: BMW 1er/Seat Leon/VW Golf: Vergleichstest*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.autozeitung.de/bmw-1er-seat-leon-vw-golf-vergleichstest-200240.html> (Zugriff am: 14. Juni 2022).
- [226] J. Liu, S. Jones und E. K. Adanu, „Challenging human driver taxis with shared autonomous vehicles: a case study of Chicago“, *Transportation Letters*, Jg. 12, Nr. 10, S. 701–705, 2020, doi: 10.1080/19427867.2019.1694202.
- [227] K. Bengler, K. Dietmayer, L. Eckstein, C. Stiller und H. Winner, „Fahrerassistenzsysteme und Automatisiertes Fahren“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, S. Pischinger und U. Seiffert, Hg., 9 Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021, S. 1009–1072.
- [228] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, *Autokatalog: Tesla Model S 75D (06/16 - 01/19)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/markenmodelle/tesla/model-s/1generation-facelift/257044/#technische-daten> (Zugriff am: 18. Juli 2022).
- [229] L. Mardorf und P. Menger, *PKW-Klimaanlage mit Wärmepumpenmodus für Elektrofahrzeuge. Vergleich der Kältemittel R1234yf und R134a*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/343827315_PKW-Klimaanlage_mit_Warmepumpenmodus_fur_Elektrofahrzeuge_Vergleich_der_Kaltemittel_R1234yf_und_R134a (Zugriff am: 20. Juli 2022).
- [230] J. Reichelt, K. Strasser, M. Braun und M. Reng, „Der neue effiziente Kältemittelkreislauf im Audi A5“, *KI Kälte - Luft - Klimatechnik*, S. 28–33, Sep. 2007. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ki-portal.de/wp-content/uploads/featured_image/28_33_wissen_strasser.pdf
- [231] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, *Autokatalog: smart fortwo coupé EQ (ab 01/20)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/markenmodelle/smart/fortwo/453-facelift/308857/#technische-daten> (Zugriff am: 12. Juli 2022).
- [232] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, *Autokatalog: smart forfour EQ (01/20 - 08/21)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/markenmodelle/smart/forfour/453-facelift/308865/#technische-daten> (Zugriff am: 12. Juli 2022).
- [233] EnBW Energie Baden-Württemberg, *Einfach, transparent und zuverlässig: Wir laden überall zu einheitlichen Preisen.: Standardtarif*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.enbw.com/elektromobilitaet> (Zugriff am: 30. Juni 2022).
- [234] J. Hofhaus, Hg., *PKW-Klimatisierung VI: Aktuelle Entwicklungen, Konzepte zur Reduzierung des Mehrverbrauchs, Klimatisierung von Hybridfahrzeugen ; [Tagungsband der sechsten Veranstaltung "PKW-Klimatisierung"*. Renningen: expert-Verl., 2010.
- [235] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, *Autokatalog: Audi e-tron 55 advanced quattro (ab 11/19)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/markenmodelle/audi/e-tron/ge/309080/#technische-daten> (Zugriff am: 28. Juni 2022).
- [236] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, *Autokatalog: Jaguar I-Pace EV400 First Edition AWD (10/18 - 12/18)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/markenmodelle/jaguar/i-pace/x590/288012/#technische-daten> (Zugriff am: 28. Juni 2022).

[237] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club, *Autokatalog: Tesla Model 3 Standard Range Plus (11/19 - 11/20)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/tesla/model-3/1generation/308033/#technische-daten> (Zugriff am: 28. Juni 2022).

[238] Tesla Fahrer und Freunde, *Model 3/ Model Y - Batteriewiki/Akkuwiki*. [Online]. Verfügbar unter: <https://tff-forum.de/t/wiki-model-3-model-y-batteriewiki-akkuwiki/107641> (Zugriff am: 28. Juni 2022).

Vorveröffentlichungsliste

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden Veröffentlichungen, Software und Studienarbeiten, in denen Teilaspekte dieser Arbeit vorgestellt wurden.

Zeitschriften; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

- [146] A. König, S. Mayer, L. Nicoletti, S. Tumphart und M. Lienkamp, „The Impact of HVAC on the Development of Autonomous and Electric Vehicle Concepts“, *Energies*, Jg. 15, Nr. 2, S. 441, 2022, doi: 10.3390/en15020441.
- [162] N. Wassiliadis; M. Steinsträter, M. Schreiber, P. Rosner, L. Nicoletti, F. Schmid, M. Ank, O. Teichert, L. Wildfeuer, J. Schneider, A. Koch, A. König, A. Glatz, J. Gandlgruber, T. Kröger, X. Lin, M. Lienkamp, “Quantifying the state of the art of electric powertrains in battery electric vehicles: Range, efficiency, and lifetime from component to system level of the Volkswagen ID.3,” *eTransportation*, Bd. 12, S. 100167, 2022
- [172] L. Nicoletti, A. Romano, A. König, F. Schockenhoff und M. Lienkamp, „Parametric Modeling of Mass and Volume Effects for Battery Electric Vehicles, with Focus on the Wheel Components“, *WEVJ*, Jg. 11, Nr. 4, S. 63, 2020, doi: 10.3390/wevj11040063.
- [183] L. Nicoletti, S. Mirti, F. Schockenhoff, A. König und M. Lienkamp, „Derivation of Geometrical Interdependencies between the Passenger Compartment and the Traction Battery Using Dimensional Chains“, *WEVJ*, Jg. 11, Nr. 2, S. 39, 2020, doi: 10.3390/wevj11020039.
- [195] L. Nicoletti, A. Romano, A. König, P. Köhler, M. Heinrich und M. Lienkamp, „An Estimation of the Lightweight Potential of Battery Electric Vehicles“, *Energies*, Jg. 14, Nr. 15, S. 4655, 2021, doi: 10.3390/en14154655.
- [196] A. König, L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw und M. Lienkamp, „An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles“, *WEVJ*, Jg. 12, Nr. 1, S. 1–29, 2021, doi: 10.3390/wevj12010021.

Konferenzen, Magazine, etc.; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

- [67] A. König, D. Telschow, L. Nicoletti und M. Lienkamp, „Package Planning of Autonomous Vehicle Concepts“, *Proc. Des. Soc.*, Jg. 1, S. 2369–2378, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.498.
- [101] A. König, F. Schockenhoff, A. Koch und M. Lienkamp, „Concept Design Optimization of Autonomous and Driverless Vehicles“ in *8th International Conference on Power Science and Engineering*, Dublin, 2019, doi: 10.1109/ICPSE49633.2019.9041175.

- [107] F. Schockenhoff, A. König, M. Zähringer und M. Lienkamp, „USER NEED-ORIENTED CONCEPT DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS VEHICLES“, *Proc. Des. Soc.*, Jg. 1, S. 3349–3358, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.596.
- [108] F. Schockenhoff, A. König, A. Koch und M. Lienkamp, „Customer-Relevant Properties of Autonomous Vehicle Concepts“, *Procedia CIRP*, Jg. 91, S. 55–60, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.150.
- [112] L. Nicoletti, M. Bröner, B. Danquah, A. Koch, A. König, S. Krapf, A. Pathak, F. Schockenhoff, G. Sethuraman, S. Wolff und M. Lienkamp, „Review of Trends and Potentials in the Vehicle Concept Development Process“ in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 9/10/ - 9/12/, S. 1–15, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9243115.
- [114] A. König, P. Neuhaus, A. Koch, F. Schockenhoff, P. Hafemann, I. Bubb und M. Lienkamp, „Concept Development Process For Doors of Autonomous Vehicles“, *Proc. Des. Soc.*, Jg. 1, S. 701–710, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.70.
- [154] A. König, L. Nicoletti, S. Kalt, K. Moller, A. Koch und M. Lienkamp, „An Open-Source Modular Quasi-Static Longitudinal Simulation for Full Electric Vehicles“ in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 9/10/ - 9/12/, S. 1–9, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9242981.
- [173] L. Nicoletti, P. Köhler, A. König, M. Heinrich und M. Lienkamp, „Parametric Modelling of Weight and Volume Effects in Battery Electric Vehicles, with Focus on the Gearbox“, *Proc. Des. Soc.*, Jg. 1, S. 2389–2398, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.500.
- [222] M. Kipp, I. Bubb, J. Schwiebacher, F. Schockenhoff, A. König und K. Bengler, “Requirements for an Autonomous Taxi and a Resulting Interior Concept,” in *HCI International 2020 - Posters (Communications in Computer and Information Science)*, C. Stephanidis und M. Antona, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 374–381.

Patente

Zeitschriften, Konferenzen, Magazine, Berichte, Konferenzvorträge und -poster, etc.; nicht Scopus/ Web of Science gelistet

Nicht-dissertationsrelevante Veröffentlichungen; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

N. König, F. Schockenhoff, A. König und F. Diermeyer, „Method for Segmentation and Hybrid Joining of Additive Manufactured Segments in Prototyping Using the Example of Trim Parts“, *Designs*, Jg. 6, Nr. 1, S. 2, 2022, doi: 10.3390/designs6010002.

Dissertationsrelevante Open-Source Software

- [145] A. König, L. Nicoletti, D. Telschow, K. Moller, M. Mast, F. Liemawan Adji, P. Köhler, F. Fahn, D. Akquel, *Autonomous Vehicle Concept Development (AuVeCoDe): A tool for de-*

signing autonomous or conventional electric vehicles. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/AuVeCoDe> (Zugriff am: 4. Oktober 2022).

- [155] A. König, L. Nicoletti und K. Moller, *Modular Quasi Static Longitudinal Simulation for BEV*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/Modular-Quasi-Static-Longitudinal-Simulation-for-BEV> (Zugriff am: 13. Juni 2022).
- [192] A. König und S. Mayer, *HVAC Consumption Calculator*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/HVAC-Consumption-Calculator> (Zugriff am: 28. August 2022).

Betreute Studienarbeiten

- [156] K. Moller, "Antriebsstrangmodellierung zur Optimierung autonomer Elektrofahrzeuge," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [163] K. Moller, "Validierung einer MATLAB Längsdynamiksimulation für die Auslegung von Elektrofahrzeugen," Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [166] M. Sabieraj, "Anpassung der Packageplanung für autonome Fahrzeuge," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [167] D. Telschow, "Auslegung und Optimierung autonomer Fahrzeugkonzepte," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [170] F. Fahn, "Innenraummodellierung von autonomen Elektrofahrzeugen," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [180] M. Mast, "Packageplanung von autonomen Fahrzeugkonzepten im Vorder- und Hinterwagen," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [181] M. Mast, "Karosseriemodellierung autonomer Elektrofahrzeuge," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2022.
- [189] F. Ben Sethom, "Parametric Simulation of an HVAC System of an autonomous vehicle," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [191] S. Mayer, "Modellbildung der Klimatisierung von Elektrofahrzeugen," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [197] F. Jahncke, "Technische und wirtschaftliche Entwicklung der Komponenten von autonomen Fahrzeugen," Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [198] D. Döndü Akgül, "Development of a Tool for the Cost Estimation of Autonomous Vehicles," Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [207] M. Corona, "Benchmarking von autonomen Fahrzeugen," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.







- [217] F. Liemawan Adji, "Metaoptimierung von NSGA-II und MOPSO für Fahrzeugkonzeptoptimierung von autonomen elektrischen Fahrzeugen," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.

Anhang

| | | |
|----------|--|--------|
| Anhang A | Konzept- und Prototypenfahrzeuge | xxxii |
| Anhang B | Nutzereingaben für das AuVeDoDe Tool | xxxiii |
| Anhang C | Antriebsstrangtopologien | xxxvi |
| Anhang D | Maßketten im Package | xxxvii |
| Anhang E | Kostenmodellierung | xlii |
| Anhang F | Validierung Gesamtfahrzeug | xliv |
| Anhang G | Metaoptimierung des NSGA-II | xlvi |
| Anhang H | Optimierungsparameter | xlvii |
| Anhang I | Anwendungsoptimierte Fahrzeugkonzepte..... | xlviii |
| Anhang J | Generische Fahrzyklen zur Untersuchung des Nebenverbrauchs | liv |
| Anhang K | Fahrleistungen bei geteilten Fahrzeugen | lv |

Anhang A Konzept- und Prototypenfahrzeuge

Tabelle A.1 Art des Designs für verschiedene Konzept- und Prototypenfahrzeuge

| Fahrzeug | Art des Design | Foto |
|--|-------------------|---|
| Apple – Lexus RX450h [91] ¹ | Conversion Design |  |
| Aurora Driver [92] | Conversion Design |  |
| Bertrandt HARRI [1] | Purpose Design |  |
| Uber – Volvo XC90 [93] | Conversion Design |  |
| UNICARagil autoTAXI [94] | Purpose Design |  |
| VW Sedric [95] ² | Purpose Design |  |
| Waymo Driver [96] | Conversion Design |  |
| Yandex – Toyota Prius [97] | Conversion Design |  |
| Zoox [98] | Purpose Design |  |

Anhang B Nutzereingaben für das AuVeDoDe Tool

Tabelle B.1 Abschnitt mit allgemeinen Anforderungen „1. General“

| Eingangsgröße | Beispielwert | Einheit |
|---|---------------|---------|
| Längsdynamik | | |
| Fahrzyklus | WLTP | – |
| Höchstgeschwindigkeit | 150 | km/h |
| Beschleunigungszeit von 0 auf 100 km/h | 10 | s |
| Reichweite | 250 | Km |
| Gesamtfahrzeug | | |
| Bodenfreiheit | Flacher Boden | – |
| Extraload-Reifen | Ja | – |
| Freie Craschlänge vorne/hinten/seitlich | 500/400/250 | mm |
| Kofferraumvolumen | 500 | Liter |

Tabelle B.2 Abschnitt mit Einstellungen zur Klimaanlage „2. HVAC“

| Eingangsgröße | Beispielwert | Einheit |
|--|------------------|---------|
| Schalter Klimaanlageberechnung | Aktiv | – |
| Szenarienauswahl | München - Sommer | – |
| Außentemperatur | 25 | °C |
| Massestrom (nur Winter-Szenario) | 5 | kg/min |
| Umluftanteil (nur Winter-Szenario) | 50 | % |
| Zieltemperatur Innenraum (nur Winter-Szenario) | 22 | °C |

Tabelle B.3 Abschnitt mit Einstellungen zum Innenraum „3. Interior“

| Eingangsgröße | Beispielwert | Einheit |
|--|------------------|---------|
| Sitzkonfiguration | Vis-à-vis | – |
| Anzahl Sitze Vorderreihe/Hinterreihe | 2/3 | – |
| Wanddicke (Nur für Rücken-an-Rücken) | 200 | mm |
| Anzahl der Türen | 2 | – |
| Use Case | Komfortklasse | – |
| Arbeits-/Schlafpaket | Ausgewählt | – |
| H30 Optimierung | Ausgewählt | – |
| Einzelarmlehne außen (vorne/hinten) | Ausgewählt | – |
| Einzelarmlehne zwischen Sitzen (vorne/hinten) | Nicht ausgewählt | – |
| Doppel-Armlehne zwischen Sitzen (vorne/hinten) | Ausgewählt | – |
| Oberkörperlänge (vorne/hinten) | 980 | mm |
| Minimaler Rückenlehnenwinkel (vorne/hinten) | 70 | ° |
| Maximaler Rückenlehnenwinkel (vorne/hinten) | 80 | ° |
| Kopffreiheit (vorne/hinten) | 100 | mm |
| Sitztiefe (vorne/hinten) | 500 | mm |
| Sitzverstellfeld in x-Richtung (vorne/hinten) | 120 | mm |
| Sitzhöhe (vorne/hinten) | 400 | mm |
| Sitzverstellfeld in z-Richtung (vorne/hinten) | 100 | mm |
| Fußlänge (vorne/hinten) | 300 | mm |
| Zusätzlicher Fußraum (vorne/hinten) | 200 | mm |
| Breite Rückenlehne (vorne/hinten) | 530 | mm |
| Breite Einzelarmlehne (vorne/hinten) | 80 | mm |
| Breite Doppel-Armlehne (vorne/hinten) | 200 | mm |
| Abstand zwischen Sitzen (vorne/hinten) | 40 | mm |
| Abstand zwischen Sitz und Wand (vorne/hinten) | 40 | mm |
| Dicke Rückenlehne (vorne/hinten) | 150 | mm |
| Dicke Sitzfläche (vorne/hinten) | 150 | mm |
| Länge Rückenlehne (vorne/hinten) | 800 | mm |

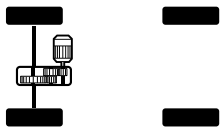
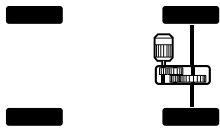
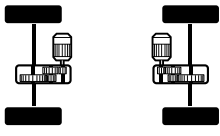
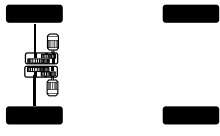
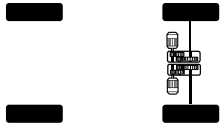
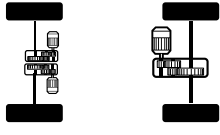
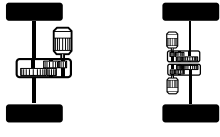
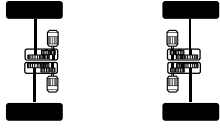
Tabelle B.4 Abschnitt mit Einstellungen zur Sonderausstattung „4. Extras“

| Eingangsgröße | Beispielwert | Einheit |
|--|---------------------|---------|
| Sensorik/Recheneinheit | | |
| Anzahl an komplexeren LiDAR Sensoren | 2 | – |
| Anzahl an einfachen LiDAR Sensoren | 0 | – |
| Anzahl an Ultraschallsensoren | 8 | – |
| Anzahl an Radarsensoren | 5 | – |
| Anzahl an Surround Kameras | 4 | – |
| Anzahl an Front-Kameras | 4 | – |
| C2x Module | Ausgewählt | – |
| 5G Modul | Ausgewählt | – |
| Recheneinheit | Ausgewählt | – |
| GPS Empfänger | Ausgewählt | – |
| GPS Korrekturservice | Nicht ausgewählt | – |
| Interieur | | |
| Anzahl an Seitenairbags | 2 | – |
| Anzahl an Innenraumdisplays | 2 | – |
| Pneumatische Türen | Ausgewählt | – |
| Sitzheizung | Ausgewählt | – |
| Elektrisch einstellbare Sitze | Ausgewählt | – |
| Panoramadach | Ausgewählt | – |
| Elektrische Fensterheber | Ausgewählt | – |
| Schiebedach | Nicht ausgewählt | – |
| Klimaanlage | Ausgewählt | – |
| Herstellung und Materialien | | |
| Voraussichtliche Montagezeit | 25 | Stunden |
| Aluminiumanteil an der Karosserie | 100 | % |
| Material Kofferraum/Motorhaube/Klappen/Kotflügel | Aluminium/.../Stahl | – |
| Ersatzreifen | | – |
| Antriebsstrang | | |
| Elektromechanische Lenkung | Ausgewählt | – |
| Steer-by-wire | Ausgewählt | – |
| Elektromechanische Bremse | Ausgewählt | – |
| On-board-Ladegerät | Ausgewählt | – |
| Zusätzliche Ausstattungen | | |
| Keyless go/... | Ausgewählt/... | – |
| Lichttechnologie | LED | – |
| Batterieeinstellungen | | |
| Kühlplatte in z-Richtung | Ausgewählt | – |

Anhang C Antriebsstrangtopologien

Die Bezeichnung einer Topologie wurde im folgenden Schema umgesetzt. „GM“ bezeichnet eine Einheit aus Getriebe und Motor, „X“ bedeutet keine Antriebseinheit. Die Vorder- und Hinterachse wird mit „_“ voneinander getrennt. Demnach bedeutet GM_X beispielsweise einen Vorderachs-antrieb mit einer Getriebe-Motor-Einheit. Zwei Motoren-Getriebe-Einheiten pro Achse werden mit „2G2M“ gekennzeichnet.

Tabelle C.1 Umgesetzte Antriebsstrangtopologien im AuVeCoDe-Tool

| Bezeichnung | Anzahl der Maschinen | Schematische Darstellung ← Fahrtrichtung | Beispielfahrzeug |
|-------------|----------------------|---|---------------------------|
| GM_X | 1 |  | Renault Zoe |
| X_GM | 1 |  | VW ID.3 |
| GM_GM | 2 |  | Tesla Model 3 Performance |
| 2G2M_X | 2 |  | – |
| X_2G2M | 2 |  | – |
| 2G2M_GM | 3 |  | – |
| GM_2G2M | 3 |  | Tesla Model S Plaid |
| 2G2M_2G2M | 4 |  | Rimac Nevera |

Anhang D Maßketten im Package

D.1 Maßketten der Innenraumgrenzfläche

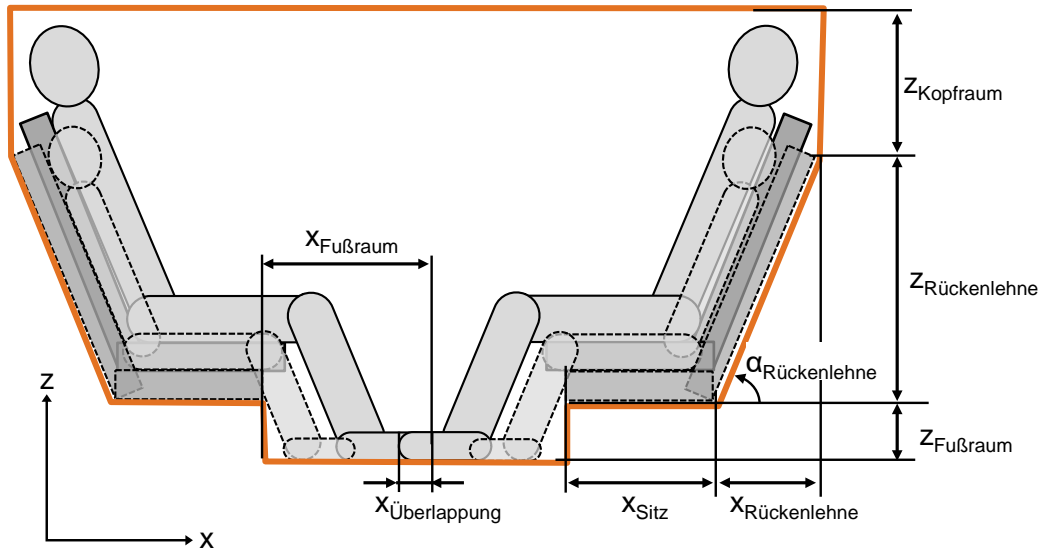


Abbildung D.1: Maßkette der Innenraumgrenzfläche (orange) der vis-à-vis Sitzkonfiguration. Alle Maße außer $x_{\text{Überlappung}}$ sind für jede Reihe separat einstellbar.

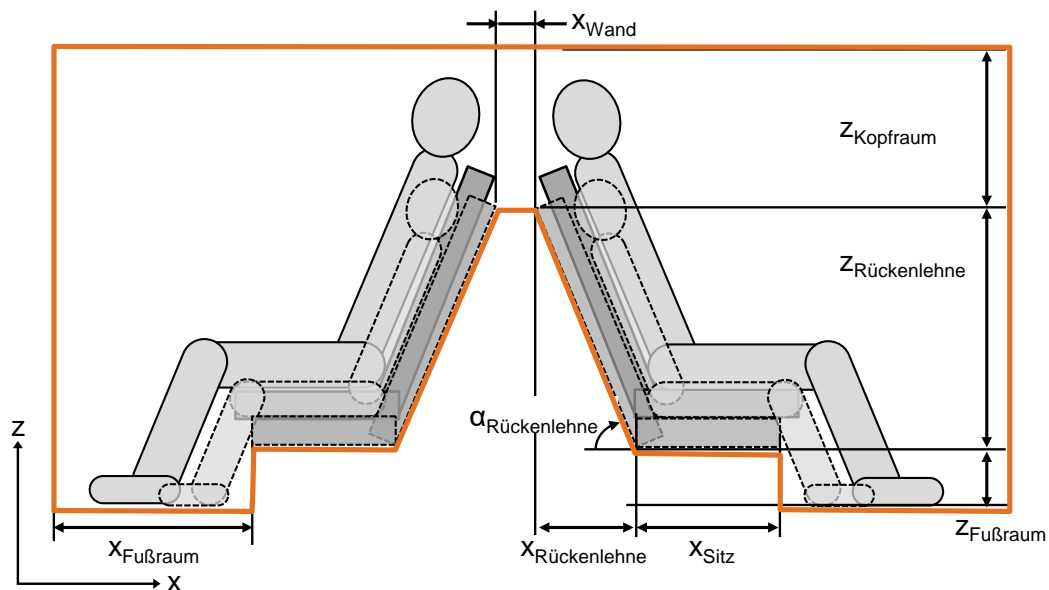


Abbildung D.2: Maßkette der Innenraumgrenzfläche (orange) der Rücken-an-Rücken Sitzkonfiguration. Alle Maße außer x_{Wand} sind für jede Reihe separat einstellbar.

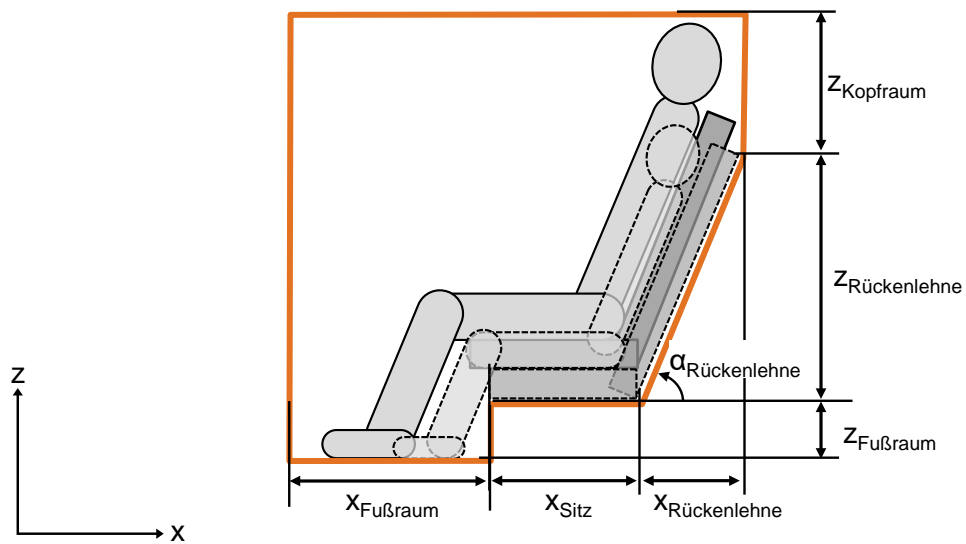


Abbildung D.3: Maßkette der Innenraumgrenzfläche (orange) der einreihigen Sitzkonfiguration

D.2 Maßketten der Bauräume für den Energiespeicher

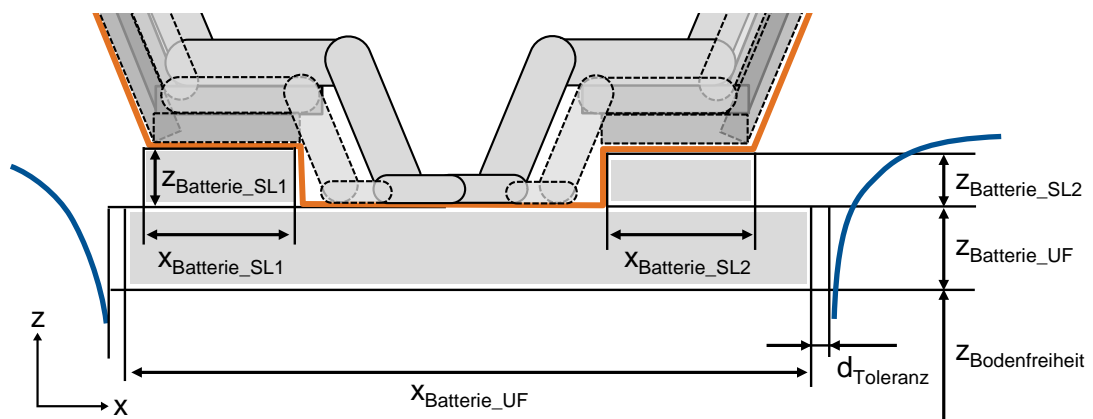


Abbildung D.4: Maßketten zur Berechnung der verfügbaren Bauräume Second Level 1 und 2 (SL1/2) und Underfloor (UF) für den Energiespeicher bei der vis-à-vis Sitzkonfiguration

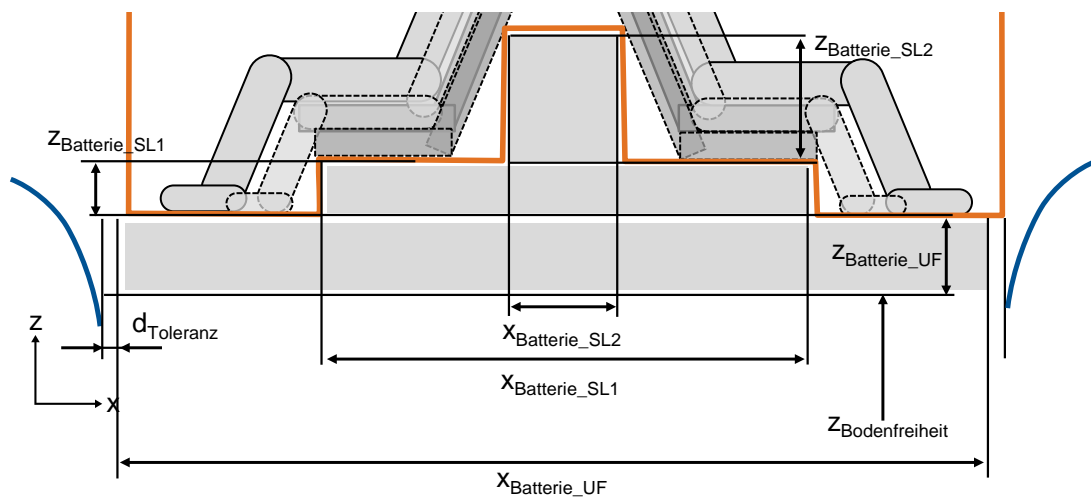


Abbildung D.5: Maßketten zur Berechnung der verfügbaren Bauräume Second Level 1 und 2 (SL1/2) und Underfloor (UF) für den Energiespeicher bei der Rücken-an-Rücken Sitzkonfiguration.

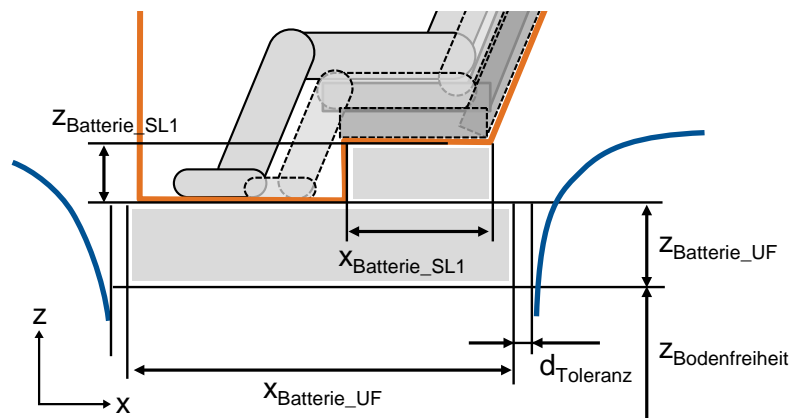


Abbildung D.6: Maßketten zur Berechnung der verfügbaren Bauräume Second Level 1 (SL1) und Underfloor (UF) für den Energiespeicher bei der einreihigen Sitzkonfiguration

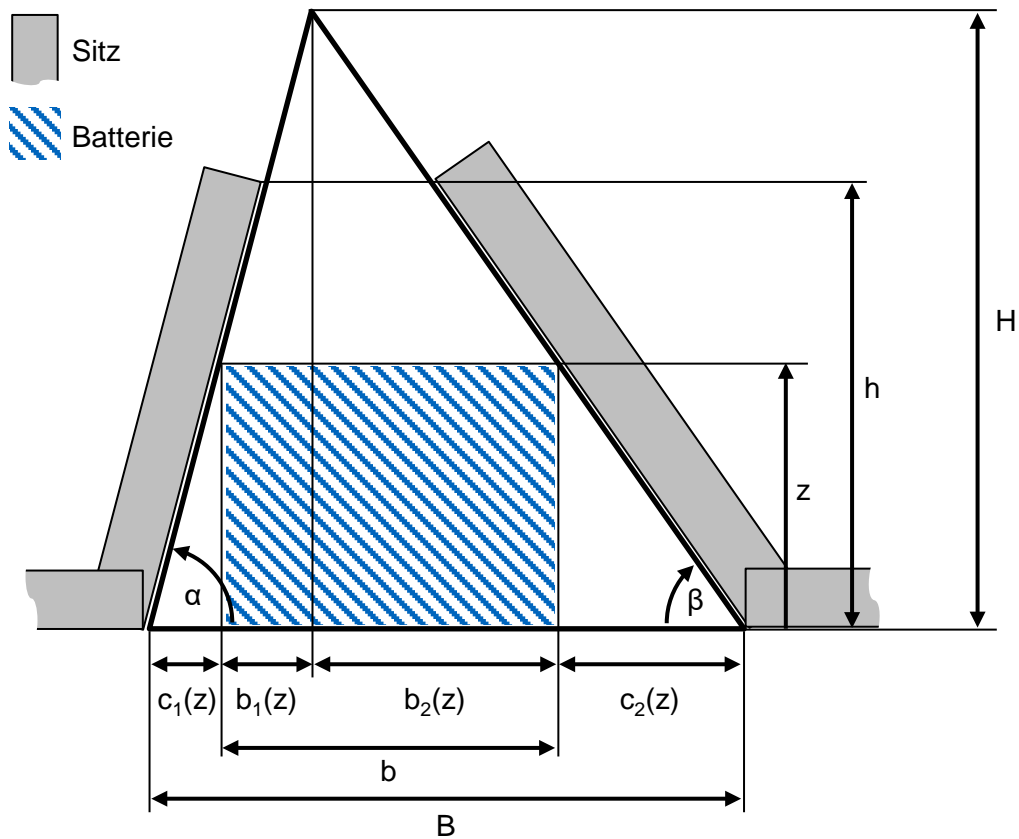


Abbildung D.7: Berechnung der Maße der zweiten Untersitzbatterie für die Rücken-an-Rücken Sitzkonfiguration

Für den oberen Teil der Batterie bei der Rücken-an-Rücken Anordnung wurde durch die übliche, rechteckige Form der Batteriemodule, ein rechteckiger Bauraum ermittelt, sodass gilt

$$\text{Maximiere } A(z) = b(z) \cdot z \tag{6.1}$$

Der maximale Wert von z ist dabei die Höhe H , die sich mit gegebener Breite B und den Lehnwinkeln α und β wie folgt berechnet

$$H = \frac{B}{\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta}} \tag{6.2}$$

Wird nun die Fläche A aus Gl. (6.1) berechnet, so ergibt sich

$$A(z) = b(z) \cdot z = \left(B - (c_1(z) + c_2(z)) \right) \cdot z = zB - z^2 \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right) \tag{6.3}$$

Das Maximum oder die Maxima befinden sich dann bei

$$A'(z) = B - 2z\gamma \stackrel{!}{=} 0 \rightarrow z = \frac{B}{2\gamma} \quad \text{mit } \gamma = \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta} \right) \tag{6.4}$$

Folglich muss zuerst mit Gl. (6.4) die Höhe z ermittelt werden und die maximale Fläche A kann im Anschluss mit Gl. (6.3) berechnet werden. Der Fall, dass z höher liegt als h muss ebenfalls überprüft werden. Damit ergibt sich folgende Fallunterscheidung:

$$\max(A(z)) = \begin{cases} \frac{B^2}{4\gamma} & \text{für } z < h \\ hB - h^2\gamma & \text{für } z \geq h \end{cases} \quad (6.5)$$

Anhang E Kostenmodellierung

Tabelle E.1 Angenommene Kosten im AuVeCoDe-Tool zusammengefasst in [198] unter Verwendung von [62, 196, 197] Teil (1/3)

| Baugruppe | Bezeichnung | Einheit | 2020 | 2025 | 2030 |
|---------------------|-----------------------------------|------------|------|------|------|
| Antriebsstrang | Asynchronmaschine konstanter Wert | € | 189 | 186 | 183 |
| | Asynchronmaschine variabler Wert | €/kW | 5 | 5 | 4 |
| | Synchronmaschine konstanter Wert | € | 324 | 319 | 315 |
| | Synchronmaschine variabler Wert | €/kW | 6 | 6 | 6 |
| | Inverter | €/kW | 3 | 3 | 3 |
| | Batteriepack | €/kWh | 206 | 162 | 144 |
| | Aufschlag Reluktanzmotor | €/kW | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| | Antriebswelle Stahl | €/kg | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| | Differential Stahl | €/kg | 3,2 | 3,2 | 3,2 |
| | Differential Aluminium | €/kg | 6,2 | 6,2 | 6,2 |
| | Getriebe Stahl | €/kg | 3,2 | 3,2 | 3,2 |
| | Getriebe Aluminium | €/kg | 3,7 | 3,7 | 3,7 |
| Fahrwerk | Vorder-/Hinterachse | €/kg | 7,1 | 7,1 | 7,1 |
| | Lenksystem | €/Fahrzeug | 212 | 212 | 212 |
| | Steer-by-wire | €/Fahrzeug | 500 | 500 | 500 |
| | Bremssystem | €/Fahrzeug | 263 | 263 | 263 |
| | Dämpfer | €/Fahrzeug | 169 | 169 | 169 |
| | Felge Aluminium | €/kg | 6,2 | 6,2 | 6,2 |
| | Felge Stahl | €/kg | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| | Reifen | €/kg | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Elektrik/Elektronik | Scheinwerfer | €/Stück | 132 | 132 | 132 |
| | Rücklicht | €/Stück | 79 | 79 | 79 |
| | Niedervoltbatterie | €/Stück | 53 | 53 | 53 |
| | Onboard-Ladegerät | €/Fahrzeug | 531 | 531 | 531 |
| | Kabelbaum | €/Fahrzeug | 208 | 208 | 208 |
| Interieur | Mechanischer Sitz | €/Stück | 90 | 90 | 90 |
| | Elektr. Sitz | €/Stück | 142 | 142 | 142 |
| | Rücksitz | €/Stück | 113 | 113 | 113 |
| | Sitzheizung | €/Stück | 10 | 10 | 10 |
| | Standardset Airbag | €/Stück | 102 | 102 | 102 |
| | Seitenairbag | €/Stück | 47 | 47 | 47 |
| | Sicherheitsgurt vorne | €/Stück | 26 | 26 | 26 |
| | Sicherheitsgurt hinten | €/Stück | 19 | 19 | 19 |

Tabelle E.2 Angenommene Kosten im AuVeCoDe-Tool zusammengefasst in [198] unter Verwendung von [62, 196, 197] Teil (2/3)

| Baugruppe | Bezeichnung | Einheit | 2020 | 2025 | 2030 |
|---------------------------------|---------------------------------|------------|------|------|------|
| Interieur | Displayeinheit | €/Stück | 174 | 174 | 174 |
| | Klimakompressor | €/Fahrzeug | 61 | 61 | 61 |
| | Isolierung | €/kg | 3,5 | 3,5 | 3,5 |
| Exterieur/Klappem | Pneumatische Türen | €/Stück | 981 | 981 | 981 |
| | Scheiben | €/kg | 2,7 | 2,7 | 2,7 |
| | Fensterheber | €/Stück | 7,4 | 7,4 | 7,4 |
| | Scheibenwischereinheit | €/Stück | 30 | 30 | 30 |
| | Investitionskosten | €/Fahrzeug | 51 | 51 | 51 |
| | Energie- und Lohnkosten Klappen | €/Fahrzeug | 37 | 37 | 37 |
| | Aluminium | €/kg | 3,7 | 3,7 | 3,7 |
| | CFK | €/kg | 14 | 14 | 14 |
| | Stahl | €/kg | 2,7 | 2,7 | 2,7 |
| | Kunststoff -ABS | €/kg | 4,5 | 4,5 | 4,5 |
| | Kunststoff -PP | €/kg | 1,8 | 1,8 | 1,8 |
| | Stahl Schrottwert | €/kg | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Aluminium Schrottwert | €/kg | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| | Gemischter Schrottwert | €/kg | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| | Karosserie | Aluminium | €/kg | 3,7 | 3,7 |
| CFK | | €/kg | 14 | 14 | 14 |
| Stahl | | €/kg | 2,7 | 2,7 | 2,7 |
| Stahl Schrottwert | | €/kg | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Aluminium Schrottwert | | €/kg | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Gemischter Schrottwert | | €/kg | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Lohnkosten pro Fahrzeug | | €/Fahrzeug | 141 | 141 | 141 |
| Variable Lohnkosten | | €/kg | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Energiekosten | | €/Fahrzeug | 26 | 26 | 26 |
| Investitionskosten pro Fahrzeug | | €/Fahrzeug | 145 | 145 | 145 |
| Variable Investitionskosten | €/kg | 0,5 | 0,5 | 0,5 | |
| Sensorik/Recheneinheit | Radarsensor | €/Stück | 82 | 82 | 82 |
| | Ultraschallsensor | €/Stück | 5,8 | 5,8 | 5,8 |
| | MEMS-LiDAR | €/Stück | 106 | 106 | 106 |
| | Mechanische LiDAR | €/Stück | 3055 | 1299 | 457 |
| | Surround Kamera | €/Stück | 30 | 28 | 27 |
| | Frontkamera | €/Stück | 38 | 38 | 35 |
| | Zentrale Recheneinheit | €/Stück | 729 | 507 | 386 |
| | RTK-GPS-Empfangseinheit | €/Stück | 669 | 669 | 669 |
| | GPS-Korrekturservice | €/Jahr | 557 | 557 | 557 |
| | 5G Empfangseinheit | €/Stück | 103 | 103 | 103 |

Tabelle E.3 Angenommene Kosten im AuVeCoDe-Tool zusammengefasst in [198] unter Verwendung von [62, 196, 197] Teil (3/3)

| Bezeichnung | Einheit | 2020 | 2025 | 2030 |
|-------------------|----------|------|------|------|
| C2X Kommunikation | €/Stück | 167 | 128 | 101 |
| ESP | €/Stück | 159 | 159 | 159 |
| Montage | €/Stunde | 55 | 55 | 55 |

Anhang F Validierung Gesamtfahrzeug

Tabelle F.1 Eingangsparmeter für die Validierung der Gesamtfahrzeugsimulation

| Parameter | Audi e-tron 55 quattro [235] | Jaguar I-Pace EV400 [236] | Tesla Model 3 SR RWD [237] | VW ID.3 Pro 58 kWh [223] |
|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Maße und Massen | | | | |
| Länge/Breite/Höhe in mm | 4901/1935/1629 | 4682/2011/1558 | 4694/1853/1446 | 4261/1809/1550 ¹ |
| Radstand in mm | 2928 | 2990 | 2875 | 2771 |
| Kofferraum- volumen in Liter | 1020 ¹ | 900 ¹ | 606 ¹ | 600 ¹ |
| Schreibenwinkel vorne/hinten in ° | 61 ¹ /53 ¹ | 63 ¹ /67 ¹ | 62 ¹ /49 ¹ | 62 ¹ /63 ¹ |
| Leermasse in kg | 2520 | 2133 | 1611 | 1812 ³ |
| Reifendurch- messer in mm | 772 | 763 | 702 | 694 |
| Überhang vorne/ hinten in mm | 929 ² /1048 ² | 855 ² /848 ² | 839 ² /976 ² | 735 ² /760 ² |
| Antrieb und Fahrleistung | | | | |
| Motorart | 2x ASM | 2x PSM | 1x PSM | 1x PSM |
| Maximalleistung in kW | 300 | 294 | 239 | 150 |
| Maximalmoment in Nm | 664 | 696 | 420 | 310 |
| Beschleunigung 0-100 km/h in s | 5,7 | 4,8 | 5,6 | 7,3 |
| Höchst- geschwindigkeit in km/h | 200 | 200 | 225 | 160 |
| Verbrauch in kWh/100km | 19,68 ² | 18,02 ² | 12,86 ² | 12,65 ² |
| Reichweite in km | 405 | 480 | 409 | 427 ³ |
| Batteriekapazität netto in kWh | 86 | 84,7 | 52,6 ⁴ | 58 |
| Batteriekapazität brutto in kWh | 95 | 90,2 | - | 62 |
| Zelltyp | Pouch | Pouch | Zylindrisch | Pouch |

¹ (Korrigiert mit) Messungen am Fahrzeug² Berechnung aus gegebenen Daten³ Korrigiert mit Wert aus Certificate of Conformity (CoC) des Fahrzeugs⁴ Abweichender Werte je nach Zelltyp. Hier: Panasonic 1 [238]

Anhang G Metaoptimierung des NSGA-II

Tabelle G.1 Ein Ausschnitt der besten und schlechtesten Parametersets für den NSGA-II während der Metaoptimierung

| Mutationsparameter | | | Kreuzungsparameter | | Summe der Abweichungen vom Optimum ¹ |
|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---|
| Scale | Shrink | Fraction | Ratio | Fraction | |
| 0,1 ² | 0,2 ² | 0,2 ² | 2 ² | 0,2 ² | 0,68 % - 1,51 % |
| 0,1 | 0,2 | 0,2 | 2 | 0,4 | 1,05 % - 1,24 % |
| 0,1 | 0,2 | 0,5 | 2 | 0,2 | 1,07 % - 1,34 % |
| 0,1 | 0,2 | 0,5 | 2 | 0,4 | 1,48 % - 1,72 % |
| 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,2 | 0,4 | 1,31 % - 2,81 % |
| 0,1 | 0,5 | 0,074 ³ | 1,2 | 0,2 | 1,40 % - 1,73 % |
| 0,1 | 0,2 | 0,2 | 1,2 | 0,4 | 1,58 % - 2,15 % |
| 0,1 | 0,5 | 0,074 ³ | 2 | 0,074 ³ | 3,02 % |

¹ Optimum ist hier das bestmöglich gefundene Fahrzeug

² Gewähltes Parameterset in dieser Arbeit

³ Song [218] schlägt als Standardwert $2/n$ vor, wobei n die Anzahl der Optimierungsparametern ist. Zum Zeitpunkt der Untersuchung war $n=27$

Anhang H Optimierungsparameter

Tabelle H.1 Optimierungsparameter

| Variablentyp | Beschreibung |
|------------------|--|
| Motor | |
| Integer | Antriebsstrangtopologie (Allrad-, Heck-, oder Frontantrieb mit 1 - 4 Maschinen) |
| Integer | Maschinentyp (PSM/ASM) |
| Float | Getriebewinkel vorne/hinten (nur bei Stirnradgetriebe) in ° |
| Float | Drehmomentverhältnis (Anteil an der Vorderachse zu Gesamtdrehmoment) in % |
| Getriebe | |
| Integer | Getriebeoptimierung (nur Stirnradgetriebe) - Optimierung auf min. Höhe oder Breite |
| Integer | Getriebetyp vorne/hinten (Parallel, Koaxial (Planeten oder Stirnradgetriebe)) |
| Float | Getriebeübersetzung vorne/hinten |
| Achse | |
| Integer | Achstyp (Verbundlenker-, Trapezlenker-, Schwertlenker-, Fünflenkerachse) |
| Float | Achswinkel (in xy- und yz-Ebene) in ° |
| Batterie | |
| Integer | Batteriezelltyp (Prismatisch, Zylindrisch, Pouch) |
| Integer | Batteriebreite – Batteriebreite zwischen Radhäuser ja/nein |
| Exterieur | |
| Float | Scheibenwinkel vorne/hinten |
| Integer | Kofferraumtyp vorne/hinten (Integriert oder getrennt) |
| Float | Abstand zwischen Radhaus und Querträger vorne/hinten in mm |
| Float | Abstand zwischen Innenraum und Radhaus vorne/hinten in mm |
| Innenraum | |
| Float | H30 Maß vorne/hinten in mm |
| Float | Innenraumhöhe über Boden in mm |
| Float | Kofferraumverhältnis (Vorderer Kofferraum zu Gesamtkofferraum) in % |
| Sonstiges | |
| Float | Raddurchmesser in mm |
| Float | Lenkverteilung (Lenkwinkel Vorderachse zu Gesamtlenkwinkel) in % |

Anhang I Anwendungsoptimierte Fahrzeugkonzepte

Tabelle I.1 Optimierungparameter für die Optimierung des konventionellen Fahrzeugs (Teil 1/2)

| Optimierungsparameter | Minimaler Wert | Maximaler Wert | Einheit |
|---|--------------------------------|----------------|---------|
| Motor | | | |
| Topologie des Antriebsstrangs ¹ | Alle Varianten aus Tabelle C.1 | | – |
| Maschinentyp ¹ | PSM | | – |
| Getriebewinkel vorne (nur Stirnradgetriebe) | 0 | 180 | ° |
| Getriebewinkel hinten (nur Stirnradgetriebe) | 0 | 180 | ° |
| Drehmomentverteilung (Anteil an der Vorderachse) | 5 | 95 | % |
| Getriebe | | | |
| Getriebeoptimierung ¹ (nur Stirnradgetriebe) | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Getriebetyp vorne ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Getriebetyp hinten ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Getriebeübersetzung vorne | 6 | 12 | – |
| Getriebeübersetzung hinten | 6 | 12 | – |
| Achse | | | |
| (Hinter-) Achsentyp ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Achswinkel in xy-Ebene | 0 | 13 | ° |
| Achswinkel in xy-Ebene | 0 | 13 | ° |
| Batterie | | | |
| Batteriezelltyp ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Batteriebreite ¹ (Zwischen Radhäuser ja/nein) | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |

¹ Diskrete Variable: Keine minimalen und maximalen Werte verfügbar

Tabelle I.2 Optimierungparameter für die Optimierung des konventionellen Fahrzeugs (Teil 2/2)

| Optimierungsparameter | Minimaler Wert | Maximaler Wert | Einheit |
|---|--|-------------------------------------|---------|
| Exterieur | | | |
| Scheibenwinkel vorne | 63 ² / 20 ³ | 63 ² / 70 ³ | ° |
| Scheibenwinkel hinten | 48 ² / 20 ³ | 48 ² / 70 ³ | ° |
| Kofferraumtyp vorne ¹ | hooded ² / Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Kofferraumtyp hinten ¹ | integrated ² / Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Abstand Radhaus-Querträger vorne | 169 ² / 0 ³ | 169 ² / 700 ³ | mm |
| Abstand Radhaus-Querträger hinten | 248 ² / 0 ³ | 248 ² / 700 ³ | mm |
| Abstand Innenraum-Radhaus vorne | 45 ² / 0 ³ | 45 ² / 500 ³ | mm |
| Abstand Innenraum-Radhaus hinten | 0 ² 3 | 0 ² / 500 ³ | mm |
| Interieur | | | |
| H30 Maß vorne | n.a. ⁴ | n.a. ⁴ | mm |
| H30 Maß hinten | n.a. ⁴ | n.a. ⁴ | mm |
| Innenraumhöhe über Boden | 370 ² 3 | 370 ² 3 | mm |
| Verhältnis Kofferraum (Anteil Vorne/Gesamt) | 0 ² 3 | 0 ² / 100 ³ | % |
| Sonstiges | | | |
| Raddurchmesser | 701 ² / 600 ³ | 701 ² / 800 ³ | mm |
| Lenkverteilung (Anteil Vorne/Gesamt) | 100 ² 3 | 100 ² 3 | % |

¹ Diskrete Variable: Keine minimalen und maximalen Werte verfügbar

² Keine Optimierung von Exterieur

³ Optimierung von Exterieur

⁴ H30-Optimierung deaktiviert

Tabelle I.3 Optimierungsparameter für die Optimierung des Taxis (Teil 1/2)

| Optimierungsparameter | Minimaler Wert | Maximaler Wert | Einheit |
|---|--------------------------------|----------------|---------|
| Motor | | | |
| Topologie des Antriebsstrangs ¹ | Alle Varianten aus Tabelle C.1 | | – |
| Maschinentyp ¹ | PSM | | – |
| Getriebewinkel vorne (nur Stirnradgetriebe) | 0 | 180 | ° |
| Getriebewinkel hinten (nur Stirnradgetriebe) | 0 | 180 | ° |
| Drehmomentverteilung (Anteil an der Vorderachse) | 5 | 95 | % |
| Getriebe | | | |
| Getriebeoptimierung ¹ (nur Stirnradgetriebe) | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Getriebetyp vorne ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Getriebetyp hinten ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Getriebeübersetzung vorne | 6 | 10 | – |
| Getriebeübersetzung hinten | 6 | 10 | – |
| Achse | | | |
| (Hinter-) Achsentyp ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Achswinkel in xy-Ebene | 0 | 13 | ° |
| Achswinkel in xy-Ebene | 0 | 13 | ° |
| Batterie | | | |
| Batteriezelltyp ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Batteriebreite ¹ (Zwischen Radhäuser ja/nein) | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |

¹Diskrete Variable: Keine minimalen und maximalen Werte verfügbar

Tabelle I.4 Optimierungsparameter für die Optimierung des Taxis (Teil 2/2)

| Optimierungsparameter | Minimaler Wert | Maximaler Wert | Einheit |
|---|--------------------------------|----------------|---------|
| Exterieur | | | |
| Scheibenwinkel vorne | 20 | 80 | ° |
| Scheibenwinkel hinten | 20 | 80 | ° |
| Kofferraumtyp vorne ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Kofferraumtyp hinten ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Abstand Radhaus-Querträger vorne | 0 | 800 | mm |
| Abstand Radhaus-Querträger hinten | 0 | 800 | mm |
| Abstand Innenraum-Radhaus vorne | 0 | 500 | mm |
| Abstand Innenraum-Radhaus hinten | 0 | 500 | mm |
| Interieur | | | |
| H30 Maß vorne | 250 | 800 | mm |
| H30 Maß hinten | 250 | 800 | mm |
| Innenraumhöhe über Boden | 210 | 700 | mm |
| Verhältnis Kofferraum (Anteil Vorne/Gesamt) | 0 | 100 | % |
| Sonstiges | | | |
| Raddurchmesser | 600 | 800 | mm |
| Lenkverteilung (Anteil Vorne/Gesamt) | 50 | 100 | % |

¹ Diskrete Variable: Keine minimalen und maximalen Werte verfügbar

Tabelle I.5 Optimierungsparameter für die Optimierung des autoTAXI (Teil 1/2)

| Optimierungsparameter | Minimaler Wert | Maximaler Wert | Einheit |
|---|--------------------------------|----------------|---------|
| Motor | | | |
| Topologie des Antriebsstrangs ¹ | Alle Varianten aus Tabelle C.1 | | – |
| Maschinentyp ¹ | PSM | | – |
| Getriebewinkel vorne (nur Stirnradgetriebe) | 0 | 180 | ° |
| Getriebewinkel hinten (nur Stirnradgetriebe) | 0 | 180 | ° |
| Drehmomentverteilung (Anteil an der Vorderachse) | 5 | 95 | % |
| Getriebe | | | |
| Getriebeoptimierung ¹ (nur Stirnradgetriebe) | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Getriebetyp vorne ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Getriebetyp hinten ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Getriebeübersetzung vorne | 6 | 10 | – |
| Getriebeübersetzung hinten | 6 | 10 | – |
| Achse | | | |
| (Hinter-) Achsentyp ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Achswinkel in xy-Ebene | 0 | 13 | ° |
| Achswinkel in xy-Ebene | 0 | 13 | ° |
| Batterie | | | |
| Batteriezelltyp ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Batteriebreite ¹ (Zwischen Radhäuser ja/nein) | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |

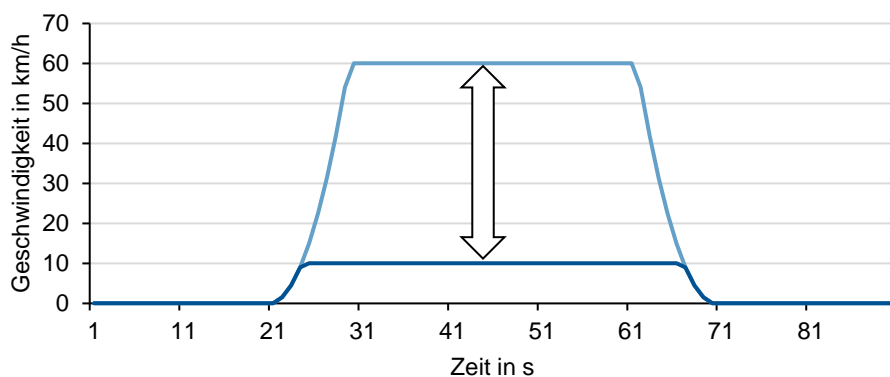
¹Diskrete Variable: Keine minimalen und maximalen Werte verfügbar

Tabelle I.6 Optimierungsparameter für die Optimierung des autoTAXI (Teil 2/2)

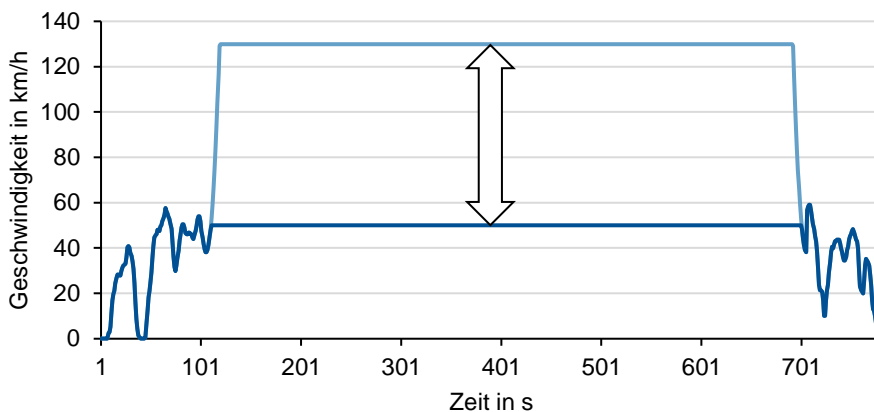
| Optimierungsparameter | Minimaler Wert | Maximaler Wert | Einheit |
|---|--------------------------------|----------------|---------|
| Exterieur | | | |
| Scheibenwinkel vorne | 5 | 85 | ° |
| Scheibenwinkel hinten | 5 | 85 | ° |
| Kofferraumtyp vorne ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Kofferraumtyp hinten ¹ | Alle Varianten aus Tabelle H.1 | | – |
| Abstand Radhaus-Querträger vorne | 0 | 800 | mm |
| Abstand Radhaus-Querträger hinten | 0 | 800 | mm |
| Abstand Innenraum-Radhaus vorne | 0 | 500 | mm |
| Abstand Innenraum-Radhaus hinten | 0 | 500 | mm |
| Interieur | | | |
| H30 Maß vorne | 250 | 800 | mm |
| H30 Maß hinten | 250 | 800 | mm |
| Innenraumhöhe über Boden | 210 | 600 | mm |
| Verhältnis Kofferraum (Anteil Vorne/Gesamt) | 0 | 100 | % |
| Sonstiges | | | |
| Raddurchmesser | 600 | 800 | mm |
| Lenkverteilung (Anteil Vorne/Gesamt) | 50 | 100 | % |

¹ Diskrete Variable: Keine minimalen und maximalen Werte verfügbar

Anhang J Generische Fahrzyklen zur Untersuchung des Nebenverbrauchs



a) Stop-and-Go Stadtzyklus



b) Autobahnzyklus

Abbildung J.1: Generische Zyklen zur Untersuchung des Einflusses des Nebenverbrauchs in Abhängigkeit von Zyklusart und -geschwindigkeit

Anhang K Fahrleistungen bei geteilten Fahrzeugen

Durchschnittliche Fahrtstrecke in Deutschland [20, S. 174]:

$$d_{\emptyset} = 14,3 \text{ km}$$

Anzahl der Fahrten n_{Fahrten} bei einer Laufleistung d_{gesamt} von 150.000 km:

$$n_{\text{Fahrten}} = \frac{d_{\text{gesamt}}}{d_{\emptyset}} = \frac{150.000 \text{ km}}{14,3 \text{ km}} = 10.490$$

Annahme auf Basis von Peters et al. [20, S. 172], dass 1 % aller Fahrten eine Fahrtstrecke von 450 km haben:

$$d_{1\%} = 1\% \cdot 10.490 \cdot 450 \text{ km} = 47.205 \text{ km}$$

Anteil der Fahrtstrecke von 1 % aller Fahrten an der Gesamtstrecke:

$$p_{1\%} = \frac{47.205 \text{ km}}{150.000 \text{ km}} = 31,5 \%$$