

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

**Fahrzeugkonzeptentwicklung für autonome, geteilte  
und elektrische Mobilität**

Franz Ferdinand Schockenhoff, 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. Markus Zimmermann

Prüfer\*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

2. Prof. Jan Auernhammer, Ph.D.

University of Technology Sydney, Australien

Die Dissertation wurde am 18.10.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die TUM School of Engineering and Design am 02.02.2023 angenommen.



# Widmung

Für meine Eltern

Sabine Schockenhoff (†2002) & Dr. Andreas Schockenhoff (†2014)

Dank eurer bedingungslosen Hingabe  
wurden mir alle Möglichkeiten eröffnet  
und dank eurer Liebe und Zuneigung  
darf ich sein, wer ich bin.



# Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München in den Jahren 2018 bis 2022 entstanden. In dieser Zeit durfte ich so vielen Menschen begegnen, dass diese Seite nicht genügt, um allen zu danken. Die nachfolgend Genannten können deshalb nur ein kleiner Ausschnitt der Personen sein, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt sowie mich auf diesem Weg gefördert und begleitet haben.

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Markus Lienkamp danken. Seine durchgehende Unterstützung, die wertvollen Diskussionen, die inhaltliche Entscheidungsfreiheit und die wohlthuende, einzigartige Lehrstuhlatsmosphäre, die maßgeblich durch ihn geprägt ist, haben diese Arbeit erst möglich gemacht. Neben der Erstellung dieser Arbeit konnte ich mich persönlich in diesem Umfeld weiterentwickeln. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Jan Auernhammer zum einen für die Übernahme der Zweitkorrektur und zum anderen für die fachliche Betreuung während meines inspirierenden Aufenthaltes an der Stanford University bedanken. Für den Prüfungsvorsitz meines Promotionsvorhabens danke ich Prof. Markus Zimmermann.

Weiter möchte ich meiner Forschungsgruppe Fahrzeugkonzepte für den inhaltlichen Diskurs, die fortwährende Unterstützung und die unvergessliche Zeit danken. Namentlich nennen möchte ich meine Kollegen im Forschungsprojekt „UNICARagil“ Alexander Koch, Philipp Hafemann und Adrian König sowie Lorenzo Nicoletti. Ohne die letzten beiden wäre der Inhalt dieser Dissertation weitaus geringer. Die Besonderheit der letzten vier Jahre macht die Kollegialität am Lehrstuhl aus, die zu Freundschaften geführt hat. Neben den zuvor Genannten möchte ich Nikolaos Wasiliadis, Julian Kreibich und Matthias Steinträger für insbesondere die gemeinsamen Doktorandenkolloquien danken.

Die Qualität dieser Arbeit hängt maßgeblich von kritischem und qualifiziertem Feedback ab. Für das inhaltliche Korrekturlesen bedanke ich mich bei Lorenzo Nicoletti, Adrian König und Maximilian Zähringer, der auch stellvertretend für alle Studenten, die am Inhalt dieser Arbeit mitgewirkt haben, genannt sei. Für die grammatikalischen Verbesserungen danke ich meiner Freundin Kristin und meiner Schwester Theresa.

Für die Finanzierung meines Forschungsprojektes danke ich dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Für die Unterstützung im Prototypenbau möchte ich stellvertretend Peter Steger, Florian Biechl und Erwin Darnhofer nennen.

Der größte Dank aber geht von ganzem Herzen an meine Geschwister Theresa und Philipp für die bedingungslose Unterstützung, in den von uns gemeinsam bewältigten Lebenssituationen.

München, im Oktober 2022

Ferdinand Schockenhoff



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Formelzeichen.....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Motivation .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Zielsetzung .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Einordnung der Arbeit.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Aufbau der Arbeit.....</b>	<b>4</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Konventionelle Fahrzeugkonzeptentwicklung.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Fahrzeugkonzeptentwicklung unter Einbeziehung von CASE .....</b>	<b>9</b>
2.2.1 Auswirkung von CASE auf die Fahrzeugkonzeptentwicklung .....	9
2.2.2 Bestehende Forschung .....	13
<b>2.3 Forschungslücke .....</b>	<b>18</b>
<b>3 Gesamtkonzept .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Zielsetzung .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Methodiken zur Produktkonzeptentwicklung.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 Gesamtverfahren.....</b>	<b>21</b>
<b>4 Detaillierung des Vorgehens .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1 Nutzerzentrierte Mobilitätsbedürfnisse → Kundenwerte Eigenschaften.....</b>	<b>23</b>
4.1.1 Zielsetzung .....	23
4.1.2 Vorgehen .....	25
4.1.3 Ergebnisse.....	30
4.1.4 Validierung.....	32
4.1.5 Diskussion und Ausblick .....	35
<b>4.2 Kundenwerte Eigenschaften → Technische Eigenschaften .....</b>	<b>37</b>
4.2.1 Zielsetzung .....	37
4.2.2 Vorgehen.....	37
4.2.3 Ergebnisse.....	45

4.2.4	Plausibilisierung .....	47
4.2.5	Diskussion und Ausblick .....	50
<b>4.3</b>	<b>Technische Eigenschaften → Auslegungsparameter.....</b>	<b>51</b>
4.3.1	Zielsetzung .....	51
4.3.2	Vorgehen .....	52
4.3.3	Ergebnisse.....	56
4.3.4	Plausibilisierung .....	57
4.3.5	Diskussion und Ausblick .....	58
<b>4.4</b>	<b>Auslegungsparameter → Fahrzeugkonzept.....</b>	<b>59</b>
4.4.1	Zielsetzung .....	59
4.4.2	Vorgehen .....	59
4.4.3	Ergebnisse.....	66
4.4.4	Validierung.....	68
4.4.5	Diskussion und Ausblick .....	70
<b>5</b>	<b>Anwendung.....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>83</b>
6.1	Diskussion des Gesamtvorgehens.....	83
6.2	Diskussion der Gesamtergebnisse .....	84
6.3	Schlussfolgerung.....	86
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung &amp; Ausblick .....</b>	<b>87</b>
7.1	Zusammenfassung .....	87
7.2	Ausblick .....	88
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>i</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>v</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>vii</b>
	<b>Vorveröffentlichungsliste .....</b>	<b>xxvii</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>xxxii</b>



# Abkürzungsverzeichnis

ACES	Autonom, Vernetzt, Elektrisch, Geteilt (engl. Autonomous, Connected, Electric, Shared)
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.
AuVeCoDe	Entwicklung autonomer Fahrzeugkonzepte (engl. Autonomous Vehicle Concept Development)
AV	Autonomes Fahrzeug (engl. Autonomous Vehicle)
BEV	batterieelektrisches Fahrzeug (engl. Battery Electric Vehicle)
CASE	Vernetzt, Autonom, Geteilt, Elektrisch (engl. Connected, Autonomous, Shared, Electric)
FK	Fahrzeugkonzept
HMI	Mensch-Maschine Schnittstelle (engl. Human-Machine-Interface)
ICEV	Verbrennungsmotorisches Fahrzeug (engl. Internal Combustion Engine Vehicle)
IQR	Interquartilsabstand (engl. Inter Quartile Range)
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KWE	Kundenwerte Eigenschaften
LDS	Längsdynamiksimulation
MaaS	Mobilität als Dienstleistung (engl. Mobility as a Service)
MCDM	Multikriterielles Entscheidungsproblem (engl. Multicriteria Decision-making)
OEM	Automobilhersteller (engl. Original Equipment Manufacturer)
Pkw	Personenkraftwagen
TE	Technische Eigenschaft
TUM	Technische Universität München
VASEM	Fahrzeugkonzeptentwicklung für autonome, geteilte und elektrische Mobilität (engl. Vehicle concept development for Autonomous, Shared, and Electric Mobility)
WLTP	Weltweit einheitliches Leichtfahrzeuge-Testverfahren (engl. Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedure)



# Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	[ ]	Steigung einer linearen Korrelationsfunktion
a <sub>E</sub>	-	Elternindividuum eines Durchlaufes eines genetischen Algorithmus
a <sub>1</sub> , ..., a <sub>i</sub>	-	Initiale Population eines genetischen Algorithmus
a <sub>K</sub>	-	Kinderindividuum nach dem Crossover eines Durchlaufes eines genetischen Algorithmus
a <sub>K'</sub>	-	Kinderindividuum nach der Mutation eines Durchlaufes eines genetischen Algorithmus
B	[ ]	Steigung einer linearen Korrelationsfunktion
F <sub>C</sub>	-	Erfüllungslevel der Nutzerbedürfnisse der Charaktereigenschaften durch die Derivate
F <sub>ff</sub>	-	Wert der gleichmäßigen Erfüllung aller Nutzer durch die Derivate
F <sub>P</sub>	-	Erfüllungslevel der Nutzerbedürfnisse der Personenanzahl durch die Derivate
F <sub>SA</sub>	-	Erfüllungslevel der Nutzerbedürfnisse der Sekundärtätigkeiten durch die Derivate
h <sub>CG</sub>	mm	Schwerpunkthöhe des Fahrzeugs
h <sub>veh</sub>	mm	Fahrzeughöhe
ITF	-	Innenraumtopologiefaktor
k	[ ]	Steigung im Wendepunkt/ Stauchung einer grenzwertbasierten Korrelationsfunktion
KT	%	Anteil: Klare Tendenz bei Expertvalidierung
L <sup>x</sup>		Linguistischer Eingangsvektor einer Fuzzylogik
L <sup>y</sup>		Linguistischer Ausgangsvektor einer Fuzzylogik
m <sub>n</sub>	kg	Fahrzeugmasse bei Iteration n
m <sub>n+1</sub>	kg	Fahrzeugmasse bei Iteration n+1
MT	%	Anteil: Messbare Tendenz bei Expertvalidierung
m <sub>veh</sub>	kg	Fahrzeugmasse

OG	[ ]	Oberer Grenzwert der Korrelationsfunktion
OT	%	Anteil: Ohne Tendenz bei Expertvalidierung
$P_{mach,max}$	kW	Maximale Leistung einer elektrischen Maschine
$P_R$	%	Wahrscheinlichkeit einer richtigen Antwort bei willkürlichen Werten
$SA_{re}$	-	Ausprägung der Sekundärtätigkeit Entspannen
$SA_{sd}$	-	Ausprägung der Sekundärtätigkeit (menschliches) Selbstfahren
$SA_{sl}$	-	Ausprägung der Sekundärtätigkeit Schlafen
$SA_{wo}$	-	Ausprägung der Sekundärtätigkeit Arbeiten
$S_{data}$	[ ]	Steigung der datenbasierten Korrelationsfunktion im Wendepunkt
$S_{limit}$	[ ]	Steigung der grenzwertbasierten Korrelationsfunktion im Wendepunkt
UG	[ ]	Unterer Grenzwert der Korrelationsfunktion
$V_{mach,stat}$	l	Statorvolumen einer elektrischen Maschine
$X_0$	[ ]	Wendepunkt einer grenzwertbasierten Korrelationsfunktion
$X_1$	[ ]	Abszissenwert des Punktes 1 auf einer Kurve
$X_2$	[ ]	Abszissenwert des Punktes 2 auf einer Kurve
$X_{data}$	[ ]	Abszissenwert der datenbasierten Korrelationsfunktion im maximalen Abstand in Abszissenrichtung zur grenzwertbasierten Korrelationsfunktion
$X_{limit}$	[ ]	Abszissenwert der grenzwertbasierten Korrelationsfunktion im maximalen Abstand in Abszissenrichtung zur datenbasierten Korrelationsfunktion
$y_1$	[ ]	Ordinatenwert des Punktes 1 auf einer Kurve
$y_2$	[ ]	Ordinatenwert des Punktes 2 auf einer Kurve
$y_{data}$	[ ]	Ordinatenwert der datenbasierten Korrelationsfunktion im maximalen Abstand in Ordinatenrichtung zur grenzwertbasierten Korrelationsfunktion
$y_{limit}$	[ ]	Ordinatenwert der grenzwertbasierten Korrelationsfunktion im maximalen Abstand in Ordinatenrichtung zur datenbasierten Korrelationsfunktion
$\alpha$	°	Sitzlehnenwinkel
$\Delta KWE$	%	Relativer prozentualer maximaler Abstand der beiden Korrelationsfunktionen in der kundenwerten Eigenschaft für die gleiche technische Eigenschaft
$\Delta S$	%	Relativer prozentualer Unterschied der beiden Korrelationsfunktionen in der Steigung im Wendepunkt

---

$\Delta TE$	%	Relativer prozentualer maximaler Abstand der beiden Korrelationsfunktionen in der technische Eigenschaft für die gleiche kundenwerten Eigenschaft
$\varepsilon$	[ ]	Toleranzgrenze für Iterationsstart
$\mu$	[ ]	Erwartungswert der Gaußverteilung einer datenbasierten Korrelationsfunktion
$\sigma$	[ ]	Standardabweichung der Gaußverteilung einer datenbasierten Korrelationsfunktion
$\Phi$	-	Fitnesswert

[ ] bedeutet variable Einheit je nach Bezugsgröße.



# 1 Einleitung

Mobilität ist seit jeher ein Grundbedürfnis des Menschen: Während zu Urzeiten Mobilität das Überleben eines nomadischen Stammes sicherstellte [1], dient sie in modernen Gesellschaften beruflichen, versorgungstechnischen und freizeitgetriebenen Anlässen [2, S. 18]. Hierfür sind in Deutschland täglich 85 % der Bevölkerung mobil und legen dabei durchschnittlich 39 km pro Tag zurück [2, S. 9]. Dabei ist der fahrzeugbasierte Individualverkehr mit knapp 60 % das meistgenutzte Mobilitätsmittel [2, S. 12].

Gleichzeitig hat der fahrzeugbasierte Individualverkehr die höchsten Einstiegshürden und den größten Ressourcenverbrauch aller bodengebundenen Mobilitätsformen. Dadurch verschärft er in seiner konventionellen Form große gesellschaftliche Herausforderungen des 21. Jahrhunderts in Form des Klimawandels und der Ressourcenverschwendung sowie der sozialen Ungleichheit, anstatt diesen entgegenzuwirken. [3, 4]

Zum einen emittiert der Verkehrssektor rund 30 % der europäischen Treibhausgasemissionen, von denen wiederum 61 % auf den fahrzeugbasierten Individualverkehr entfallen [3]. Ebenso sind in der Produktion für jedes Fahrzeug Ressourcen notwendig, deren Bereitstellung in ihrer Summe die Umwelt schädigen. Zum anderen sind zur Teilnahme am fahrzeugbasierten Individualverkehr eine Fahrerlaubnis und ein privates Fahrzeug notwendig. Diese hohe Hürde schließt körperlich Eingeschränkte und juristisch Nichthaftbare durch die fehlende Fahrerlaubnis sowie monetär Arme durch das nichtvorhandene private Fahrzeug aus [4].

Zukünftige Mobilität muss diese Herausforderungen aufgreifen und dazu beitragen, diese zu meistern. Die bevorstehende Transformation des Mobilitätssektors wird deshalb durch die Megatrends „Connected“, „Autonomous“, „Shared“ und „Electric“ bestimmt werden. Um die vier Megatrends zusammenzufassen, haben sich die Akronyme CASE [5] und ACES [6] gebildet. Diese weitläufig verwendeten Begriffe, die je nach Anwender unterschiedlich definiert sein können, sollen nachfolgend erklärt werden, um durch deren Verständnis eine Grundlage für die vorliegende Arbeit zu schaffen.

Vernetzte Mobilität („Connected“) bedeutet das Teilen von Daten aller Verkehrsteilnehmer. Dies kann unter anderem zur Vermeidung von Unfällen durch frühzeitiges Ankündigen einer Bremsung, zur Routenplanung durch Verkehrsleitstellen oder zur Datenübermittlung der Infrastruktur an Verkehrsteilnehmer genutzt werden. [7–10]

Autonome Mobilität („Autonomous“) spiegelt sich in der Übernahme der Fahraufgabe durch das Fahrzeug wider [11]. In steigenden Automationsleveln übergibt der Fahrer weitere Bestandteile der Fahrzeugführung an das Fahrzeug. Autonome Mobilität bezieht sich dabei auf die vollständige Übernahme der Fahraufgabe durch das Fahrzeug. [7, 10, 11]

Geteilte Mobilität („Shared“) bezieht sich auf neue Besitzverhältnisse der Fahrzeuge im Straßenverkehr. Während nach aktuellem klassischen Verständnis Fahrzeuge von Privatpersonen

besessen werden, die diese für ihre eigene Mobilität nutzen, wird zukünftige Mobilität als Service (MaaS) und nicht als Nutzung eines zu besitzenden Produktes verstanden. [7, 10, 12, 13]

Elektrische Mobilität („Electric“) beschreibt die Energiequelle der Fortbewegung. Konventionelle Fahrzeuge (ICEV) nutzen fossile Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren, die im Sinne der Nachhaltigkeit zunehmend auf elektrisch angetriebene Antriebsstränge umgestellt werden [6, 7, 10, 14, 15]. Die Elektrifizierung der Mobilität ist der am weitesten vorangeschrittene Megatrend, was im Alltag durch im Markt verfügbare Fahrzeuge deutlich wird [15].

Dabei verursacht jeder Megatrend für sich kleine Veränderungen in unserer Mobilität. Aber erst die Verknüpfung der vier Megatrends führt zu neuen Mobilitätsformen, weshalb nur eine gekoppelte Betrachtung das volle Potential der zukünftigen Mobilität offenlegen kann. [10, 16]

### 1.1 Motivation

Das Fahrzeug nimmt in wissenschaftlichen Veröffentlichungen [5, 8–10, 14] und in populärwissenschaftlicher Literatur [6, 7, 12, 13, 15] eine grundlegende Rolle für die zukünftige Mobilität ein. Wenn Fahrzeuge für die zukünftige Mobilität von großer Bedeutung sind, die vier Megatrends CASE neue Mobilitätsformen hervorbringen werden und sich bestehende Mobilitätsangebote weitgehend transformieren werden, stellt sich die Frage nach dem Fahrzeug der Zukunft.

Erste Änderungen sind bei heutigen batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) bereits erkennbar [15]. Die kollektive Realisierung von CASE lässt eine grundlegende Veränderung der zukünftigen Fahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen erahnen. Nahezu jeder Automobilhersteller (OEM) hat dies erkannt und hierzu Designstudien präsentiert, um seine Vision aufzuzeigen (z.B. [17, 18]). Ebenso gibt es Prototypen von Startups, wie Zoox [19], die durch CASE eine Chance sehen, am Automobilmarkt zu partizipieren. Des Weiteren existieren Forschungsfahrzeuge von Universitäten, um an diesem weitreichenden Thema zu forschen. Hier sind unter anderem UNICARagil [20] und DART [21] zu nennen.

Die große Diversität dieser Projekte in Bezug auf Technikreife, Fahrzeugkonzept (FK), Geschäftsmodell etc. lässt den Rückschluss zu, dass die Notwendigkeit für Forschung an diesem Thema besteht. Diese Vielfalt zeigt, dass finale Lösungen und Lösungswege noch nicht gefunden sind, auch wenn es in einer zukünftigen heterogenen Mobilitätsumgebung nicht das eine universale FK geben wird. Vielmehr führt sie zu der Vermutung, dass bisherige Projekte zu zukünftigen Fahrzeugen in ihrer Entwicklung keiner einheitlichen Systematik folgen.

### 1.2 Zielsetzung

In diesem Umfeld, ohne Vorgängerfahrzeuge im Markt, ohne bestehende Benchmarkfahrzeuge und ohne spezifisches Wissen über die Kundenwünsche, stehen Fahrzeugkonzeptingenieure vor Herausforderungen, die ohne eine systematische Herangehensweise nicht zu lösen sind. Die Lösungswege liegen im Bereich der Fahrzeugkonzeptentwicklung. Deren Aufgabe ist es, das zu entwickelnde Fahrzeug im Markt zu positionieren, die Erfüllung der gewünschten Fahrzeugeigenschaften abzusichern, durch virtuelle Entwicklung Kosten zu sparen und Risiken zu minimieren, sowie ein erstes Package mit den Hauptcharakteristika des Fahrzeuges zu



konzipieren [22]. Die durch CASE ausgelösten umfassenden Änderungen der Randbedingungen, in denen die Fahrzeugkonzeptentwicklung stattfindet, lassen vermuten, dass der konventionelle Prozess an seine Grenzen stoßen wird bzw. seine Ziele im sich wandelnden Umfeld nicht mehr erfüllen kann.

Deshalb ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, eine Methode abzuleiten, mit der systematisch FK im Kontext von CASE entwickelt werden können. Dabei gilt es, den bisherigen Fahrzeugkonzeptentwicklungsprozess, der sich bei OEM etabliert hat, zu berücksichtigen und die neuen Aspekte zu integrieren.

Die herzuleitende Methode soll nicht nur theoretisch beschrieben, sondern auch als Tool implementiert werden, um dem Fahrzeugkonzeptingenieur bei der Auslegung der FK im Kontext von CASE in jedem Entwicklungsschritt Lösungsvorschläge zu generieren, die dieser nutzen oder nachbearbeiten kann.

### 1.3 Einordnung der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in die aktuelle Forschung der Forschungsgruppe Fahrzeugkonzepte des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München (TUM) ein. Insbesondere die Forschungsvorhaben von KOCH [23], KÖNIG [24] und NICOLETTI [25] haben die Erkenntnisse dieser Arbeit unterstützt und sind teilweise in deren Implementierung integriert. Nachfolgend werden sie deshalb in Abbildung 1.1 vorgestellt. Die Vorstellung der nahestehenden Arbeiten ersetzt keinen ausführlichen Literaturüberblick, der im Stand der Technik (Kapitel 2) zu finden ist.

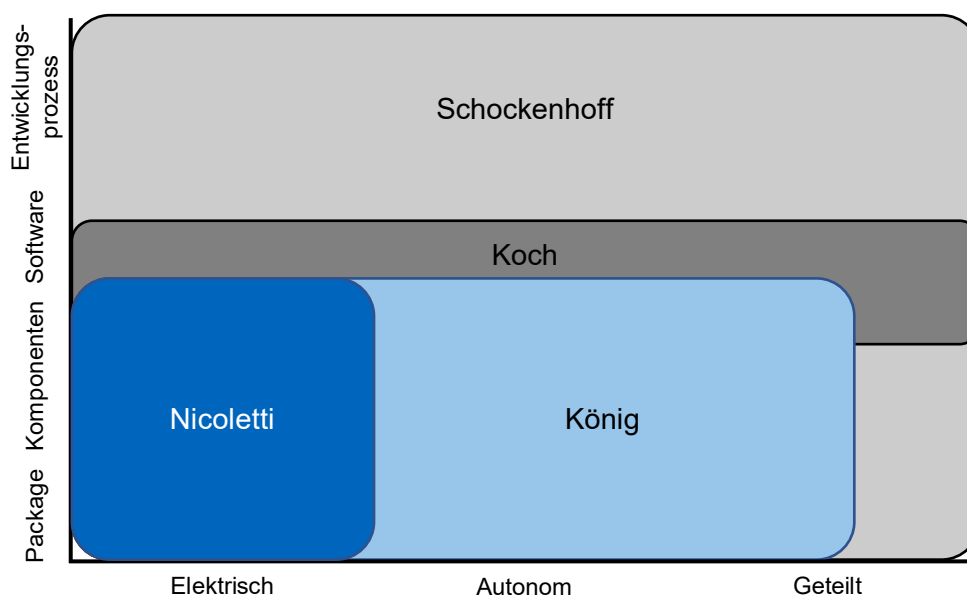


Abbildung 1.1: Einordnung der Arbeit

NICOLETTI [25] beschäftigt sich mit der Komponentenauswahl und -dimensionierung von BEV und deren optimalen Packages. Dafür modelliert er die konzeptbestimmenden Komponenten und erarbeitet mithilfe von Maßketten FK. Sein wissenschaftlicher Fokus liegt auf der Betrachtung von volumetrischen und gravimetrischen Sekundäreffekten in der Konzeptentwicklung des BEV.

KÖNIG [24] betrachtet die Hardwareentwicklung autonomer FK. Er baut auf die Modellierungen von NICOLETTI auf und erweitert diese um konzeptbestimmende Komponenten sowie um Maßketten und Hüllkurven autonomer Fahrzeuge (AV). Als Ergebnis liefert seine Arbeit hinsichtlich des Verbrauchs und der Anschaffungskosten optimale autonome FK und deren Layout.

KOCH [23] betrachtet die Möglichkeiten des Softwareinflusses in der Antriebsstrangauslegung von AV. Er erforscht Potentiale, die sich durch die Übernahme der Fahraufgabe durch das Fahrzeug und der Implementierung energiesparender Fahralgorithmen in der Antriebsstrangauslegung ergeben.

Die vorliegende Arbeit greift die Erkenntnisse von NICOLETTI, KÖNIG und KOCH auf, um FK für elektrische, autonome und geteilte Mobilität durch eine ganzheitliche Betrachtung von der Ableitung des Entwicklungsprozesses bis hin zum Package zu erforschen.

### 1.4 Aufbau der Arbeit

Diese Dissertation gliedert sich in sieben Kapitel (Abbildung 1.2). Die Einleitung (Kapitel 1) zeigt deren Motivation auf und definiert darauf aufbauend deren Zielsetzung. Kapitel 2, der Stand der Technik, beschäftigt sich mit der konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklung, deren Veränderung durch CASE sowie bereits bestehender Forschung in diesem Fachgebiet und leitet daraus die Forschungslücke der vorliegenden Arbeit ab.

Das dritte Kapitel erarbeitet für diese Forschungslücke das Gesamtkonzept. Dafür leitet es zuerst aus der Forschungslücke eine Zielsetzung ab, analysiert auf deren Basis Methodiken der Produktkonzeptentwicklung und definiert das Gesamtverfahren. Dieses Gesamtverfahren wird im vierten Kapitel detailliert. Dabei wird anhand der Punkte „Zielsetzung“, „Vorgehen“, „Ergebnisse“, „Validierung bzw. Plausibilisierung“ sowie „Diskussion und Ausblick“ auf die vier Prozessschritte des Gesamtverfahrens „Nutzerzentrierte Mobilitätsbedürfnisse → Kundenwerte Eigenschaften“, „Kundenwerte Eigenschaften → Technische Eigenschaften“, „Technische Eigenschaften → Auslegungsparameter“ und „Auslegungsparameter → Fahrzeugkonzept“ eingegangen. Die vier Prozessschritte bilden die Unterkapitel von Kapitel 4. Es bildet das Herzstück der vorliegenden Arbeit, weil in ihm detailliert deren Erkenntnisse aufbereitet sind.

Kapitel 5 präsentiert eine Anwendung des zuvor vorgestellten Vorgehens. Dafür greift es auf dessen Implementierung in Form eines Tools zurück. Die anschließende Diskussion in Kapitel 6 bezieht sich zum einen auf das Gesamtverfahren und zum anderen auf die Gesamtergebnisse. Eine Schlussfolgerung ordnet das Resultat und den Neuigkeitswert dieser Arbeit ein. Abschließend fasst Kapitel 7 diese Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf potenzielle zukünftige Forschungsfelder.

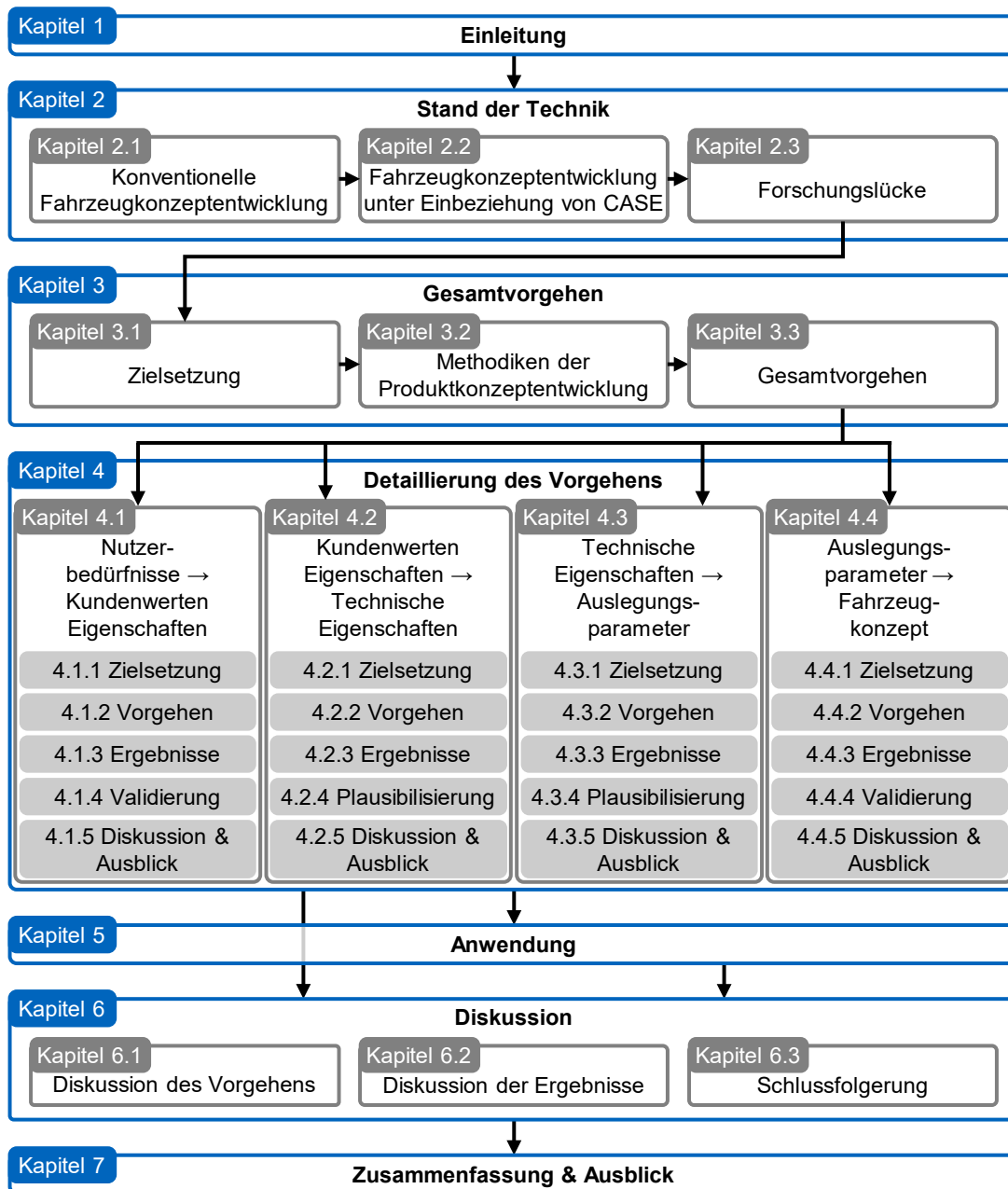


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit



## 2 Stand der Technik

Im Stand der Technik soll zum einen die konventionelle Fahrzeugkonzeptentwicklung erklärt (Kapitel 2.1) und zum anderen aus der Literatur abgeleitet werden, welche Auswirkungen die einzelnen Aspekte von CASE auf jene haben (Kapitel 2.2.1). Eine detaillierte Beschreibung der bestehenden Forschung, die die Fahrzeugkonzeptentwicklung in diesem Kontext betrachtet (2.2.2), soll auf die Forschungslücke, in die sich diese Arbeit einfügt, hinführen. Deren Formulierung mit ihren spezifischen Teilzielen (Kapitel 2.3) schließt dieses Kapitel ab.

### 2.1 Konventionelle Fahrzeugkonzeptentwicklung

Für die Entstehung von Fahrzeugen haben sich in der Industrie Produktentstehungsprozesse etabliert, die OEM-übergreifend in der in Abbildung 2.1 dargestellten Form ähnlich sind. Die Fahrzeugentwicklung, die durch diesen Produktentwicklungsprozess erfolgt, lässt sich in zwei Hauptphasen teilen: die Konzept- und die Serienentwicklungsphase [26, S. 1276, 27, S. 9]. In der Konzeptentwicklungsphase werden Varianten des FK analysiert und verglichen während in der Serienentwicklungsphase das ausgewählte FK zur Marktreife auskonstruiert und Produktionsschritte geplant werden [22].

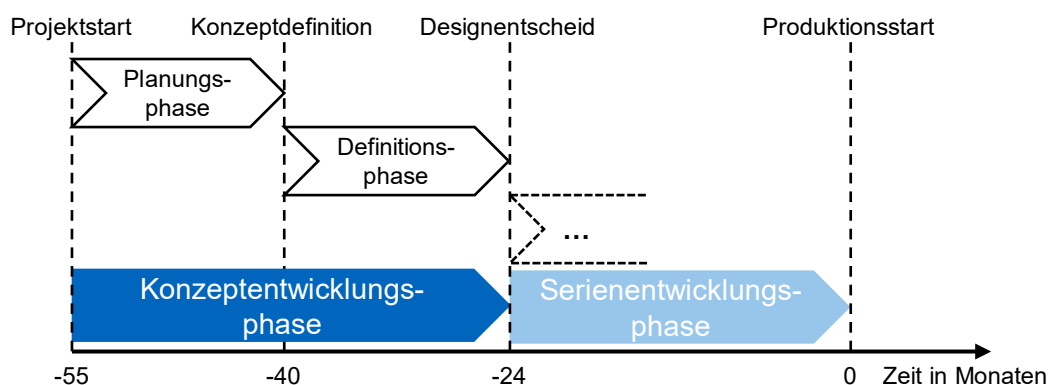


Abbildung 2.1: Automobilien Produktentstehungsprozess nach [22, 26, S. 1276, 27, S. 9]

Das entwickelte FK, das als Meilenstein nach der Konzeptentwicklungsphase feststeht, ist in der konventionellen Sicht nach ACHLEITNER ET AL. [28, S. 140-141] „als konstruktive[r] Entwurf einer Produktidee[,] mit dem die grundsätzliche Realisierbarkeit abgesichert wird“, definiert. Dies „umfasst [...] die Zusammenstellung der wesentlichen, die Fahrzeugeigenschaften und die Fahrzeugcharakteristik beeinflussenden Parameter, Hauptmodule und Komponenten.“ ACHLEITNER ET AL. [28, S. 141] beziehen sich ausschließlich auf Hardwarekomponenten. Unter anderem nennen sie Fahrzeughauptabmessungen, das Antriebskonzept und den Raumbedarf der Insassen [28, S. 141]. Software spielt für sie keine Rolle.



Die Kundenwerte der KWE werden mithilfe von Korrelationsfunktionen in physikalisch messbare Werte transformiert [32, 34, 45, S. 49-59]. Das erwähnte Beispiel der „Beschleunigungszeit von 0 km/h auf 100 km/h“ weist dabei dem Kundenwert eine benötigte Zeit in Sekunden zu.

Mit diesen physikalischen Werten kann im zweiten Schritt die Komponentenauswahl und -dimensionierung erfolgen (Abbildung 2.2). Komponentenmodelle und Funktionssimulationen dimensionieren mit diesen physikalischen Werten als zu erfüllende Anforderung die einzelnen Komponenten. Beispielhaft sei die Antriebsstrangauslegung zu nennen. Komponentenmodelle müssen für den Motor, das Getriebe mit Differenzial und den Energiespeicher erstellt werden [46, S. 19, 47, S. 41]. Eine Längsdynamiksimulation (LDS), in die diese Komponentenmodelle integriert sind, kann die erzielbaren KWE für beispielsweise Beschleunigungszeit, Höchstgeschwindigkeit oder Verbrauch anhand ausgewählter Komponentenspezifikationen bestimmen [48, S. 54-57]. Die jeweilige Modellierungstiefe der Komponentenmodelle und Funktionssimulationen hängt vom gewünschten Detaillierungsgrad des FK ab.

Der dritte Schritt „Fahrzeugkonzeptdefinition“ (Abbildung 2.2) führt die bestimmten Komponenten zu einem FK zusammen. Für die geometrische Zusammenführung im Fahrzeugpackage bedarf es einer Packagemodellierung mithilfe von Maßketten [27, S. 45, 28, S. 142-150, 47, S. 49-57, 49, S. 14-16] sowie entsprechende Modelle für Masse- und Kostenabschätzungen [48]. Als Ergebnis ist das Gesamtfahrzeugkonzept hergeleitet und seine Eigenschaften beschrieben.

Für die initiale Auslegung der Komponenten müssen Annahmen wie beispielsweise die Fahrzeugmasse getroffen werden, die erst nach dem dritten Schritt „Fahrzeugdefinition“ bekannt sind. Ebenso gibt es Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten sowie Sekundäreffekte, die erst nach vollständiger Fahrzeugkonzeptdefinition bestimmt werden können. Aus diesem Grund folgt als letzter Schritt ein Soll-/Ist-Vergleich der geforderten mit den erreichten KWE. Dieser Vergleich benötigt bei zu großer Abweichung Iterationsschleifen über die Komponentenauslegung und -dimensionierung sowie die Fahrzeugkonzeptdefinition. [48, S. 24-31]

Das Verständnis der konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklung dient als Basis für das nachfolgende Kapitel. Es bezieht die Auswirkungen von CASE auf sie ein und präsentiert deren bereits erforschte Anpassungen.

## 2.2 Fahrzeugkonzeptentwicklung unter Einbeziehung von CASE

Die konventionelle Sicht auf das FK nach ACHLEITNER ET AL. [28, S. 140-141] und dessen skizzierter Entwicklungsprozess scheinen sich durch die Megatrends CASE zu verändern, wie das nachfolgende Kapitel zeigt. Die Auswirkung der einzelnen Megatrends auf die Fahrzeugkonzeptentwicklung (Kapitel 2.2.1) und bestehende Forschung zur Integration von CASE in diese (Kapitel 2.2.2) sollen hierfür aufbereitet werden.

### 2.2.1 Auswirkung von CASE auf die Fahrzeugkonzeptentwicklung

Die Megatrends CASE werden in der Reihenfolge dargestellt, in der sie im Akronym Beachtung finden. Es wird untersucht, wie sich das FK durch sie verändert und welche Folgen dies für deren Entwicklung haben könnte.

## Auswirkung von vernetzter Mobilität (Connected)

Vernetzte Mobilität bedeutet eine Kommunikation zwischen Fahrzeugen und ihrer Umwelt [7, 10], wobei eine Aufgliederung nach den verschiedenen Kommunikationspartnern des Fahrzeugs erfolgt: Kommunikation des Fahrzeugs mit einem anderen Fahrzeug ermöglicht neben Platooning [8, 50, 51] und einem kooperativen Fahrverhalten [50, 51] auch Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen, um automatisierte Fahrfunktionen zu unterstützen [9, 50, 51]. Kommunikation mit der Infrastruktur eignet sich beispielsweise, um komplizierte Kreuzungssituationen und Ampelschaltungen aufzulösen [8, 52, 53]. Eine weitere Anwendung ist Kommunikation mit einer Cloud, um unter anderem Straßenzustände zu übertragen [9, 50]. Beispielsweise ergeben sich Leitwarten, die mit dem Fahrzeug zu unterschiedlichen Zwecken kommunizieren, aus dieser Vernetzung [54]. Neben der Übernahme der Fahrfunktion durch teileoperiertes Fahren [8, 9, 54] kann eine Leitwarte Flottenmanagement zur Stauvermeidung betreiben [8, 54] oder als Notfallservice für die Passagiere des Fahrzeugs dienen [54]. Neue Übertragungstechnologien, insbesondere 5G, ermöglichen durch ihre höhere Datenrate und geringere Latenz den großflächigen Einsatz dieser Anwendungen [50, 51].

All diese Innovationen haben das Potential, die Mobilität sicherer, effizienter und komfortabler zu machen, und sind für die zukünftige Mobilität unerlässlich. Sie beziehen sich aber auf eine Fahrzeugflotte und das Verkehrsgeschehen und nicht auf das FK. Selbst Visionen wie Dromos [55], bei denen Teile der Sensorik für die automatisierte Fahrfunktion in der Infrastruktur verbaut sind, beinhalten keine Änderungen des FK, weil diese durch den Megatrend autonome Mobilität getrieben und von der Vernetzung nur unterstützt werden. Dementsprechend wird die vernetzte Mobilität in dieser Arbeit keine weitere Beachtung mehr finden.

## Auswirkung von autonomer Mobilität (Autonomous)

Bei autonomer Mobilität steht heutzutage vor allem die Bereitstellung der Funktion des autonomen Fahrens mit den dafür benötigten Algorithmen im Vordergrund [8]. Diese Fähigkeit des autonomen Fahrens ist in der SAE J3016 [11] von der Stufe 0 (keine Automation) bis Stufe 5 (Vollautomation) normiert (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Automatisierungsstufen nach SAE J3016 [11]

SAE Stufe	Benennung	Längs- und Querführung	Umgebungsüberwachung	Rückfallebene	Systemverfügbarkeit
0	keine Automation	Fahrer	Fahrer	Fahrer	-
1	Assistenzsysteme	Fahrer	Fahrer	Fahrer	mit Grenzen
2	Teilautomatisierung	System	Fahrer	Fahrer	mit Grenzen
3	Bedingte Automatisierung	System	System	Fahrer	mit Grenzen
4	Hochautomatisierung	System	System	System	mit Grenzen
5	Vollautomatisierung	System	System	System	überall

In dieser Arbeit ist der Begriff autonom den Stufen 4 und 5 gleichgesetzt, weil bei diesen das System jede Funktion der Fahraufgabe, Längs- und Querführung, Umgebungsüberwachung und Rückfallebene, übernimmt. Lediglich in der örtlichen und zeitlichen Systemverfügbarkeit unterschieden sich die beiden Stufen, was für das FK aber keine Auswirkung hat.



Durch den Wegfall der Fahraufgabe entfällt der verpflichtende Fahrerarbeitsplatz und der Fahrer wird zum Passagier [56]. Dies ermöglicht allen Insassen, Sekundärtätigkeiten nachzukommen, für deren Ausübung disruptive Innenraumtopologien nötig sind [57, 58, 59, S. 13-16]. Ebenso entfallen Anforderungen an das Sichtfeld des Fahrers, sodass neue Karosseriebauformen entstehen können [56, 59, S. 13, 60]. Darüber hinaus entstehen neue Gewerke im FK. Die Sensorik, die für die Umfeldwahrnehmung des AV benötigt wird, muss entsprechend ihrer Anforderungen positioniert werden [60, 61, S. 82]. Die Aufgaben des Fahrers entfallen auf die Fahralgorithmen und lassen Softwarefunktionen Teil der Fahrzeugkonzeptentwicklung werden [62].

Das gesamte Portfolio der KWE ist neu zu gestalten [35], weil diese beträchtlichen Änderungen die Sicht des Kunden auf das FK beeinflussen. Als Startpunkt der konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklung hat dies erheblichen Einfluss auf den gesamten Prozess.

### Auswirkung von geteilter Mobilität (Shared)

Geteilte Mobilität entsteht durch das Teilen des Transportgefäßes mit anderen Personen. Dies steht im Gegensatz zu konventioneller Mobilität, bei der das Fahrzeug als Mobilitätsträger von Privatpersonen für deren private Mobilität genutzt wird. Das Fahrzeug wird dadurch nicht mehr vorrangig als ein Produkt, das ein Kunde besitzt, sondern als ein Mobilitätsträger zur Servicebereitstellung gesehen [10, S. 12-14]. In diesem MaaS-Umfeld spielt Multimodalität weg vom Fahrzeug als einziger Mobilitätsträger eine weitere Rolle [10, S. 13, 63]. Um den Fokus dieser Arbeit auf die Fahrzeugkonzeptentwicklung zu setzen, soll dies aber vernachlässigt werden.

In einem Umfeld mit geteilter Mobilität existieren neben Privatfahrzeugen Carsharing-Taxis und Ridesharing-Shuttles [12, S. 2, 64, S. 19-21, 65]. Erstere werden aus Gründen wie der Privatsphäre oder des Prestiges weiter vorhanden sein [64, S. 17-18]. Die Zweitgenannten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie von verschiedenen Personen genutzt werden, die individuelle Fahrt des Einzelnen aber nicht mit fremden Personen geteilt wird. Bei den Letztgenannten finden diese geteilten Fahrten statt, sodass sich in der Fahrzeugkabine untereinander fremde Personen befinden, um die aktuelle Fahrt für jeden Insassen ökonomisch günstiger und ökologisch nachhaltiger zu gestalten [12, S. 2, 64, S. 19-21, 66]. Alle Fahrzeugtypen (Abbildung 2.3) sind Bestandteil von einer ganzheitlichen geteilten Mobilität und haben unterschiedliche Anforderungen an das FK, die in der Fahrzeugkonzeptentwicklung Beachtung finden müssen. Deshalb bezieht sich für die vorliegende Arbeit der Begriff „geteilte Mobilität“ auf alle drei Fahrzeugtypen.

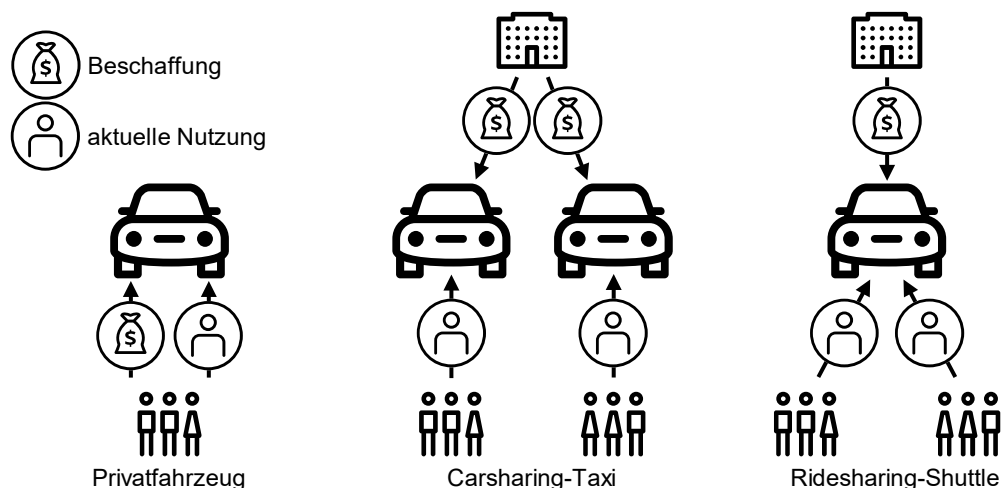


Abbildung 2.3: Fahrzeugtypen in geteilter Mobilitätsumgebung

## 2 Stand der Technik

Durch diese Mobilitätsänderungen werden Bedürfnisse der Mobilitätsnutzer als Haupttreiber der Fahrzeugkonzeptentwicklung dienen. Prominentes Beispiel des vermutlich einzigen konventionellen und seit Jahrzehnten dafür entwickelten Fahrzeuges ist das London Cab [67]. Spezifische Wünsche einzelner Privatpersonen, die ihr Fahrzeug dahingehend konfigurieren, werden auf Privatfahrzeuge beschränkt sein [10, S. 25]. Final führt dies in der Entwicklung der FK zu einer Fokussierung auf den Mobilitätsnutzer als Empfänger einer Mobilitätsdienstleistung statt den Fahrzeugkunden als Käufer eines Fahrzeugs.

### Auswirkung von elektrischer Mobilität (Electric)

Elektrische Mobilität beschreibt den Energieträger und den Antrieb, die benötigt werden, um die der Mobilität zugrundeliegende Fortbewegung zu ermöglichen [15]. Konventionell sind dies fossile Kraftstoffe, die im Sinne der zunehmenden Reduzierung der anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch elektrische Energie substituiert werden [31, 68, 69, 70, S. 24]. Diese Änderung der Energiequelle des Fahrzeugs hat verschiedene Auswirkungen auf das FK, wobei die vorliegende Arbeit sich auf BEV fokussiert. Bei diesen besteht der Antriebsstrang zum einen aus anderen Komponenten als der eines ICEV, um die in veränderter physikalischer Form vorliegende Energie speichern und in mechanische Energie an den Rädern umwandeln zu können. Zum anderen führt dies zu neuen KWE.

Während beim ICEV verglichen zum BEV ein kleiner Tank, ein größerer und schwererer Motor und ein größeres und schwereres Mehrganggetriebe die Hauptkomponenten des Antriebsstranges bilden, besteht dieser beim BEV relativ zum ICEV aus einer großen und schweren Batterie, einer oder mehreren kleinen E-Maschinen und einem oder mehreren kleinen Ein- oder Zweiganggetrieben [70, S. 26-27, 71, S. 58-87]. Die Auslegungsparameter des Antriebsstranges eines BEV fasst NICOLETTI [72] zusammen. Komponenten- und Topologievariationen des Antriebsstranges sind detaillierter in [73–75] beschrieben. Diese Veränderungen der Komponenten bedürfen darüber hinaus neue Lösungen im Package und dessen zugrundeliegenden Maßketten [75, 76]. Für die Definition der verwendeten Begriffe sei auf die jeweilige Literatur verwiesen.

Diese Änderungen der Antriebsstrangkomponenten in BEV bringen neue KWE hervor, die beim ICEV ohne oder von geringerer Bedeutung waren, und priorisieren bestehende KWE um. Die bedeutendsten Änderungen sind die Reichweite und die Dauer eines vollständigen Batterieladeprozesses, die sich aus der Substitution des Tankes durch eine Batterie ergeben. Die Struktur der Kosten ändert sich ebenfalls, sodass die verschiedenen Kostenarten über den Lebenszyklus betrachtet werden müssen. Eine Auflistung (Abbildung 2.4) der in BEV neuen bzw. geänderten KWE präsentiert WIEDEMANN [77, S. 35-36]:



Abbildung 2.4: Neue/ geänderte kundenwerte Eigenschaften von Elektrofahrzeugen nach [77, S. 36]

### 2.2.2 Bestehende Forschung

Das vorangehende Unterkapitel zeigt, dass die Megatrends autonome, geteilte und elektrische Mobilität von hoher Bedeutung für FK und deren Entwicklung sind. Vernetzte Mobilität ist ein Thema das Fahrzeugflotten betrifft und keinen direkten Einfluss auf das FK haben wird.

Die bestehende Forschung, die sich mit Aspekten von autonomer, geteilter und elektrischer Mobilität in Bezug auf das FK oder dessen Entwicklung beschäftigt, wird nachfolgend in vier Gruppen aufgeteilt, um Arbeiten mit einheitlicher Zielsetzung oder aus gleichen Forschungsgruppen vergleichen zu können. Die erste Gruppe umfasst Forschungsarbeiten aus der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts, die sich mit systematischer Fahrzeugkonzeptentwicklung beschäftigt haben. Die Forscher der zweiten bis vierten Gruppe wirkten in der zweiten Dekade des 21. Jahrhunderts. Dabei bilden Arbeiten, die am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TUM entstanden sind, die zweite Gruppe. Diese Arbeiten hängen inhaltlich mit den Fahrzeugprojekten VISIO.M [78] und aCAR [79] zusammen. Die dritte Gruppe entspringt der Volkswagen Konzernforschung und die vierte TUMcreate aus Singapur mit den Forschungsprojekten EVA [80] und DART [21]. Alle Arbeiten werden dahingehend untersucht, inwieweit sie erstens die drei Megatrends autonome, geteilte und elektrische Mobilität in ihren Kontext einbinden sowie zweitens die Beschreibung des FK und eine Anpassung deren Entwicklung zum Forschungsgegenstand haben.

#### Gruppe 1: Systematische Fahrzeugkonzeptentwicklung

Die erste Gruppe gliedert sich in kundenorientierte Fahrzeugkonzeptentwicklung mit den Arbeiten von ZIEMANN [41] und DEUBEL [45] sowie parametrische Modellierung durch PRINZ [81] und BHISE [82, 83].

ZIEMANN [41] befasst sich mit einer Methodik zur zielgesteuerten Herleitung konventioneller FK. Zur Reduzierung der Struktur des Zielsystems eines komplexen Produktes, wie es durch einen Personenkraftwagen (Pkw) gegeben ist, fokussiert er die Kundensicht auf das Produkt auf höchster Ebene und stellt diese als wichtigstes Auslegungskriterium in den Mittelpunkt [41, S. 116-118]. Damit ebnet er den Weg für eine kundenorientierte Entwicklung von FK durch KWE als Startpunkt.

DEUBEL [45] erarbeitet ein Rahmenwerk zur anforderungs-, kosten- und wertgetriebenen Produktkonzeptentwicklung. Ein Schwerpunkt seiner Arbeit liegt auf der Umrechnung des Kundenwertes der KWE in einen physikalisch messbaren Wert [45, S. 47-61]. Als Beispiele nutzt er typische KWE der Fahrzeugkonzeptentwicklung, wodurch die automobiler Anwendung aufgezeigt ist. Durch seine Arbeit lassen sich KWE in einen automatisierten Ablauf eingliedern, weil eine Methodik zur Ableitung physikalischer Größen aus KWE gegeben ist.

PRINZ [81] entwickelt ein parametrisches Modell mit dem Ziel, in der Fahrzeugkonzeptentwicklung auf verkürzte Produktlebenszyklen und eine stärkere Diversifizierung reagieren zu können. Dafür identifiziert er die wesentlichen Parameter und erarbeitet deren Verknüpfungen und Beziehungen. Sein Modell beschreibt FK auf abstrakte Weise, indem Beziehungen der gewählten Parameter beschrieben werden und eine Detaillierung gewählter FK erarbeitet wird. Damit wird eine Grundlage zur Bestimmung von Wechselwirkungen im FK geschaffen.

BHISE [82, 83] erstellt ein parametrisches Modell, das geometrische Entwürfe eines neu zu entwickelnden Fahrzeugs mithilfe von Eingangsparametern wie der gewünschten Kundengruppe, des Fahrzeugdesigntyps sowie den Hauptabmessungen des Interieurs und des Exterieurs

ableitet. Dafür modelliert er Abhängigkeiten zwischen Innen- und Außenabmessungen. Mit seinem Modell können erstellte Fahrzeugentwürfe Vergleichsfahrzeugen gegenübergestellt werden und Sensibilitätsanalysen durch das Variieren einzelner Parameter gemacht werden [83]. Ziel seines Modells ist die Darstellung sich in Wechselwirkung befindlicher Zusammenhänge, um für unerfahrene Ingenieure und in der Lehre eine Hilfe zu sein [82].

### **Gruppe 2: Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TUM**

Die zweite Gruppe, bestehend aus Forschung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TUM, setzt den Megatrend elektrische Mobilität in den Fokus und beschäftigt sich folglich mit der Entwicklung von batterieelektrischen FK. WIEDEMANN [77, 84], FUCHS [85–87] und MATZ [88, 89] befassen sich mit der Konzeptionierung von BEV, deren kundenorientierter Herleitung und deren Einbettung in die Verkehrsumgebung. SOLTES [90–92] erarbeitet einen Entwicklungsprozess für ein gesetztes frugales batterieelektrisches FK.

WIEDEMANN [77, 84] überarbeitet die Fahrzeugkonzeptentwicklung, die in Abbildung 2.2 dargestellt ist, um für BEV aus KWE das FK ableiten zu können [77, S. 51, 84]. Dabei fokussiert er sich auf die Wechselwirkungen zwischen Kundensicht und der technischen Generierung des FK sowie den Änderungen, die die Elektrifizierung des Antriebsstranges hervorruft. Seine Forschung setzt am zugrundeliegenden Portfolio der KWE an. Der Neuigkeitswert dieser Arbeit liegt in der Identifizierung neuer KWE von BEV, deren Objektivierung in technischen Werten über Korrelationsfunktionen sowie deren Integration in einen automatisierten Konzeptentwicklungsprozess [77, S. 53-62]. Mithilfe von abstrahierten Komponentenmodellen bildet WIEDEMANN das FK ab [77, S. 63-88]. Eine auf Parametervariation beruhende Optimierung stellt eine möglichst geringe Abweichung des erstellten FK von den geforderten Ausprägungen der KWE sicher [77, S. 95-113]. WIEDEMANN betrachtet somit die Auswirkungen des Megatrends Elektrifizierung auf das FK und auf dessen Entwicklungsprozess.

J. FUCHS [85–87] untersucht die Auswirkung der Elektrifizierung auf Komponenten-, Fahrzeugarchitektur- und Gesamtfahrzeugebene sowie deren Wechselwirkungen [85]. Dabei hat er das Ziel, aufzuzeigen, welche Parameter geändert werden müssen, um gewünschte technische Anforderungen zu erreichen. Durch eine Modellierung des FK mit dem Fokus auf dessen Package erstellt er ein Referenzfahrzeug für die gewünschten Anforderungen. Über eine vollfaktorielle Parameterstudie ermöglicht sein Vorgehen, Aussagen zu technischen Stellhebeln in Bezug auf die Erfüllung der Anforderungen zu treffen. J. FUCHS kann für geforderte Anforderungen die bestmögliche Anpassung des FK vorschlagen, weil jeder Änderung auf den verschiedenen Betrachtungsebenen Bewertungen zugeordnet sind [87]. Insbesondere für BEV ermöglicht er durch sein Vorgehen eine zielgerichtete Fahrzeugkonzeptentwicklung.

MATZ [88, 89] entwickelt ein Vorgehen, um die vier Verkehrsmittel Taxi, Car-Sharing, öffentlicher Personenverkehr und BEV als Privatfahrzeug für urbane Mobilität vergleichen zu können. Für seine exakte Definition dieser Verkehrsmittel sei auf ihn verwiesen. Als Zielgrößen seines Vergleiches wählt er die Gesamtkosten des Verkehrsmittels, die verstrichene Reisezeit und die produktiv nutzbare Reisezeit [89]. Während die drei Verkehrsmittel Taxi, Car-Sharing und öffentlicher Personenverkehr durch einfache Modelle zur Bestimmung der Zielgrößen abgebildet werden, wird für das BEV als Privatfahrzeug die Fahrzeugkonzeptentwicklung (Abbildung 2.2) durchlaufen [88]. Dafür implementiert er eine LDS, ein Package-, ein Masse- und ein Kostenmodell. Durch die Einbettung der Fahrzeugkonzeptentwicklung in das übergeordnete Problem der urbanen, multimodalen Mobilität und einer vollparametrischen Auslegung des entwickelten FK [89] leitet MATZ diese beiden Forschungsgegenstände umfänglich her. Der Megatrend der

Elektrifizierung ist durch die explizite Betrachtung eines privaten BEV als Lösungsmöglichkeit der urbanen Mobilität gegeben. Der Kontext der geteilten Fahrt findet durch die weiteren Lösungsmöglichkeiten eine Anwendung für die Auswahl des Verkehrsmittels, ohne bei der Konzeptionierung des privaten BEV betrachtet zu werden.

SOLTES [90–92] hat bei seiner Forschung ein anderes Ziel. Er entwickelt kein Vorgehen zur allgemeinen Auslegung von BEV, sondern ermittelt das beste Vorgehen für ein frugales, elektrisches FK für Subsahara-Afrika [91]: das aCar [79]. Er betrachtet dafür agile Methoden und Design Thinking, um daraus ein passendes Vorgehen zur Entwicklung dieses frugalen FK herzuleiten [90]. Ausgangspunkt seines Vorgehens ist eine Analyse infrastruktureller und sozio-ökologischer Randbedingungen der Zielregion Subsahara-Afrika [92, S. 7-12]. Darauf aufbauend arbeitet er mit Design Thinking [93] sein Konzept aus, das im nächsten Schritt mit Hilfe von SCRUM [94] in einen Prototypen überführt wird. Klassische Methoden des Projektmanagements finden erst in der Serienentwicklung Anwendung [91]. Damit lässt sich SOLTES' Forschung als Weiterentwicklung der Fahrzeugkonzeptentwicklung für ein festgelegtes, elektrisches und frugales FK, das aCar, einordnen.

### Gruppe 3: Volkswagen Konzernforschung

Als dritte Forschungsgruppe ist die Volkswagen Konzernforschung zu nennen. Hervorzuheben sind HAHN [49], KUCHENBUCH [95–98] und TZIVANOPOULOS [99, 100]. HAHN beschäftigt sich mit der eigenschaftsbasierten Fahrzeugkonzeption insbesondere im Kontext von Elektromobilität, KUCHENBUCH forscht an packageoptimierten Elektrofahrzeugen und TZIVANOPOULOS greift KUCHENBUCH auf, um das Innenraumpackage teilautomatisierter FK zu integrieren.

HAHN [49] entwickelt eine Methode, um die eigenschaftsbasierte Fahrzeugkonzeption ganzheitlich mit ihren gegenseitigen Wechselwirkungen in der Grobkonzepterstellung anzuwenden. Sie verfolgt dabei das Ziel, die Komplexität der Fahrzeugkonzeptentwicklung mit ihren zahlreichen Freiheitsgraden durch die Formulierung statistischer Beziehungen zwischen wesentlichen Fahrzeugeigenschaften zu reduzieren. Auf diese Weise können schnell und effizient neue Konzepte abgeleitet werden. HAHN erforscht somit den Entwicklungsprozess, den sie anhand eines Anwendungsbeispiels aufzeigt. Für dieses Anwendungsbeispiel wählt sie ein Fahrzeug für Micromobilität für den urbanen Raum. Ihre Methode ist äquivalent für ICEV und für BEV anwendbar.

KUCHENBUCH [95–98] erarbeitet eine eigenschaftsorientierte Methodik zum Entwurf von FK für eine parametrisch lösungsneutrale BEV-Modellierung. Er nutzt ein parametrisches Package- und Eigenschaftsmodell, dessen Freiheitsgrade und modellierte Parameter in der Literatur recherchiert und auf BEV angepasst sind [96]. Für die Suche nach der optimalen Lösung implementiert er einen evolutionären Algorithmus, der in der Lage ist, das Lösungsspektrum abzusuchen und Paretofronten auszubilden [95]. Durch dieses Gesamtmodell können neue, konsistente Architekturen für BEV abgeleitet werden, ohne sich an existierenden ICEV-Architekturen orientieren zu müssen [97]. KUCHENBUCH ermöglicht somit eine parametrische Auslegung des FK eines BEV.

TZIVANOPOULOS [99, 100] betrachtet aufbauend auf die Forschung von KUCHENBUCH Innenraumkonzepte, die sich durch die Automatisierung der Fahrfunktion ergeben. Dabei kann er Fahrzeuge bis zum Automationslevel 3 (Tabelle 2.1) abbilden. TZIVANOPOULOS schlägt dafür ein Vorgehen von einem Insassenmodell über ein Innenraummodell zum Gesamtfahrzeugmodell vor [99]. Das Insassenmodell besteht aus einem Modell der Insassenanthropometrie und einem

Modell des Komfortempfindens. Das Innenraummodell dimensioniert mit den modellierten Insassen und deren Positionierung im Raum den benötigten Innenraumplatz [100]. Mithilfe der Modellierung weiterer fahrzeugkonzeptbestimmender Systeme, wie dem elektrischen Antriebsstrang, dem Laderaum und den Rädern, erarbeitet er in einem Gesamtfahrzeugmodell als Ergebnis die Maßketten des Exterieurs des entwickelten FK [99]. TZIVANOPOULOS präsentiert somit eine Methodik zur parametrischen Konzeptentwicklung für elektrische und teilautomatisierte Fahrzeuge.

### Gruppe 4: TUMcreate

Die letzte relevante Forschungsgruppe ist TUMcreate aus Singapur. In ihren Forschungsprojekten EVA [80] und DART [21] hat sie sich mit einem Elektrotaxi für tropische Megacities und mit einem autonomen Bus für den öffentlichen Personennahverkehr in Singapur beschäftigt. SCHICKRAM [101–104] fokussiert sich auf die Auslegung von BEV für Megacities, die gerade im asiatischen Raum stark zunehmen. SETHURAMAN [105–107] und PATHAK [108, 109] befassen sich mit verschiedenen Schwerpunkten mit der Auslegung autonomer elektrischer Busse.

SCHICKRAM [101–104] entwickelt ein Vorgehen, um BEV für Megacities und deren spezifische Anforderungen auslegen zu können [102, S. 28]. Dafür analysiert er die benötigte Batteriegröße und die Leistung der elektrischen Maschinen des auszulegenden BEV für 24 Megacities. Die Batteriegröße ermittelt er anhand einer Mobilitätsanalyse beruhend auf maximal und durchschnittlich zurückgelegten Wegstrecken und einer Nebenverbrauchsanalyse, die maßgeblich auf der Klimatisierung des Innenraums aufbaut [102, S. 39-44, 104]. Die Auslegung der elektrischen Maschinen basiert auf Durchschnitts- und Maximalgeschwindigkeiten in den Megacities [102, S. 44-45]. Mit Hilfe eines Clusterverfahrens, mit dem er die Megacities einteilt, schlägt er als Ergebnis seiner Arbeit vier FK vor. Von diesen erfüllt jeweils eines die Anforderungen jeder Megacity, ohne eine sonst übliche Übererfüllung bereitzustellen [102, S. 56-58]. Anhand eines definierten Elektromobilitätspotentialindex kann SCHICKRAM zusätzlich die positiven Effekte von Elektromobilität pro Megacity bestimmen [101, 102, S. 72-90, 103]. Zusammenfassend entwirft er eine Möglichkeit der Fahrzeugkonzeptentwicklung für BEV in Megacities.

SETHURAMAN [105–107] befasst sich mit der parametrischen Entwicklung autonomer elektrischer Busse mit einer Länge von 4 m bis 14 m. Dabei gliedert er den autonomen elektrischen Bus in die Subsysteme Antriebsstrang, Achsen, Karosserie, Innenraum und Sensorik [105, S. 51-56, 106]. Das FK, das durch das Packaging dieser Subsysteme entsteht, wird anschließend bezüglich seines Energieverbrauches, einer Kostenabschätzung, einer Analyse der resultierenden KWE und seines ökologischen Fußabdruckes mithilfe eines Life-Cycle-Assessments bewertet [105, S. 69-74, 107]. SETHURAMAN beschäftigt sich dementsprechend mit der Entwicklung von autonomen elektrischen Buskonzepten, nutzt aber das für die Pkw-Konzeptentwicklung übliche Vorgehen. Den Megatrend der geteilten Mobilität bezieht er im Kontext seiner Arbeit auf Busse, ohne sie in ihrer Gesamtheit (Abbildung 2.3) aufzugreifen. Die Busse sind dabei am ehesten mit Ridesharing-Shuttle vergleichbar, wobei eine zusätzliche Bindung an festen Haltestellen hinzukommt. Der zweite betrachtete Megatrend, die Automation, bedeutet für den Nutzer der Busfahrt keine Änderung seiner Mobilität, weil heutzutage keine relevante Interaktion zwischen ihm und dem Busfahrer stattfindet.

PATHAK [108, 109] greift die Auslegung von SETHURAMAN auf und erweitert sie um KWE des Bustransports. Diese sind beispielsweise die Wartezeit an einer Bushaltestelle, eine Simulation der Fahrpläne und Routen sowie eine Zuordnung der einzelnen Busse auf diese Parameter zur Flotteneinteilung. Auf diese Weise kann er die benötigten Reichweiten, das erwartete

Fahrgastaufkommen, Ladezeiten und anhand der KWE die Fahrgastzufriedenheit in die Simulation integrieren [108, 109]. Als Ergebnis erhält er Aussagen zu benötigten Fahrzeugflotten für die betrachteten Routen und die gewünschten KWE [108]. PATHAK beseitigt somit die Schwäche aus SETHURAMANS Arbeit, bei der nach der Pkw-Konzeptentwicklung vorgegangen wurde. Er integriert wesentliche das Buskonzept beeinflussende Parameter in die Auslegung elektrischer autonomer Busse.

## Fazit

Tabelle 2.2 fasst die erwähnten Autoren zusammen, um einen Gesamtüberblick über die bestehende Forschung zu geben. Eine Auswertung der Tabelle findet im nachfolgenden Kapitel, der Forschungslücke, statt. In Tabelle 2.2 werden die einzelnen Autoren mithilfe von Harveyballs bezüglich der drei berücksichtigten Megatrends und der Betrachtung von FK und Entwicklungsprozess bewertet. Die Gestaltung der Harveyballs ist folgendermaßen definiert:

Für den Kontext der Megatrends bedeutet ○, dass der entsprechende Megatrend nicht betrachtet wird, ◐, dass er in einer Vorstufe oder in Teilaspekten Teil der Forschung ist, und ●, dass dieser Megatrend in die Zielsetzung der Arbeit des jeweiligen Autors integriert ist. Bei den Forschungsgegenständen FK und Entwicklungsprozess steht ○ für keine Betrachtung/ keinen Neuigkeitswert, ◐ für eine Anwendung auf feststehenden Inhalt und ● für eine Herleitung des Inhalts.

Tabelle 2.2: Bewertung der Literatur im Kontext dieser Arbeit

Autor		Kontext			Forschungsgegenstand	
		Elektrisch	Autonom	Geteilt	Fahrzeugkonzept	Entwicklungsprozess
Gruppe 1	Ziemann [41]	○	○	○	○	●
	Deubel [45]	○	○	○	○	●
	Prinz [81]	○	○	○	●	◐
	Bihse [82, 83]	○	○	○	●	◐
Gruppe 2	Wiedemann [77, 84]	●	○	○	●	●
	J. Fuchs [85–87]	●	○	○	●	●
	Matz [88, 89]	●	○	◐	●	●
	Soltes [90–92]	●	○	○	◐	●
Gruppe 3	Hahn [49]	●	○	○	◐	●
	Kuchenbuch [95–98]	●	○	○	●	●
	Tzivanopoulos [99, 100]	●	◐	○	●	●
Gruppe 4	Schickram [101–104]	●	○	○	●	●
	Sethuraman [105–107]	●	◐	◐	●(Bus)	◐
	Pathak [108, 109]	●	◐	◐	●(Bus)	●

### 2.3 Forschungslücke

Basierend auf der Beschreibung der konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklung (Kapitel 2.1) und der Analyse der Auswirkungen von CASE (Kapitel 2.2.1) zeigt sich Forschungsbedarf für die Fahrzeugkonzeptentwicklung im Kontext zukünftiger Mobilität. In diesem weitreichenden Forschungsfeld gibt es eine nennenswerte Anzahl an Forschern, die sich mit Teilaspekten des gesamten Themenkomplexes beschäftigen (Kapitel 2.2.2). Die Zusammenfassung dieser bestehenden Forschung in Tabelle 2.2 offenbart eine Lücke der gemeinsamen Betrachtung von elektrischer, autonomer und geteilter Mobilität in der Definition des FK und in dessen Entwicklung.

Dies bedeutet, dass Einzelaspekte besonders in Bezug auf elektrische Mobilität erforscht sind, ein Prozess, der alle Megatrends berücksichtigt, aber nicht vorhanden ist. Insbesondere muss dieser Prozess zur Entwicklung autonomer, elektrischer und geteilter FK folgendes erfüllen:

- Er muss einen batterieelektrischen Antriebsstrang mit seinen Komponenten simulieren und auf BEV-spezifische Anforderungen und KWE zurückgreifen.
- Des Weiteren müssen ausführbare Sekundärtätigkeiten, die einen großen Einfluss auf das FK haben werden, einen zentralen Baustein der Fahrzeugkonzeptentwicklung darstellen.
- Ebenso muss die Wandlung der Entwicklung eines Produktes für einen Kunden, der als Privatperson das Fahrzeug kauft, besitzt, warten lässt, betreibt und nutzt, hin zu einem Nutzer geteilter Mobilität Beachtung finden.
- Als letztes müssen die Freiheitsgrade in der Packageentwicklung, die durch die autonome Fahrfunktion geschaffen werden, adressiert und neue Gewerke, wie Sensorik und fahrzeugkonzeptbestimmende Software, aufgenommen werden.

Diese Forschungslücken haben ihre Lösung in einem Prozess, der die Teilaspekte der offenen Punkte, die durch CASE aufgestellt werden, bündelt.



# 3 Gesamtkonzept

Das Gesamtkonzept zur Beantwortung der Forschungsfrage ist in einer Veröffentlichung [110] detailliert hergeleitet und beschrieben (Vorarbeiten in [111, 112]). Die Zielsetzung (Kapitel 3.1) definiert den Startpunkt. Die Methoden der Produktkonzeptentwicklung (Kapitel 3.2) bieten die theoretische Grundlage für das Gesamtverfahren (Kapitel 3.3), das den Prozess, der aus dieser Arbeit hervorgeht, herleitet.

## 3.1 Zielsetzung

Zur Herleitung des Prozesses zur Entwicklung autonomer, geteilter und elektrischer FK bedarf es einer Neudefinition des Begriffes FK. Die Definition des FK nach ACHLEITNER ET AL. [28, S. 140-141] (Kapitel 2.1) berücksichtigt den Megatrend elektrisch nur teilweise und lässt keine Einbeziehung der Megatrends autonom und geteilt zu. Demensprechend wird in dieser Arbeit ein FK aufbauend auf ACHLEITNER ET AL. [28, S. 140-141] auf folgende Weise definiert:

*Das FK ist der allgemeine Entwurf einer Produktidee. Dieser Entwurf umfasst nicht nur die Hardwarekomponenten wie Antriebsstrang, Sensorik, Karosserie, Innenraumgestaltung und die daraus resultierenden Hauptdimensionen, sondern auch Softwaremodule, die erste Anforderungen und Eigenschaften im Bereich Fahrfunktionen beschreiben.*

Auf der Basis einer so erweiterten Betrachtung eines FK bedarf es einer angepassten Fahrzeugkonzeptentwicklung, um die Forschungslücke füllen zu können. Hierfür soll zur systematischen Ableitung des Prozesses nachfolgend eine Analyse der Methodiken der Produktkonzeptentwicklung erfolgen, um daraus das Gesamtverfahren zu erschließen.

## 3.2 Methodiken zur Produktkonzeptentwicklung

Es existiert eine Vielzahl an Produktkonzeptentwicklungsmethoden. Zur näheren Beschreibung der einzelnen Methoden sei auf die jeweils angegebene Literatur und für die Vorauswahl auf die Vorveröffentlichung [110] verwiesen. Für das Grundgerüst dieser Arbeit scheinen die sechs Methodiken „Design for X“ (am Beispiel Six Sigma) [113, S. 124-167, 114, 115], „Münchner Vorgehensmodell“ [33, S. 46-54], „Axiomatic Design“ [116–119], „V-Modell“ [120, 121], „Design Thinking“ [93] und „Characteristics-Properties Modeling“ [122–124] in einer Vorauswahl am geeignetsten.

Die Vorveröffentlichung [110] präsentiert als Anforderungen an die Methodik die Integration der konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklung (Kapitel 2.1), die Kunden-/ Nutzerorientiertheit, die Möglichkeit der Betrachtung von Hardware- und Softwarekomponenten, eine Automatisierung des Prozessablaufes sowie quantitativ beschriebene Ergebnisse. Tabelle 3.1 zeigt den

### 3 Gesamtkonzept

Vergleich der Entwicklungsmethoden anhand dieser Anforderungen. Dabei bewerten die Harveyballs eine Entwicklungsmethode für die jeweilige Anforderung nach folgendem Muster: ● vollständig geeignet, ● größtenteils geeignet, ◐ teilweise geeignet, ◑ geringfügig geeignet, ○ nicht geeignet.

Tabelle 3.1: Vergleich der Entwicklungsmethoden nach [110]

	konventionelle Fahrzeugkonzeptentwicklung	Nutzerorientierung	Hardware & Software	Automatisierung	Quantitative Ergebnisse
Design for X (Six Sigma)	◑	◐	●	◑	●
Münchner Vorgehensmodell	◐	●	◐	○	◐
Axiomatic Design	●	●	●	●	●
V-Modell	●	◐	●	◐	●
Design Thinking	◑	●	●	○	◐
Characteristics-Properties Modeling	◐	●	◐	●	●

Mit seinen vier Domänen „Nutzerbedürfnisse“, „Funktionale Anforderungen“, „Auslegungsparameter“ und „Prozessvariablen“ stellt sich das Axiomatic Design (Abbildung 3.1) als am geeignetsten heraus. Für die Fahrzeugkonzeptentwicklung kann dabei der letzte Schritt „Prozessvariablen“ ausgeklammert werden, weil die Produktion nach ihr im Produktentwicklungsprozess geplant wird (Abbildung 2.1).

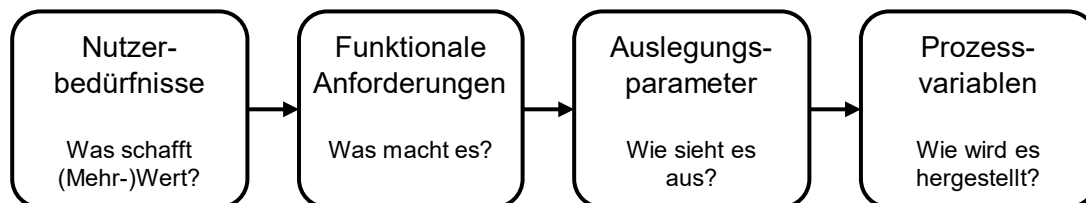


Abbildung 3.1: Axiomatic Design nach [116]

Die Domäne „Auslegungsparameter“ ist im klassischen Fahrzeugkonzeptentwicklung (Abbildung 2.2) durch die beiden Schritte „Komponentenauswahl & -dimensionierung“ und „Fahrzeugkonzeptdefinition“ gegeben. Ersteres bezieht sich auf die Komponentenebene und zweiteres auf die Gesamtfahrzeugebene. Die Domäne „Funktionale Anforderung“ ist vergleichbar mit den KWE, wobei eine größere technische Fokussierung vorliegt. Die Domäne „Nutzerbedürfnisse“ bezieht sich nicht mehr auf das Produkt, sondern beschreibt den Nutzer des Fahrzeugs und dessen Bedürfnisse. Diese zusätzliche Komponente ermöglicht es, in den konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklung Aspekte des Megatrends der geteilten Mobilität zu integrieren, weil der Gesamtprozess nicht mehr nur auf den Kunden (Besitzer) des Fahrzeugs, sondern auf den Nutzer ausgerichtet ist. Mit diesem Vergleich der Methodiken zur Produktkonzeptentwicklung und der Identifikation des Axiomatic Design als Grundgerüst wird das Gesamtverfahren nachfolgend hergeleitet.

### 3.3 Gesamtverfahren

Eine abgewandelte Form des Axiomatic Design bildet die Grundlage des Gesamtverfahrens (Abbildung 3.2). Dabei ist der Wortlaut an sektorspezifische Begriffe des Automobilbaus angepasst und es sind neue Bausteine zur Berücksichtigung der genannten Megatrends hinzugefügt.

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, wird aufgrund der Megatrends CASE nicht ein privates FK alle Bedürfnisse eines Nutzers abdecken, wie es heutzutage üblich ist. Die KWE als Startpunkt der klassischen Fahrzeugkonzeptentwicklung beziehen sich auf ein FK, weshalb in einem neuen vorgelagerten Prozessbaustein nutzerorientierte Mobilitätsbedürfnisse als Ausgangspunkt dienen müssen. Damit wird die Mobilität des Nutzers in den Vordergrund gestellt und eine Möglichkeit geschaffen, eine Fahrzeugflotte auszulegen, die alle drei Fahrzeugtypen geteilter Mobilität (Abbildung 2.3) beinhaltet und somit die benötigte Mobilität für eine Nutzergruppe bereitstellen kann. Dies ist ein elementarer Unterschied zur klassischen Fahrzeugkonzeptentwicklung, die einem Kunden ein FK nur zum Kauf auslegen kann.

Zu diesen nutzergebundenen Mobilitätsbedürfnissen gehören das Mobilitätsverhalten als Primärtätigkeit, gewünschte Nebentätigkeiten während der Fahrt als Sekundärtätigkeit und mobilitätsrelevante Charaktereigenschaften, wie Sicherheitsbedürfnis oder Investitionsbereitschaft. Die KWE sind aus diesen Mobilitätsbedürfnissen abzuleiten und definieren die Eingangsgröße für die Auslegung eines spezifischen FK, das Teil der gesamten Fahrzeugflotte ist. Damit behalten die KWE ihre inhaltliche Rolle aus der konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklung bei, auch wenn sie nicht mehr als Startpunkt dienen. Lediglich das Portfolio der KWE ändert sich aufgrund des von CASE herbeigeführten Wandels der Sicht einer Person auf ein FK. Deshalb bezieht sich nachfolgend der Begriff Nutzer auf alle Mobilitätsbedürfnisse einer Person, während sich ein Kunde auf das Fahrzeug bezieht, dessen Insasse er zu diesem Zeitpunkt oder zu diesem Zweck ist.

Die technischen Eigenschaften (TE) werden aus den KWE abgeleitet. Die in einer Nominalskala vorliegenden KWE werden in eine technisch physikalische und lösungsneutrale Beschreibung der TE umgewandelt. Dies ermöglicht die Berechnung der Auslegungsparameter, die aus Hard- und Softwarekomponenten bestehen und unter anderem Topologie- und Komponententechnologieentscheidungen herbeiführen. Das FK bildet sich aus dem Packageplan, der die Positionierung der zu modellierenden Hardwarekomponenten im Fahrzeug festlegt, sowie einer Anforderungsliste, die sich aus den Softwarekomponenten zusammensetzt. Auf diese Weise können alle zur Erfüllung der nutzergebundenen Mobilitätsbedürfnisse benötigten FK ausgelegt werden, um deren vollständige Erfüllung zu erreichen. Abbildung 3.2 veranschaulicht das Gesamtverfahren dieser Arbeit:

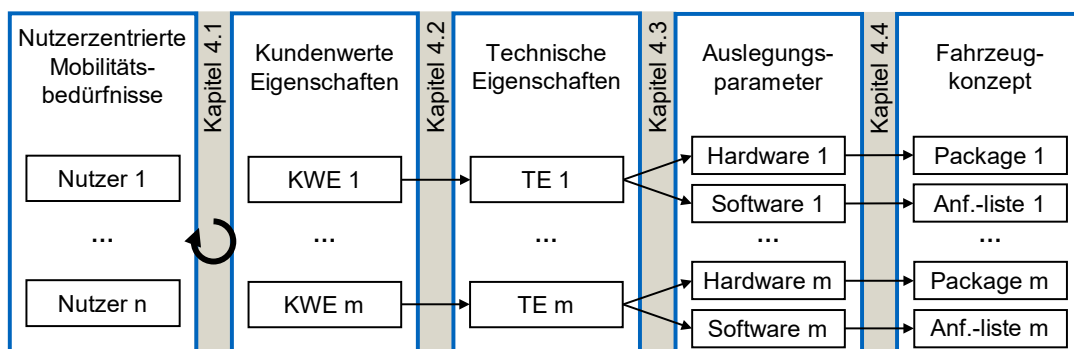


Abbildung 3.2: Gesamtverfahren nach [110]

### 3 Gesamtkonzept

---

Kapitel 4 geht im Detail auf die einzelnen Schritte ein. Zusammengefasst dient ein Portfolio der Mobilitätsbedürfnisse von  $n$  Nutzern als Ausgangspunkt des Gesamtvorgehens. Da es nicht möglich ist, für jedes individuelle Bedürfnis eines jeden Nutzers ein eigenes Fahrzeug zu entwerfen, übersetzt der erste Schritt (Kapitel 4.1) diese in KWE von  $m$  FK. Dabei ist  $m$  kleiner als die Summe aller individuellen Bedürfnisse der  $n$  Nutzer. Ab diesem Prozessbaustein kann jedes FK unabhängig betrachtet werden, weil das weitere Vorgehen auf die einzelnen FK bezogen ist und nicht auf die Nutzer, wie es der neue erste Prozessbaustein ist. Dementsprechend bleibt die Anzahl der FK im weiteren Vorgehen  $m$ .

Der zweite Prozessschritt (Kapitel 4.2) bildet aus den KWE die TE eines FK. Dies ist durch das Vorliegen der KWE in einer Nominalskala notwendig, um zum einen die Kundenbewertung in Noten darzustellen und zum anderen auf technische Weise nicht vergleichbare Eigenschaften gegenüberzustellen. Die TE bilden die technisch physikalische Beschreibung der KWE. Die Auswahl der Auslegungsparameter in Form von Anforderungen an die Hardware- und Softwarekomponenten sowie unterstützende Topologie- und Komponententechnologieentscheidungen stellt den dritten Prozessschritt (Kapitel 4.3) dar.

Bis zu diesem Prozesszeitpunkt werden die Komponenten als voneinander unabhängig betrachtet, solange sie nicht gemeinsam zur Erfüllung einer TE beitragen. Der letzte Prozessschritt (Kapitel 4.4) legt die Hardwarekomponenten aus und führt sie im Packageplan zusammen. Die Softwarekomponenten werden in der Anforderungsliste gebündelt. Gemeinsam in ihrer Gesamtheit definieren Packageplan und Anforderungsliste das FK.

# 4 Detaillierung des Vorgehens

Der Gesamtprozess ist in seiner methodischen Herleitung und theoretischen Abstraktion in Kapitel 3 skizziert. Für eine Entwicklung von autonomen, geteilten und elektrischen FK ist eine Detaillierung der einzelnen Teilschritte notwendig. Die folgenden Unterkapitel 4.1 bis 4.4 gehen anhand der Gliederungspunkte „Zielsetzung“, „Vorgehen“, „Ergebnisse“, „Validierung bzw. Plausibilisierung“ sowie „Diskussion und Ausblick“ auf die vier Prozessschritte zwischen den fünf Prozessbausteinen ein (Abbildung 3.2).

Dabei beschreibt die Zielsetzung für jedes der vier Unterkapitel die Ausgangssituation und das gewünschte Ergebnis des jeweiligen Schrittes. Im Vorgehen wird die verwendete Methodik durch methodenspezifische Literatur hergeleitet und die Implementierung, die im Kontext dieser Arbeit stattgefunden hat, beschrieben. Die Ergebnisse präsentieren das Zwischenergebnis des jeweiligen Schrittes. In der Validierung bzw. Plausibilisierung werden das gewählte Vorgehen und die erzielten Ergebnisse mit entsprechenden Methoden geprüft. Die Diskussion und der Ausblick schließen durch eine kritische Betrachtung den jeweiligen Schritt ab.

## 4.1 Nutzerzentrierte Mobilitätsbedürfnisse → Kundenwerte Eigenschaften

Der erste Schritt ist zur konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklung (Abbildung 2.2) neuartig und ermöglicht die Einbeziehung verschiedener Mobilitätsdienstleistungen zur vollständigen Abdeckung geteilter Mobilität, indem der Nutzer mit seinen Bedürfnissen als Eingangsgröße dient. Dabei transformiert dieser erste Schritt die nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnisse in KWE. Die Gliederungspunkte „Zielsetzung“ und „Vorgehen“ beruhen mit Ausnahme der Herleitung der Nutzerszenarien auf einer Vorveröffentlichung [125] sowie der Vorarbeit von ZÄHRINGER [112].

### 4.1.1 Zielsetzung

Um aus den nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnissen produktbezogene KWE der FK abzuleiten, ist es notwendig, die nutzerzentrierten Bedürfnisse eines Mobilitätssystems von den KWE eines konkreten FK zu unterscheiden. Für eine systematische Herleitung dieses Prozessschrittes sollen zuerst dessen Zielsetzung (Vorarbeiten in [112, 126]) sowie die daraus abgeleiteten Eingangs- (Vorarbeiten in [112, 127]) und Ausgangsgrößen (Vorveröffentlichung in [35] und Vorarbeiten in [112, 128–131]) definiert werden. Der erste Prozessschritt des Gesamtvorgehens (Abbildung 3.2) besteht aus den folgenden zwei Teilzielsetzungen:

- Die Anzahl der benötigten FK für einen gewünschten Erfüllungsgrad der Nutzerbedürfnisse muss minimiert werden, um nicht für jedes Einzelbedürfnis ein separates FK zu entwerfen.

## 4 Detaillierung des Vorgehens

- Die Mobilitätsbedürfnisse der Nutzer müssen in KWE umgewandelt werden, um FK für heterogene Nutzergruppen und deren Mobilitätsbedürfnisse anstelle einer kundenorientierten Persona zu entwerfen.

Der Startpunkt, die Bedürfnisse von Nutzergruppen, besteht aus dem Primärbedürfnis nach Mobilität, auf dem die Nutzung eines Fahrzeuges beruht, den Sekundärbedürfnissen, die aufgrund des Wegfalls der Fahraufgabe während der Fahrt befriedigt werden können, sowie der Anzahl der dafür gewünschten Passagiere [35] und dem persönlichen Charakter eines Nutzers, der sich auf dessen Nutzungsverhalten von Mobilität und Fahrzeugen auswirkt [132, 133].

In der Zusammenstellung des Portfolios dieser Nutzerbedürfnisse können sich OEM, welche die FK auslegen, oder Mobilitätsanbieter, die sich die FK für ihre Flotte zulegen, anhand ihres Anforderungsprofils unterscheiden und abgrenzen, wie es heutzutage bei den KWE geschieht [38, 40, 41, S. 133-153]. Diese Arbeit nutzt zur Darstellung der Ergebnisse ein Portfolio (Anhang A) aus den Primärtätigkeiten „generelles Mobilitätsbedürfnis“, „städtische Fahrten“, „Überlandfahrten“, „Autobahnfahrten“, aus den Sekundärtätigkeiten „(menschliches) Selbstfahren“, „Entspannen“, „Arbeiten“, „Schlafen“, der je Sekundärtätigkeit gewünschten Anzahl an Passagieren sowie „Beladung“ und aus den Charaktereigenschaften „Bereitschaft für MaaS“, „Investitionsbereitschaft“ und „Sicherheitsbedürfnis“. Die Begriffe Primär- und Sekundärtätigkeiten werden in dieser Arbeit verwendet, weil die Fortbewegung bei Mobilität das Primärbedürfnis ist. Durch den Wegfall der Fahraufgabe kann aber ein zusätzliches Sekundärbedürfnis in Form von Nebentätigkeiten befriedigt werden. Für die Herleitung dieses Portfolio sei auf die Vorveröffentlichung [125] und die Vorarbeit [112] verwiesen.

Für belastbare Ergebnisse dienen auf Basis von Literatur erstellte Nutzerszenarien (Anhang B) statt selbst gewählter Use Cases als Ausgangslage. Die Nutzerszenarien sind aus Studien [134–137] und wissenschaftlichen Veröffentlichungen [138–143] zu AV sowie statistischen Bevölkerungsdaten in Deutschland [144–153] abgeleitet. Die detaillierte Erarbeitung der Nutzerszenarien ist in einer Vorarbeit [127] beschrieben.

In dieser Arbeit dient das Nutzerszenario einer vierköpfigen Familie mit Mutter, Vater, Jugendlichen und Kind als Anschauungsbeispiel (Abbildung 4.1). Anhand dessen werden in der gesamten Arbeit die Ergebnisse der Teilschritte aufbereitet.

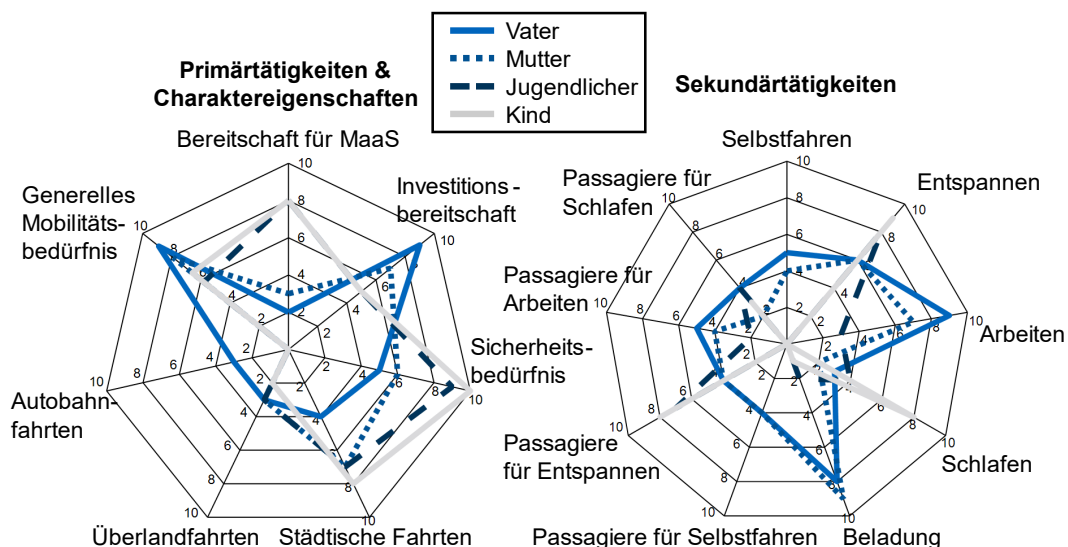


Abbildung 4.1: Nutzerszenario Familie nach [127]

Als Ausgang dieses ersten Prozessschrittes sollen KWE eines FK stehen. Dafür ist es notwendig, deren Portfolio zu definieren. Für dieses Portfolio orientiert sich die vorliegende Arbeit an einer Vorveröffentlichung [35], welche die KWE in gleichbleibende, sich ändernde und zu konventioneller FK neuartige einstuft. Das Portfolio, das in dieser Arbeit zur Darstellung verwendet wird, besteht aus 27 KWE (Anhang D), die für gleichbleibende KWE aus [38, 40, 41, S. 133-153, 49, 84] sowie für sich ändernde und neuartige KWE aus [62, 134, S. 18, 154, S. 13, 155, S. 14, 156–158] hergeleitet sind. Die 27 KWE sind in die sechs Gruppen „Fahrtechnik“, „Ergonomie“, „Sicherheit“, „Alltagstauglichkeit“, „Fahrstil“ und „Luxus“ eingeteilt.

### 4.1.2 Vorgehen

Die beiden zuvor definierten Teilziele bieten eine methodische Aufteilung in zwei Teilprozessschritte mit einem Zwischenbaustein „Fahrzeuggebundenes Mobilitätsangebot“ an (Vorveröffentlichung in [125] und Vorarbeit in [112]). Dieser Zwischenbaustein beschreibt jedes FK in der Terminologie der Nutzerbedürfnisse. Zur besseren Abgrenzung werden die Fahrzeuge bis zu diesem Teilschritt Derivate genannt und nachfolgend, sobald sie in der fahrzeugspezifischen Terminologie beschrieben werden, als FK bezeichnet.

Um die Anzahl der erforderlichen Derivate bei gegebenem Erfüllungsgrad der Nutzerbedürfnisse zu minimieren, wird im ersten Teilprozessschritt eine Optimierung durchgeführt. Diese Optimierung ergibt ein mehrdimensionales Problem, dessen Anzahl an Dimensionen nicht bekannt ist, weil diese von der Anzahl der benötigten Derivate abhängt. Es wird ein Optimierungsverfahren benötigt, das seine Dimensionen selbständig erweitert, bis das optimierte fahrzeuggebundene Mobilitätsangebot dem gewünschten Grad der Nutzererfüllung entspricht. Daraus ergibt sich die minimale Anzahl der Derivate für den gegebenen Erfüllungsgrad der Nutzerbedürfnisse, was in der weiteren Bearbeitung zu einer minimalen Anzahl von FK führt.

Anschließend müssen im zweiten Teilprozessschritt aus dem fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebot die KWE abgeleitet werden. Dies führt zu einer multikriteriellen Entscheidungsfindung (MCDM), weil beide Größen in mehrdimensionaler und qualitativer Form vorliegen. Das Vorgehen zur Lösung der beiden Teilzielsetzungen erfordert daher eine Kombination aus einem Optimierungsverfahren und einem MCDM-Verfahren (Abbildung 4.2).

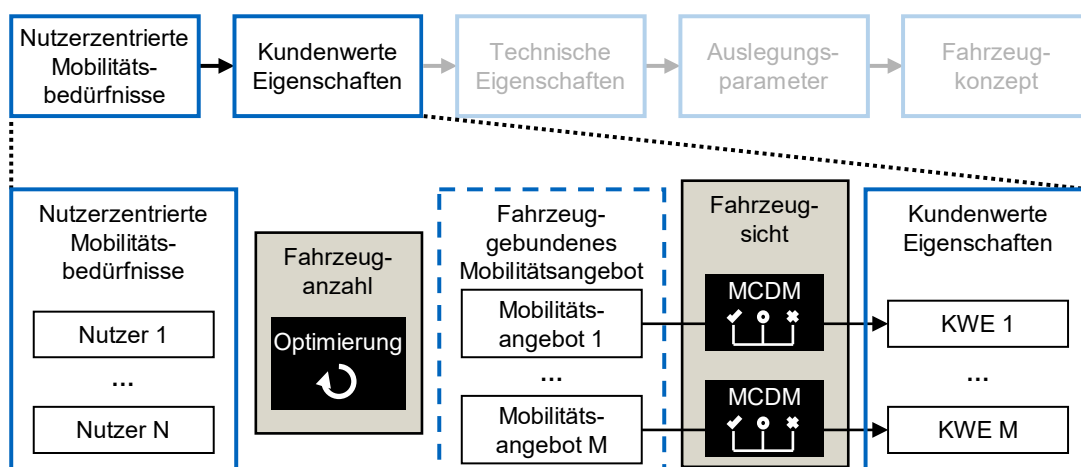


Abbildung 4.2: Vorgehen zur Ableitung von kundenwertigen Eigenschaften aus nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnissen nach [125]

## 4 Detaillierung des Vorgehens

---

Eine detaillierte Herleitung der passenden Optimierungsmethode und des MCDM-Verfahrens findet sich in der Vorveröffentlichung [125] und der Vorarbeit [112]. Nachfolgend soll auf die Kernaspekte eingegangen werden. Hierfür werden zuerst die Methodiken der beiden Teilprozessschritte hergeleitet, um anschließend auf deren Implementierung einzugehen. Für eine vollständige Beschreibung sei auf die Vorveröffentlichung [125] verwiesen.

### Methodik

Das erste Teilziel der Minimierung der Anzahl der benötigten Derivate zur Erreichung des vom Konzeptingenieur gewünschten Erfüllungsgrades der Nutzerbedürfnisse erfordert ein Optimierungsverfahren. Dieses ist so zu gestalten, dass bei gegebener Anzahl an Derivaten der maximale Erfüllungsgrad der Nutzerbedürfnisse berechnet wird. Über Iterationsschleifen kann die geringste Anzahl an Derivaten identifiziert werden, die durch die optimierten Ausprägungen den gewünschten Erfüllungsgrad der Nutzerbedürfnisse erreicht. Dies stellt eine mehrdimensionale Ein-Ziel-Optimierung dar [159, S. 4-6]. Die Designvariablen sind die Ausprägungen eines Derivates. Bei mehreren Derivaten steigt die Anzahl der Designvariablen linear mit der Anzahl an Derivaten. Der Erfüllungsgrad der Nutzerbedürfnisse stellt das Optimierungsziel dar. Nebenbedingungen schränken den Lösungsraum ein, um die physikalische Machbarkeit der Lösung zu garantieren.

Für globale Optimierungsprobleme unterscheiden COELLO ET AL. [159, S. 21] drei Lösungsverfahren: enumerative, deterministische und stochastische. Hochdimensionale Optimierungsprobleme, die Unstetigkeiten und lokale Extreme aufweisen, wie sie die meisten realen Probleme beinhalten, sind dabei am besten von stochastischen Verfahren lösbar [159, S. 21-23]. Ein solches Problem liegt bei Minimierung in dieser Arbeit vor. Je höher der Erfüllungsgrad der Nutzerbedürfnisse gewählt wird, desto mehr Derivate müssen bereitgestellt werden und desto hochdimensionaler ist das Optimierungsproblem.

Genetische Algorithmen sind das stochastische Optimierungsverfahren, das am weitesten verbreitet ist. Sie basieren auf natürlichen Evolutionsprozessen und können hochdimensionale Optimierungsprobleme lösen [159, S. 33]. Genetische Algorithmen werden nachfolgend näher beschrieben. Für weitere Optimierungsverfahren sei auf COELLO ET AL. [159] verwiesen.

Genetische Algorithmen bestehen aus fünf sequenziellen und iterativen Elementen (Abbildung 4.3), die nachfolgend anhand der von NISSEN [160, S. 37-43] vorgestellten Grundvarianten erörtert werden. Zur Initialisierung bildet das erste Element eine Ausgangspopulation mit zufälligen Individuen ( $a_1, \dots, a_i$ ). Das zweite Element bewertet diese Individuen aufgrund des Fitnesswertes ( $\Phi(a_1), \dots, \Phi(a_i)$ ). Die Auswahl der Individuen als Eltern der nächsten Generation ( $a_{E,1}, \dots, a_{E,j}$ ) anhand des Fitnesswertes stellt das dritte Element dar.

Auf dieser Grundlage bildet die Erzeugung von Nachkommen das vierte Element. Dazu werden die Elemente Selektion, Crossover, Mutation und Bewertung so lange wiederholt, bis eine vollständige Population vorhanden ist. In der Selektion werden zwei Individuen als Eltern ausgewählt ( $a_{E,1}$  &  $a_{E,2}$ ) und durch das Crossover miteinander am zufälligen Crossover-Punkt zu den Kindern ( $a_{K,1}$  &  $a_{K,2}$ ) verknüpft. Die finalen Kinder ( $a_{K,1}$  &  $a_{K,2}$ ) entstehen durch zufällige Mutation einzelner Designvariablen der zuvor verknüpften initialen Kinder ( $a_{K,1}$  &  $a_{K,2}$ ). Die Bewertung ( $\Phi(a_{K,1})$  &  $\Phi(a_{K,2})$ ) bestimmt, ob die neu entstandenen Individuen die bisherigen Individuen aufgrund besserer Fitnesswerte in der Population ersetzen. Final prüft das Abbruchkriterium, ob die momentane Population das Optimierungsproblem löst oder ob das Vorgehen ab dem dritten Element wiederholt wird. Das beste Individuum der Population repräsentiert bei



erfolgreichem Passieren des Abbruchkriteriums die Lösung. Für eine detaillierte Beschreibung des Ablaufes des genetischen Algorithmus sei auf NISSEN [160, S. 33-43] verwiesen.

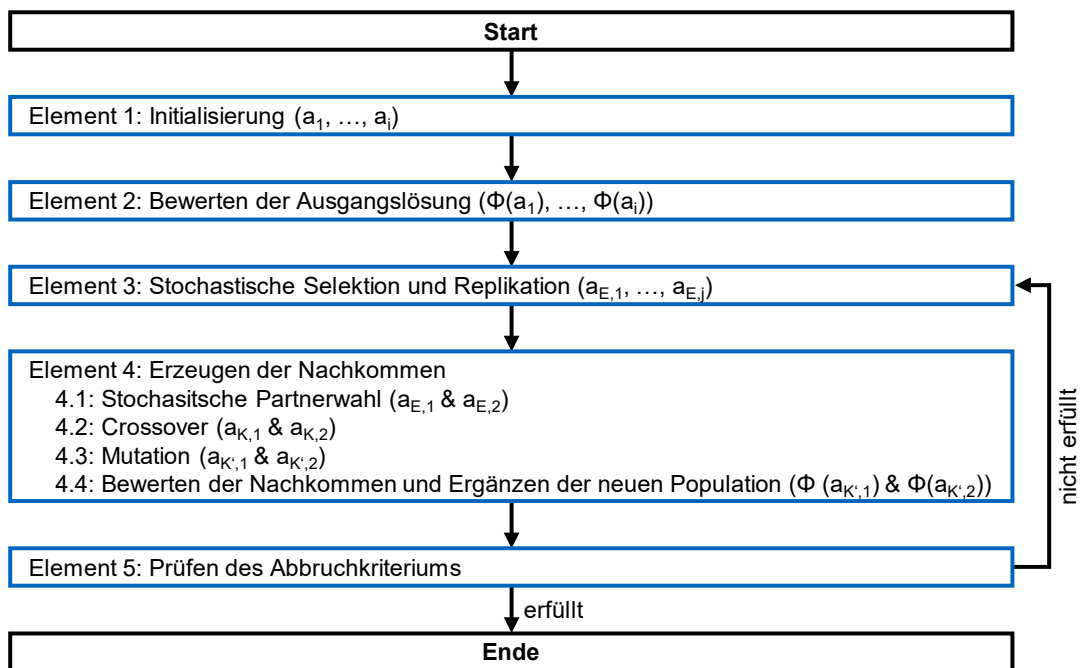


Abbildung 4.3: Ablauf genetischer Algorithmen nach [160, S. 37-43]

Für das zweite Teilziel der Transformation des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes in KWE ist ein MCDM-Verfahren notwendig. BRÖNNER [161, 162, S. 22] vergleicht auf Basis von [163–165, 166, S. 7-8] für eine Problemstellung ähnlicher Art infrage kommende MCDM-Verfahren anhand der Kriterien „Gegenseitige Beziehungen“, „Gewichtung der Kriterien“, „Notwendige Datenbasis“ und „Notwendiges Systemwissen zur Entscheidungsfindung“. Er identifiziert die Fuzzylogik als passendes MCDM-Verfahren. Eine Vorarbeit [167] bestätigt für die Problemstellung der vorliegenden Arbeit die Auswahl der Fuzzylogik. Des Weiteren ist die Abbildung linguistischer Abhängigkeiten zur Entscheidungsfindung eine der Stärken der Fuzzylogik [168] und Grundlage der Transformation des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes in KWE, weil deren Ausprägungen in Nominalskala vorliegen und menschlicher linguistischer Bewertung (gering - mittel - hoch) entsprechen.

Ein auf Fuzzylogik (Abbildung 4.4) basierendes Modell hat das Ziel, den Sachverhalt, den es erfassen soll, mathematisch abzubilden. In herkömmlichen Anwendungen werden exakte Eingabewerte, die als scharfe Werte bezeichnet werden, in einen linguistischen Wertebereich übersetzt (Fuzzifizierung) [169, S. 163]. In der folgenden Simulation werden diese linguistischen Übersetzungen in einen linguistischen Wertebereich mittels WENN...DANN...-Regeln überführt (Interferenz) und anschließend in einen Ausgabewert übersetzt (Defuzzifizierung) [170, S. 10, 171, S. 86].

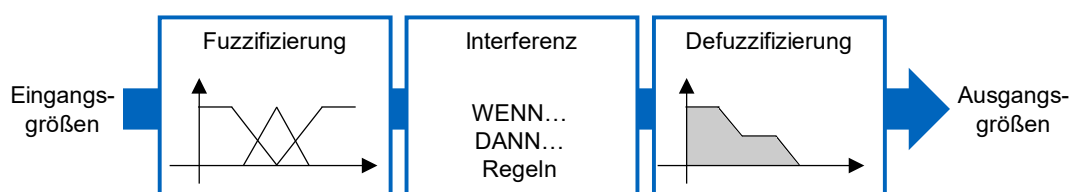


Abbildung 4.4: Fuzzylogik nach [171, S. 79]

## 4 Detaillierung des Vorgehens

---

Diese WENN...DANN...Regeln, die den Hauptteil der Fuzzylogik bilden, haben die Form von Formel (4.1), wobei  $x$  der Eingangsvektor und  $y$  der Ausgangsvektor ist, dargestellt durch linguistische Werte  $L_j^x$  im Eingang und  $L_j^y$  im Ausgang.

$$\text{Wenn } x = L_j^x \text{ dann } y = L_j^y \quad (4.1)$$

Im Rahmen der Fuzzifizierung werden numerische Werte des Eingangsvektors  $x$ , z.B. 100 km/h, in sprachliche Ausdrücke wie "schnell" übersetzt. Diese Übersetzung erfolgt durch Zugehörigkeitsfunktionen, die Werte zwischen 0 (keine Zugehörigkeit) und 1 (volle Zugehörigkeit) [170, S. 6] annehmen können. Diese Funktionen werden auf den Wertebereich  $[0, 1]$  normiert und auf Basis von Expertenaussagen als Dreiecks-, Rampen- oder Stufenfunktionen modelliert. Zur Verknüpfung von Fuzzymengen werden üblicherweise die linguistischen Verknüpfungen "und", „nicht“ sowie „oder“ verwendet [170, S. 38]. Diese werden durch mathematische Operatoren, wie den Maximum- oder Minimum-Operator, in die Fuzzylogik integriert. Detaillierte Analysen der Auswahl dieser Operatoren sind in ZIMMERMANN [169], TRAEGER [171] und BOTHE [170] beschrieben. In der Praxis werden Minimaloperatoren für die "Und"-Verknüpfung und Maximaloperatoren für die „Oder“-Verknüpfung aufgrund ihres geringen Rechenaufwands verwendet [171, S. 89]. Methoden zur Defuzzifizierung sind z.B. die Schwerpunkts-, die Singleton- und die mittlere Maximalwertmethode [169, S. 234-235, 170, S. 12-13, 171, S. 104-105].

### Implementierung

Die Umsetzung des genetischen Algorithmus zur Minimierung der benötigten Anzahl an Derivaten und Berechnung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsbedarfs soll nachfolgend erläutert werden. Die detaillierte Beschreibung der Modellierung findet sich in der Vorveröffentlichung [125].

Aus den Nutzerbedürfnissen mit 16 Variablen je Nutzer als Eingangsgrößen sollen 13 Variablen zur Beschreibung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsbedarfs (Anhang C) hergeleitet werden. Die Diskrepanz in der Anzahl an Variablen entsteht durch die Personenanzahl der vier Sekundärtätigkeiten für Passagiere, die durch die Variable der Anzahl der Insassen pro Derivat erfüllt werden.

Zur Verringerung der Dimensionen des Optimierungsproblems und der Rechenzeit ist eine Fuzzylogik der Optimierung vorgeschoben. Damit wird anhand der Ausprägungen der Bereitschaft für MaaS, der Investitionsbereitschaft, des Sicherheitsbedürfnisses und der Sekundärtätigkeiten der Fahrzeugtyp (Privatfahrzeug, Carsharing-Taxi und Ridesharing-Shuttle (Abbildung 2.3)) bestimmt. Dadurch ist jedem Sekundärbedürfnis eines jeden Nutzers ein Wunschfahrzeugtyp zugeordnet. Die Optimierung kann folglich für jeden Fahrzeugtyp separat stattfinden.

Die Fitnessfunktion der Optimierung (Gleichung (4.2)) beinhaltet jeweils normiert die Erfüllung der Sekundärtätigkeitsbedürfnisse der Nutzer  $F_{SA}$ , die Erfüllung deren Passagierbedürfnisse je Sekundärtätigkeit  $F_P$ , die Erfüllung deren Charaktereigenschaften  $F_C$  und eine gleichmäßige Erfüllung der Bedürfnisse aller Nutzer  $F_{ff}$ :

$$\phi(x) = F_{SA}(x) + F_P(x) + F_C(x) + F_{ff}(x) \quad (4.2)$$

$F_{SA}$  berechnet sich über die Differenz des Bedürfnisses in jeder Sekundärtätigkeit eines jeden Nutzers und der nächstgelegenen Ausprägung der Derivate. Für  $F_P$  ist die Differenz der Anzahl

der Insassen des Derivates, das die Sekundärtätigkeit erfüllt, und die ursprünglich gewünschte Passagieranzahl maßgeblich. Das gleiche Prinzip gilt für die Berechnung von  $F_C$ .  $F_{ff}$  wird berücksichtigt, um alle Nutzer mit einem ähnlichen Erfüllungsgrad zufriedenzustellen.

Die Variablen des Mobilitätsverhaltens sind in der Fitnessfunktion nicht enthalten, um die Dimensionen und die Rechenzeit des Optimierungsproblems zu verringern. Standardmäßig wird der Mittelwert aller Nutzer, die das jeweilige Derivat befriedigt, gebildet. Da dieses Vorgehen bei Derivaten mit stark differenzierenden Mobilitätsbedürfnissen zu Derivaten mit großen Abweichungen zu den Nutzerprioritäten führen würde, gibt es ein zusätzliches optionales Clusterverfahren, das für die Mobilitätsbedürfnisse Varianten des jeweiligen Derivates bildet.

Die Nebenbedingungen der Optimierung sichern die technische Realisierung der Derivate ab. Zwei zentrale Nebenbedingungen beziehen sich auf die Erfüllung der Sekundärtätigkeiten und die Anzahl an Passagieren. Die kumulierte Ausprägung der Erfüllung der Sekundärtätigkeiten wird auf den Wert 10 beschränkt, sodass sichergestellt ist, dass Derivate in starker Ausprägung einer Sekundärtätigkeit spezialisiert oder in mittlerer Ausprägung mehrerer Sekundärtätigkeiten generalisiert sind. Die Anzahl der Insassen ist auf neun begrenzt, um heutigen Zulassungsrichtlinien für Pkw zu entsprechen [172].

Für das zweite Teilziel der Transformation des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes in KWE ist als MCDM-Verfahren die Fuzzylogik gewählt. Deren Implementierung umfasst in dieser Arbeit 13 Eingangsgrößen für den fahrzeuggebundenen Mobilitätsbedarf (Anhang C), die aus der zuvor durchgeführten Optimierung hervorgehen, und 27 Ausgangsgrößen für die KWE (Anhang D). Die Fuzzifizierung der Eingangsgrößen erfolgt zur vereinfachten Interpretation in Form von Dreiecksfunktionen, wie SCHRÖDER [173, S. 873-874] empfiehlt.

Die Regelbasis mit ihren WENN...DANN...-Regeln, die das Kernelement der Fuzzylogik darstellt, wird mithilfe einer Expertenbefragung erstellt, weil es für die neuartige Verknüpfung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes mit den KWE bisher keine Veröffentlichungen gibt und diese Regeln nicht durch eine Literaturrecherche ermittelt werden können. 14 Experten aus Wissenschaft und Industrie, die jeweils zu ihrem Fachbereich (Ergonomieexperten für anthropometrische geometrische Zusammenhänge, Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMI)-Experten für Info- und Entertainmentaspekte, Elektromobilitätsexperten für antriebsstrangbezogene Eigenschaften etc.) befragt wurden, erstellten auf diese Weise 531 Regeln. Eine dieser Regeln ist beispielhaft: „WENN Sekundärtätigkeit Schlafen stark ausgeprägt UND Fahrzeugtyp Privatfahrzeug, DANN Akustik Innenraum sehr leise“.

Im Detail ist für diese Arbeit ein Mamdanisystem [174] gewählt, weil dieses zur Abbildung von menschlichem Denken gut geeignet und Grundlage industrieller Anwendungen ist [175]. Für Regeln mit mehreren Bedingungen, bei denen „Und“- sowie „Oder“-Verknüpfungen gewählt werden müssen, folgt diese Arbeit LEE [176, S. 266], der den Produktoperator für „Und“-Verknüpfungen sowie den Maximumoperator für „Oder“-Verknüpfungen empfiehlt. Wenn mehrere Regeln die gleiche Ausprägung einer Ausgangsgröße betreffen, müssen diese zusammengeführt werden, was als Implikation bezeichnet wird. Für Fuzzy-Expertensysteme wird die Wahl des Produktoperators vorgeschlagen [176, S. 266-267]. Die Aggregation, die verschiedene Ausprägungen einer Ausgangsgröße zusammenführt, wird in dieser Arbeit durch den Maximumoperator bestimmt [177, S. 348-350]. Als Defuzzifizierungsmethode wird die am häufigsten verwendete Schwerpunktmethode gewählt [178].

### 4.1.3 Ergebnisse

Das beschriebene Vorgehen mit der Methodik und deren Implementierung leitet aus den nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnissen ein fahrzeuggebundenes Mobilitätsangebot ab, das in KWE übersetzt wird. Das Nutzerszenario der Familie (Abbildung 4.1) mit einem Erfüllungsgrad der Nutzerbedürfnisse von 80 % dient nachfolgend als Anschauungsbeispiel zur Präsentation der Ergebnisse je Prozessschritt.

Für die vier Nutzer mit ihren unterschiedlichen Wünschen in den 16 Anforderungen, die in ihrer Gesamtheit zu 80 % erfüllt sein sollen, sind sechs Derivate die minimale Anzahl. Das fahrzeuggebundene Mobilitätsangebot, das aus diesen Derivaten besteht, beinhaltet ein Privatfahrzeug, vier Taxis und ein Shuttle. Ohne die Optimierung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes müsste jedem Nutzer zu jedem einzelnen Sekundärbedürfnis ein separates auf ihn zugeschnittenes Derivat zur Verfügung gestellt werden. Dies würde im Beispiel des Szenarios der Familie 20 Derivate bedeuten. Diese sechs Derivate mit ihren Ausprägungen bezüglich Sekundärtätigkeiten, Mitfahrern, Primärtätigkeiten und Charaktereigenschaften sind in Abbildung 4.5 dargestellt:

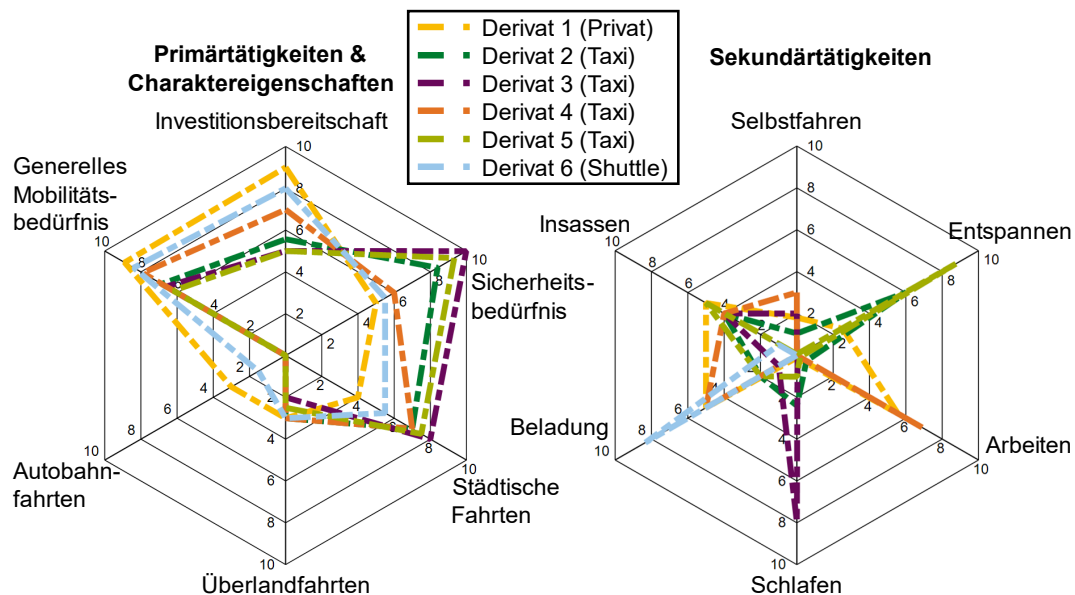


Abbildung 4.5: Derivate des Nutzerszenarios Familie bei einem Nutzererfüllungsgrad von 80 %

Abbildung 4.5 zeigt zwar das vollständige Derivatportfolio für das Szenario Familie bei einer 80-prozentigen Nutzererfüllung, lässt aber keine Rückschlüsse auf die Nutzer der einzelnen Derivate zu. Aus diesem Grund ist in Abbildung 4.6 eine andere Form der Darstellung gewählt, wodurch diese Zuordnung möglich ist. Abbildung 4.6 zeigt der Einfachheit halber ausschließlich die Ausprägungen zu den Sekundärtätigkeiten und den Passagieren je Sekundärtätigkeit. Die Nutzer können zu verschiedenen Sekundärtätigkeiten eine sich unterscheidende gewünschte Anzahl an Passagieren haben, während bei einem Derivat diese Anzahl immer gleich ist.

Zum einen ist in Abbildung 4.6 (a) das Nutzerprofil der Mutter den von ihren benötigten Derivaten gegenübergestellt. Zum anderen zeigt Abbildung 4.6 (b) Derivat 2 und die Nutzer, die dieses für ihre Bedürfnisse benötigen.

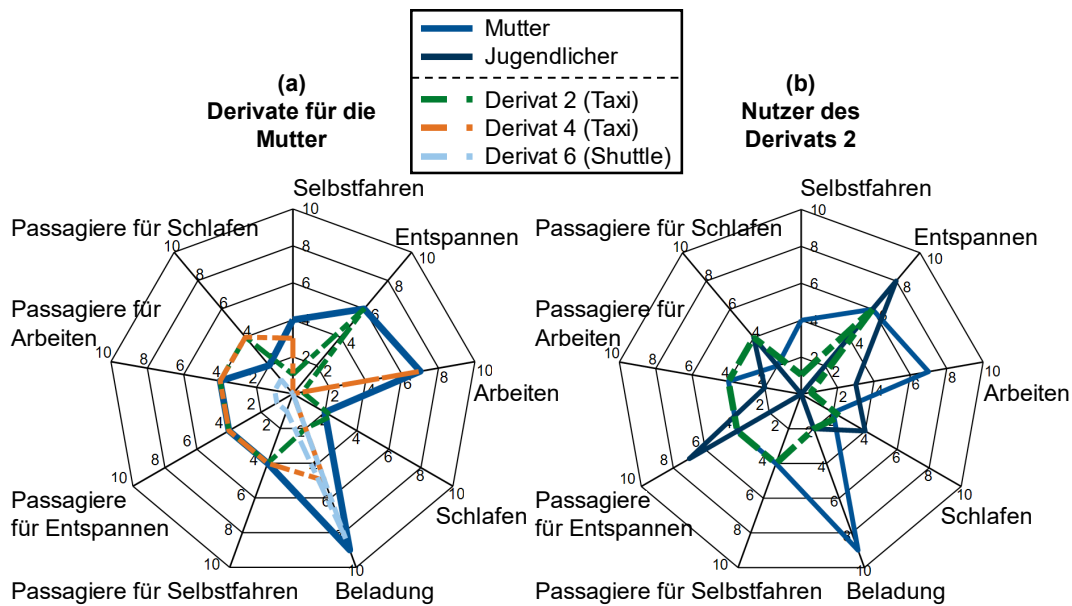


Abbildung 4.6: Zuordnung der Derivate zu den Nutzern in den Sekundärtätigkeiten: (a) Derivate, die die Mutter zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse nutzt, und (b) Nutzer, die Derivat 2 nutzen

In Abbildung 4.6 (a) ist ersichtlich, wie die Einzelbedürfnisse der Mutter durch die drei Derivate 2, 4 und 6 gedeckt werden. Je nach momentanem Bedürfnis wird sie das passende Derivat ordern. Abbildung 4.6 (b) verbildlicht Derivat 2 und seine Nutzer. Es ist erkennbar, dass Derivat 2 die Bedürfnisse seiner Nutzer in den Sekundärtätigkeiten „Entspannen“ und „Schlafen“ fast vollständig befriedigen kann, während für die anderen Sekundärtätigkeiten weitere Derivate notwendig sind.

An Derivat 2 ist ersichtlich, dass durch die Nebenbedingungen des Optimierers kleine Ausprägungen ( $<1,2$ ) in Sekundärtätigkeiten erzeugt werden, anstatt sie auf null zu setzen. Diese kleinen Ausprägungen sind vernachlässigbar gering, sodass sie nachfolgend auf null gesetzt werden, um keine Auswirkung auf den weiteren Prozessverlauf auszuüben.

Im zweiten Teilschritt wird dieses fahrzeuggebundene Mobilitätsangebot durch die Fuzzylogik in KWE umgewandelt. Die Beschreibung aus der Sicht der Nutzer und deren Bedürfnisse wandelt sich dabei in eine fahrzeugspezifische Beschreibung durch die KWE eines FK. Zur Verdeutlichung dieses Schrittes ändert sich die Benennung von Derivat in FK. Alle nachfolgenden Ergebnisse in Kapitel 4 werden durch FK 2, das aus Derivat 2 hervorgeht, dargestellt. Um nicht durchgehend von FK 2 des Nutzerszenarios Familie mit einem Nutzererfüllungsgrad von 80 % sprechen zu müssen, soll ab dieser Stelle die verkürzte Bezeichnung FK 2 gelten.

Die Ausprägung des vollständigen Portfolios an KWE von FK 2 zeigt Abbildung 4.7. Dabei ist die Darstellung in die sechs KWE der Gesamtfahrzeugebene „Fahrtechnik“, „Ergonomie“, „Sicherheit“, „Alltagstauglichkeit“, „Fahrstil“ und „Luxus“ gegliedert. Die untere Grenze der Ausprägung ist rot markiert, um diese kenntlich zu machen. Sie besitzt die Ausprägung 4, weil nach AIGNER [37] dies die Ausprägung ist, bei der Nutzer beginnen, sich zu beschweren. Für spezifische spitze FK, die in einer Fahrzeugflotte in autonomer und geteilter Mobilität eingegliedert sind, ist diese schlechte Erfüllung einzelner KWE zur Verbesserung anderer KWE denkbar.

## 4 Detaillierung des Vorgehens

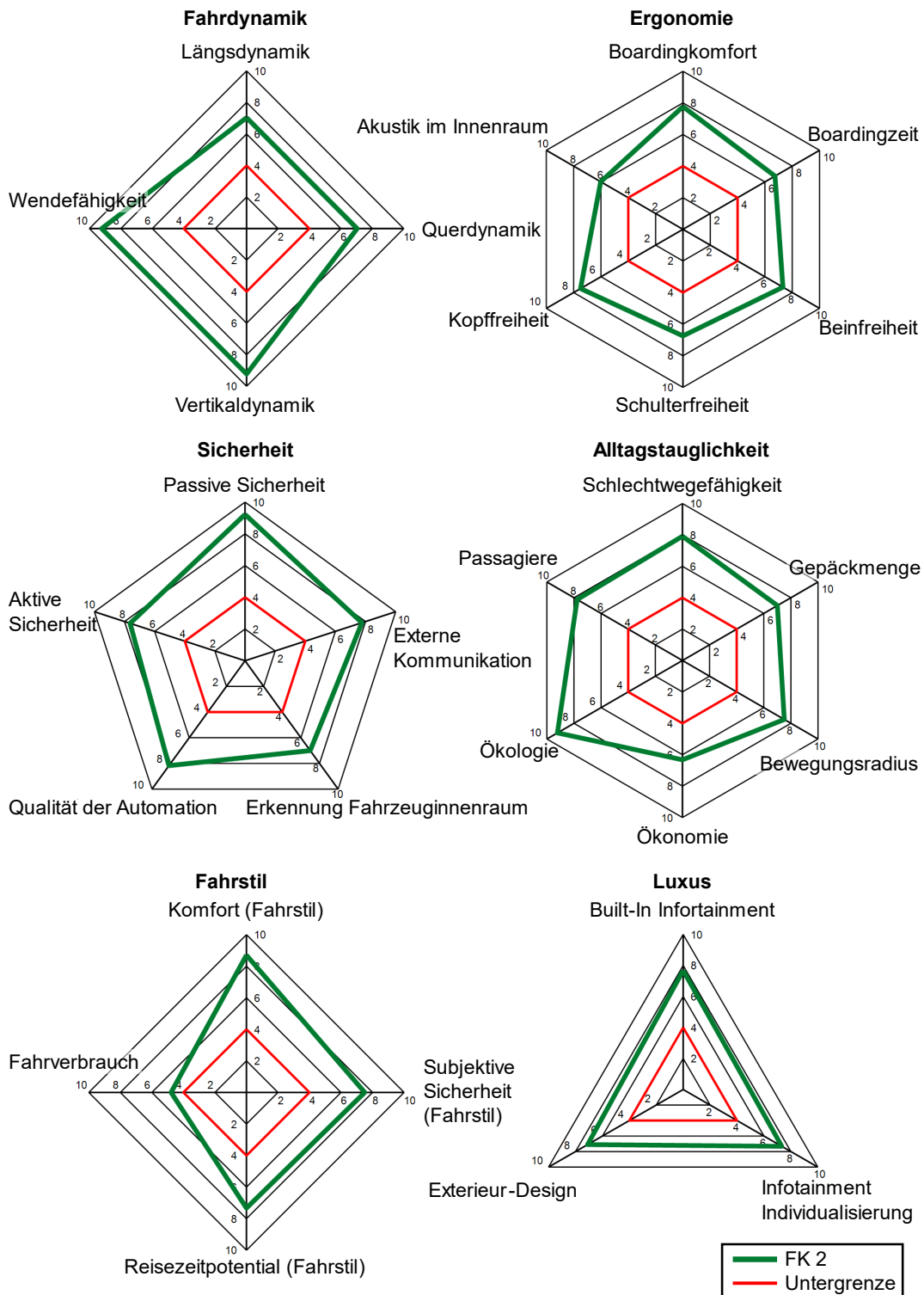


Abbildung 4.7: Ausprägungen der kundenwertigen Eigenschaften des FK 2

### 4.1.4 Validierung

Dieses Teilkapitel soll die Methodik zur Überprüfung der Validität der Ergebnisse beschreiben und das Resultat der Validierung aufzeigen. Bevor auf die Validierung der Teilprozessschritte eingegangen wird, soll eine theoretische Einordnung den Unterschied von Validierung,

Verifizierung und Plausibilisierung aufzeigen, um das Vorgehen und die Ergebnisse in dieser Arbeit einordnen zu können (Vorarbeit in [179]).

Validierungsprozesse unterscheiden sich in ihrer Anwendbarkeit, ihren Bewertungskriterien und ihrem Umsetzungsaufwand. Dementsprechend ist es nicht möglich, einen allgemeingültigen Validierungsprozess zu definieren. Vielmehr benötigt jede Fragestellung ihren eigenen Validierungsprozess [180, S. 12-25, 181, 182]. Dabei ist bei einer systematischen Bewertung von Modellen zwischen einer Validierung und einer Verifizierung zu unterscheiden [183–185].

Eine Validierung betrachtet das zu beurteilende Modell als Black-Box. Sie prüft das Modell, ohne Abläufe im Systeminneren zu beachten [185]. Ihre Aufgabe ist es zu testen, in wie weit die Ergebnisse des Modells der Realität bzw. den Anforderungen des Anwendungsfalles entsprechen [180, S. 1]. Bei einer Verifizierung ist das Modell als White-Box zu behandeln [185]. Ihr Ziel ist die Überprüfung des richtigen Aufbaus des Modells im Systeminneren [183, S. 5]. Das Modellergebnis und dessen Vergleichbarkeit mit der Realität sind dabei nicht von Interesse, weil die Richtigkeit der Abläufe im System und zwischen den Modellschritten begutachtet wird [180, S. 12, 186]. Für eine detailliertere Differenzierung von Validierung und Verifizierung sowie den verschiedenen Formen der Validität sei auf die Vorarbeit [179, S. 6-16] verwiesen.

Der erste Teilprozessschritt der Ableitung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes aus den nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnissen beruht hauptsächlich auf einer Optimierung, welche die Anzahl an benötigten Derivate bezüglich eines zu erreichenden Nutzererfüllungsgrades minimieren soll. Dies ist ein mathematisches Problem, für das es heutzutage kein vergleichbares Äquivalent in der Realität gibt. Des Weiteren ist eine Expertenbefragung bezüglich der benötigten Anzahl an Derivaten und deren geeigneter Ausprägung nicht zielführend, weil diese Abschätzungen willkürlich wären. Aus diesem Grund ist für diesen Teilprozessschritt ausschließlich eine qualitative Verifizierung möglich.

Die Fitnessfunktion (Gleichung (4.2)) des Optimierungsproblems beinhaltet die Aspekte der Sekundärtätigkeiten, der Passagieranzahl und der Charaktereigenschaften des nutzerzentrierten Mobilitätsbedarfes, die FK für autonome und geteilte Mobilität definieren. Die Eigenschaften der Primärtätigkeit Mobilität sind hingegen nicht Bestandteil der Fitnessfunktion. Deren Beachtung durch ein angehängtes Clusterverfahren stellt eine Abdeckung aller inhaltlichen Parameter im Systeminneren sicher. Die Randbedingungen der Optimierung begrenzen den Lösungsraum auf technisch realisierbare Ergebnisse. Diese qualitative Überprüfung des Systeminneren verifiziert den Teilprozessschritt der Ableitung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes aus den nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnissen.

Für den Teilprozessschritt der Umwandlung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes in KWE ist eine Validierung möglich, weil es sich um ein Expertensystem handelt, das von weiteren Experten beurteilt werden kann. Die szenarienbasierte Expertenvalidierung ist hierfür die gängige Methode [183, S. 24, 187]. Bei dieser Form der Validierung bekommen Experten die gleichen Eingabeparameter wie das System vorgelegt, um die Ausgangsparameter vergleichen zu können. Anhand der Übereinstimmungen der Experten- und Systemantworten kann eine Beurteilung der Validität des Systems erfolgen. Kriterium hierfür ist der Leistungsbereich der Experten, sodass gezeigt wird, ob das System auf gleichem Niveau wie die Experten agiert.

Fünf Experten (drei Professoren aus dem Bereich Fahrzeugtechnik und Ergonomie, eine promovierte Innovationsmanagerin eines OEM und ein Doktorand aus dem Bereich zukünftige FK eines OEM), die bei der Regelerstellung der Fuzzylogik nicht beteiligt waren, leiteten für sechs Derivate des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes, die als Testsznarien dienen, die KWE ab. Diese Testsznarien entstammen den drei Nutzerszenarien (Anhang B) und ihren Derivaten,

## 4 Detaillierung des Vorgehens

die sich bei variierenden Nutzererfüllungsgraden von 50 %, 60 %, 70 % und 80 % ergeben. Die Auswahl der Testszenarien ist bestimmt durch das Vorhandensein von konservativen und spitzen Derivaten. Bei der Expertenbefragung wird die Skala der KWE, die von 4 bis 10 reicht, auf „niedrig“ ( $4 \leq x < 6$ ), „mittel“ ( $6 \leq x < 8$ ) und „hoch“ ( $8 \leq x \leq 10$ ) vereinfacht.

Zur Vergleichbarkeit der sich unterscheidenden Expertenantworten mit den Systemantworten muss ein geeignetes Streuungsmaß zur deren Klassifizierung gewählt werden. Aufgrund der Robustheit gegenüber Ausreißern [188, S. 32] ist der Interquartilsabstand (IQR) ein geeignetes Maß für diese Klassifizierung. Der IQR definiert sich als der Abstand zwischen dem ersten und dem dritten Quartil [189, S. 70] und filtert Ausreißer heraus.

Für die Berechnung des IQR der Expertenantworten muss den Antworten „niedrig“, „mittel“, „hoch“ ein eindeutiger Wert zugeordnet werden, weshalb die Werte 1 (niedrig) bis 3 (hoch) als Hilfsgrößen eingeführt werden. Die Gesamtheit der Expertenantworten zu jeder einzelnen KWE bei jedem der sechs FK können folgendermaßen klassifiziert werden:

- $IQR \leq 0,5$ : Die Antworten der Experten weisen eine klare Tendenz auf.
- $0,5 < IQR \leq 1$ : Die Antworten der Experten liefern eine messbare Tendenz zwischen zwei Antwortmöglichkeiten
- $IQR > 1$ : Die Antworten der Experten sind aufgrund ihrer großen Streuung ohne Tendenz.

Bei einer klaren Tendenz der Expertenantworten ( $IQR \leq 0,5$ ) muss die Antwort des Systems die gleiche sein, um als richtig zu gelten. Liegt eine messbare Tendenz ( $0,5 < IQR \leq 1$ ) vor, muss sich die Systemantwort in dem eingeschlossenen Intervall (Niedrig-Mittel oder Mittel-Hoch) befinden. Ohne Tendenz ( $IQR > 1$ ) variieren die Antworten der Experten derart, dass keine Aussage auf Basis ihrer Antworten möglich ist. Dementsprechend kann die Systemantwort nicht schlechter als die der Experten sein, wodurch alle Antworten als richtig betrachtet werden müssen. Abbildung 4.8 veranschaulicht diesen Vergleich der Expertenantworten mit den Systemantworten.

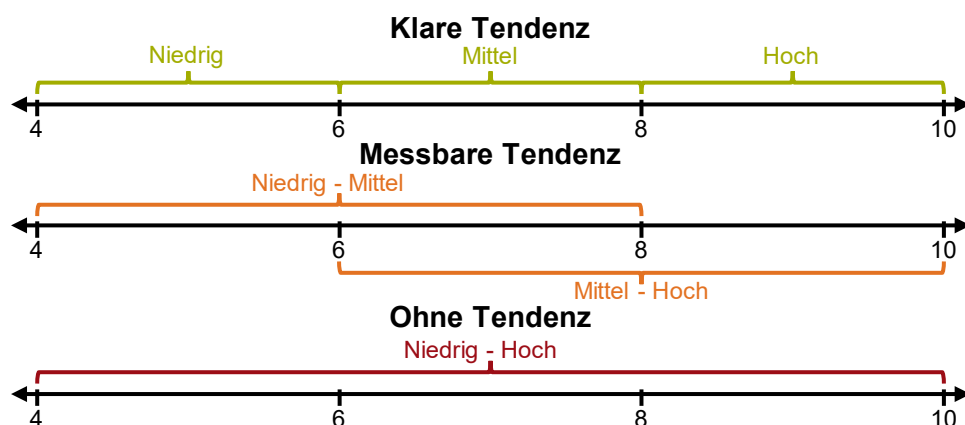


Abbildung 4.8: Vergleich der Expertenantworten mit den Systemantworten mittels IQR

Für die Auswertung der Validierung werden die 27 KWE der sechs Testszenarien jeweils einzeln betrachtet, sodass die Berechnung des IQR und dessen Vergleich mit den Systemantworten für insgesamt 162 Ausprägungen der KWE erfolgen. Tabelle 4.1 liefert die Validierungsergebnisse unterteilt in die drei Fahrzeugtypen (Abbildung 2.3): Privatfahrzeug, Taxi und Shuttle.



Tabelle 4.1: Validierungsergebnisse der Transformation des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes in kundenwerte Eigenschaften nach Fahrzeugtyp

	Privatfahrzeug	Taxi	Shuttle
Anteil: Klare Tendenz [%] (KT)	25,9	35,8	27,8
Anteil: Messbare Tendenz [%] (MT)	70,4	54,3	57,4
Anteil: Ohne Tendenz [%] (OT)	3,7	9,9	14,8
Richtige Systemantworten [%]	81,5	80,2	64,8
Richtige Antworten bei zufälligen Werten [%] ( $P_R$ )	59,3	58,0	62,3

Tabelle 4.1 beinhaltet den Anteil der KWE, welche die Experten mit klarer, messbarer oder ohne Tendenz beantwortet haben, die richtigen Systemantworten im Vergleich mit den Expertenantworten und die richtigen Systemantworten bei einer willkürlich gewählten KWE ( $P_R$ ). Der letzte Wert dient zur Einordnung und berechnet sich nach Formel (4.3) mit einem Drittel des Anteils der klaren Tendenz (KT), zwei Dritteln des Anteils der messbaren Tendenz (MT) und dem Anteil ohne Tendenz (OT), weil mit dieser Wahrscheinlichkeit eine zufällige Antwort richtig wäre.

$$P_R = \frac{1}{3}KT + \frac{2}{3}MT + OT \quad (4.3)$$

Die Validierung eines Expertensystems weist nach, dass dieses auf dem gleichen Niveau wie die für die Validierung befragten Experten agiert [187, 190]. Das System als richtig oder falsch zu bewerten, ist für ein Expertensystem nicht möglich [187]. Weil das Verständnis der Testszenarien und der kontextuelle Hintergrund der menschlichen Experten dazu führt, dass die Expertenantworten nicht zwingend immer richtig sind, gilt in der Literatur je nach Kritikalität des Systems ein Akzeptanzniveau von 66 % als Mindestwert bzw. 75 % als strengere Grenze [162, S. 63, 191, S. 31, 192, S. 94, 193, S. 142-143]. Die Validierungsergebnisse für Privatfahrzeuge (81,5 %) und für Taxis (80,2 %) liegen deutlich über dem strengeren Grenzwert von 75 %. Ebenso sind sie um mehr als 20 % besser als zufällig gewählte KWE. Dementsprechend kann das System für diese beiden Fahrzeugtypen als valide betrachtet werden. Für Shuttles erreicht die Validierung einen Wert von 64,8 %. Dies liegt unter dem Mindestwert von 66 % und ist nur wenig besser als zufällige Werte mit 62,3 %, weswegen dieser Wert in der anschließenden Diskussion aufgegriffen wird.

Für eine detaillierte Herleitung des Fragebogens und der Auswertungsmethodik sowie einer vollständigen Präsentation und Interpretation der Validierungsergebnisse sei an dieser Stelle auf die Vorarbeit von MICHEL [179] verwiesen.

### 4.1.5 Diskussion und Ausblick

Die Diskussion und der Ausblick zum ersten Prozessschritt, der Ableitung von KWE einzelner FK aus nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnissen einer Nutzergruppe, ist in zwei Bereiche gegliedert: zum einen dem Vorgehen und dessen Umsetzung im Rahmen dieser Arbeit (Kapitel 4.1.2) und zum anderen den Ergebnisse und der Validierung (Kapitel 4.1.3 & 4.1.4).

Die Zielsetzung des Prozessschrittes ist zweigliedrig definiert: zum einen als Verwendung einer minimalen Anzahl an Fahrzeugen zur Befriedigung des nutzerzentrierten Mobilitätsbedarfs und zum anderen als die Umwandlung der nutzerbezogenen Beschreibung der Bedürfnisse in eine

## 4 Detaillierung des Vorgehens

---

fahrzeugkonzeptbezogene Sprache der KWE. Die Komplexität der Verknüpfung beider Zielsetzungen löst der Zwischenschritt „Fahrzeuggebundenes Mobilitätsangebot“. Dies ermöglicht in dieser Arbeit nutzerzentrierte Mobilitätsbedürfnisse in den Fahrzeugkonzeptentwicklungsprozess zu integrieren. Nichtsdestotrotz sollte in einer industriellen Anwendung der Versuch unternommen werden, die Fuzzylogik der Umwandlung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes in KWE in die Optimierung zu integrieren, um direkt die KWE optimieren zu können.

Die Nebenbedingungen der Optimierung sind in der Implementierung dieser Arbeit absolut formuliert und lassen keine Wechselwirkungen zu. Die Begünstigung und der Ausschluss von gewissen Sekundärtätigkeiten im gleichen Derivat sind nicht berücksichtigt, stattdessen ist das Zusammenwirken verschiedener Sekundärtätigkeiten immer gleich bewertet. Eine Analyse der verschiedenen Sekundärtätigkeiten im Hinblick auf deren Interferenzen und die Integration dieser Ergebnisse in die Nebenbedingungen der Optimierung sind für eine detaillierte Eingrenzung des Lösungsraumes und demnach der Ergebnisse zukünftig nötig.

Die der Optimierung vorgeschobene Fuzzylogik der Fahrzeugtypbestimmung und das ausgegliederte Clusterverfahren für die Primärbedürfnisse der Mobilität müssen in einer industriellen Anwendung in die Optimierung integriert werden. Die Gründe der langen, Stunden bis Tage dauernden Rechenzeit, die im Kontext dieser Arbeit zu der Ausgliederung dieser Schritte geführt haben, dürfen in der industriellen Anwendung keine Rolle spielen. In weiterer akademischer Forschung sollte deren Integration ebenso angestrebt werden.

Diese Arbeit betrachtet fünf Sekundärtätigkeiten, die als die relevantesten in einer Literaturrecherche identifiziert wurden. In Wirklichkeit sind beliebig viele Sekundärtätigkeiten während der Fahrt mit einem AV vorstellbar [194] und solange es eine Nutzergruppe gibt, wird es dafür auch Nischenprodukte geben. Ebenso besteht das Portfolio der KWE in dieser Arbeit aus 27 KWE. Die Industrie entwickelt aktuelle konventionelle FK mit ungefähr 300 KWE. Für diese notwendigen Erweiterungen bietet die Vorveröffentlichung [35] mit den vorgeschlagenen zwölf KWE ein Grundgerüst, auf das nachfolgende Forschung aufbauen kann.

Mit diesen Einschränkungen, die im Umfang dieser Arbeit notwendig sind, sind das Vorgehen und dessen Umsetzung in der Lage, die Zielsetzungen zu erreichen und einen wissenschaftlichen Neuwert zu schaffen. Die Betrachtung des Einsatzes einer Fahrzeugflotte, die für Nutzer die Fahrkosten und Fahrzeugverfügbarkeit in einer geteilten Mobilitätsumgebung bestimmt, wird in dieser Arbeit nicht adressiert. Während für einen OEM dies nur bezüglich des geschätzten Verkaufsvolumens eines Fahrzeuges von Interesse wäre, müsste ein Mobilitätsdienstleister beim Planen seiner Flotte für die anvisierte Nutzerzufriedenheit deren Einsatz berücksichtigen.

Die Ergebnisse und die Validierung teilen sich in die beiden beschriebenen Teilprozessschritte. Die Ergebnisse der Ableitung der minimalen Anzahl an Derivaten in einem fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebot aus nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnissen mittels einer genetischen Optimierung kann als verifiziert eingestuft werden. Eine finale Aussage zur Validität der Ergebnisse ist aber nicht möglich. Zukünftige Forschung sollte neben den beschriebenen Vorschlägen zur Erweiterung der Optimierung ergänzend eine Methode entwickeln, um Validität nachzuweisen.

Die Validierungsergebnisse der Umwandlung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebots in KWE sind unterschiedlicher Güte. Die Fahrzeugtypen „Privatfahrzeug“ (81,5%) und „Taxi“ (80,2%) übertreffen das strenge Validitätskriterium von 75%. Der Fahrzeugtyp „Shuttle“ (64,8%) unterschreitet die Mindestgrenze von 66% und die richtigen Systemantworten unterscheiden sich kaum von zufälligen Antworten 62,3%. Die Regelbasis der Fuzzylogik und die Validierung beruhen auf Expertenwissen. Daraus lässt sich schließen, dass die jeweiligen Experten für die Fahrzeugtypen „Privatfahrzeug“ und „Taxi“ eine klare Vorstellung haben. Beim

neuartigen Mobilitätskonzept des Shuttles scheint die Abweichung in den Expertenmeinungen bzw. die Unklarheit in der Vorstellung der Experten, das auf Expertenwissen beruhende System negativ zu beeinflussen. Weitergehende Forschung sollte deshalb die Regelbasis der Fuzzylogik dahingehend verbessern, dass Derivate für Shuttles auf ein vergleichbares Niveau wie Privatfahrzeuge und Taxis in KWE überführt werden können.

Trotz der beschriebenen Schwächen ist dieser erste neuartige Prozessschritt in seinem Vorgehen verifiziert und seine Ergebnisse für Privatfahrzeuge und Taxis durch die Validierung abgesichert. Er ermöglicht die Fahrzeugkonzeptentwicklung für autonome, geteilte und elektrische Mobilität, weil deren spezifische Anforderungen aufgegriffen und umgesetzt werden.

## 4.2 Kundenwerte Eigenschaften → Technische Eigenschaften

Die im Kapitel 4.1 hergeleiteten KWE müssen im zweiten Schritt in TE umgerechnet werden. Jedes FK kann ab diesem Prozessbaustein separat betrachtet werden, weil durch den ersten Schritt die Nutzersicht in die Beschreibung der einzelnen FK umgewandelt wurde. Des besseren Verständnisses wegen erfolgt die nachfolgende Beschreibung deshalb für ein FK. Für jedes weitere FK der gesamten Fahrzeugflotte würde das Vorgehen äquivalent erfolgen. Für die Übersetzung der KWE in TE existieren Vorarbeiten in [195–201], wobei für ein detaillierteres Verständnis vor allem auf [195, 197, 201] verwiesen sei.

### 4.2.1 Zielsetzung

Die KWE liegen nach dem ersten Prozessschritt in einer Nominalskala von 4 bis 10 vor, um deren Werte miteinander vergleichen zu können. Diese Nominalwerte sind für die weiteren Prozessschritte der Fahrzeugkonzeptentwicklung nicht zielführend, weil physikalische Werte als Ausgangspunkt von Simulationen benötigt werden. Deshalb müssen in diesem Prozessschritt lösungsneutrale, physikalisch beschriebene TE abgeleitet werden.

Als Eingangsgrößen dienen die 27 KWE (Anhang D). Es lässt sich nicht für jede dieser KWE mit dem heutigen Stand der Wissenschaft eine TE bestimmen. Als Beispiel sei die KWE „externe Kommunikation“ zu nennen. Aktuelle Forschung beschäftigt sich damit, wie AV mit ihrer Umgebung kommunizieren sollen. Dies betrifft insbesondere Kommunikation mit Fußgängern und Radfahrern. Ein kleiner Ausschnitt dieser Forschung ist in [202–207] zu finden. Ohne lösungsneutrale, physikalische Werte ist es nicht möglich, eine TE zu definieren. Neben KWE, denen momentan aufgrund von fehlenden Forschungsergebnissen noch keine TE zugeordnet werden kann, existieren KWE mit mehreren TE. So ist die KWE „Längsdynamik“ durch die TE „Beschleunigungsdauer von 0 km/h auf 100 km/h“ als auch die TE „Höchstgeschwindigkeit“ oder die KWE „Boardingkomfort“ durch die TE „Schwellerhöhe“ und „lichte Höhe“ beschrieben. Die Ausgangsgrößen des Prozessschrittes KWE in TE sind insgesamt 28 TE (Anhang E).

### 4.2.2 Vorgehen

Für die Zielsetzung der Umwandlung der KWE in nominaler Skala in physikalische Werte der TE bedarf es Korrelationen [32]. Um diese Umwandlung nicht nur für definierte Punkte diskret,

## 4 Detaillierung des Vorgehens

sondern kontinuierlich über den gesamten Wertebereich durchführen zu können, braucht es stetige Korrelationsfunktionen. Abbildung 4.9 verdeutlicht dieses Vorgehen:

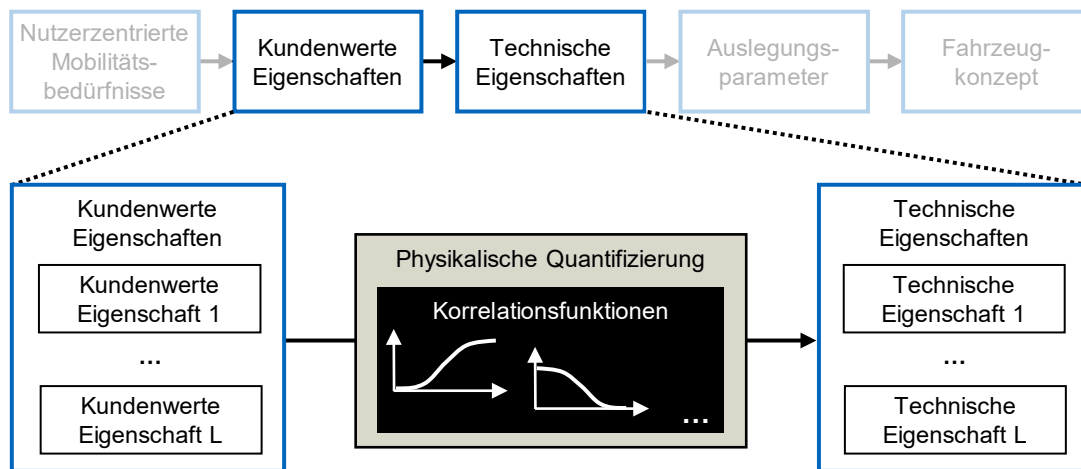


Abbildung 4.9: Vorgehen zur Ableitung von technischen Eigenschaften aus kundenwertigen Eigenschaften

Als Untergruppen der Korrelationsfunktionen existieren physikalische und empirische Korrelationen. Physikalische Korrelationsfunktionen scheiden für die Lösung der Zielsetzung aus, weil es keinen physikalischen Zusammenhang zwischen KWE und TE gibt. Empirische Korrelationsfunktionen benötigen Daten als Grundlage, die statistisch ausgewertet werden [208]. Daten für die meisten TE sind in der Datenbank des Allgemeinen Deutschen Automobil-Clubs e.V. (ADAC) [209] verfügbar. Weitere Daten liefern Benchmarkingplattformen wie a2mac1 [210] oder Automobilzeitschriften wie die Auto Motor und Sport [211] oder die Auto Bild [212]. Die entsprechenden KWE sind aber nicht veröffentlicht und liegen nur den Ingenieuren in den Fahrzeugkonzeptentwicklungsabteilungen der OEM vor. Deshalb sind typische empirische Korrelationsfunktionen ebenfalls nicht ableitbar. Nachfolgend sollen zuerst die Methodik zur Ableitung der Korrelationsfunktionen und anschließend die Implementierung, die im Kontext dieser Arbeit durchgeführt wurde, beschrieben werden.

## Methodik

Zur Lösung der beschriebenen Zielsetzung benötigt es eine Methodik, welche die Werte der TE aus den KWE errechnet. Des Weiteren sind nicht für alle Verknüpfungen der KWE zu den TE Daten vorhanden. Zum einen kann es sich um neue Eigenschaften autonomer, geteilter und elektrischer FK handeln und zum anderen existieren für einige Eigenschaften keine zugänglichen Daten. Um in diesem Kontext die Korrelationsfunktionen zur Ableitung von TE aus KWE zu bestimmen, wird ein Literaturvergleich durchgeführt.

Die wissenschaftliche Grundlage der Bewertung der Kundenzufriedenheit mit technischen Produkten haben KANO ET AL. [213] geschaffen. In ihrem Modell (Abbildung 4.10 (a)) korrelieren sie die Eigenschaftserfüllung mit der Kundenzufriedenheit mithilfe von drei Kurven. Für Basismerkmale des Produktes existiert eine degressive Kurve (blau in Abbildung 4.10 (a)), die maximal eine neutrale Kundenzufriedenheit erzielen kann. Dies bedeutet, dass eine schlechte Eigenschaftserfüllung zu starker negativer Kundenzufriedenheit führt, während eine gute Eigenschaftserfüllung neutral gesehen wird. Leistungsmerkmale haben eine lineare Kurve (schwarz in Abbildung 4.10 (a)). Die Eigenschaftserfüllung spiegelt sich demnach direkt linear in

der Kundenzufriedenheit wider. Die dritte Kurve (blau in Abbildung 4.10 (a)) repräsentiert Begeisterungsmerkmale, die der Kunde nicht erwartet. Eine schlechte Eigenschaftserfüllung oder ein Nichtvorhandensein der Eigenschaft werden dementsprechend neutral bewertet. Je stärker die Eigenschaftserfüllung durch das Produkt erfolgt, desto stärker nimmt die Kundenzufriedenheit exponentiell zu [214, S. 28-30, 215]. Dieses Grundlagenmodell definiert die drei Bereiche, die eine Korrelationsfunktion zur Umwandlung von KWE in TE haben sollte, eignet sich aber aufgrund der Dreiteilung und fehlenden mathematischen Beschreibung der Kurven nicht für die Anwendung in dieser Arbeit.

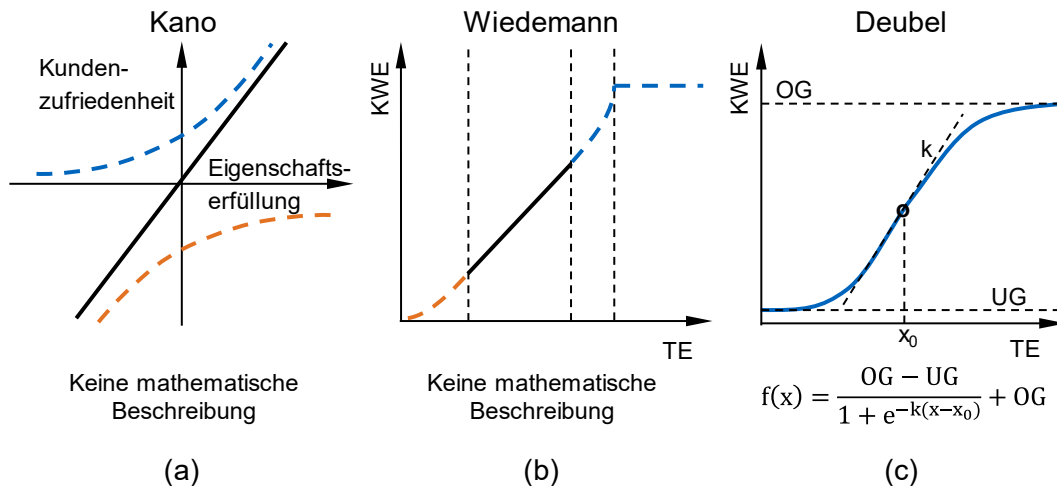


Abbildung 4.10: Korrelationsfunktionen nach (a) KANO [213], (b) WIEDEMANN [77, S. 58-59] und (c) DEUBEL [45, S. 49-58]

WIEDEMANN [77, S. 58-59] unterteilt seine Korrelationsfunktionen (Abbildung 4.10 (b)) angelehnt an KANO ET AL. [213] in die drei Bereiche „Basisbereich“, „Leistungsbereich“ und „Begeisterungsbereich“ (orange, schwarz und blau in Abbildung 4.10 (b)). Den mittleren Leistungsbereich definiert er als linear. Für den unteren Basisbereich und den oberen Begeisterungsbereich liefert er keine exakte Beschreibung. Er eröffnet einen progressiven Verlauf oder eine degressive Abflachung, die je nach KWE individuell gewählt werden sollen. Dieses spezifische Einzelfallvorgehen ermöglicht kein ganzheitliches Vorgehen und wird durch keine begleitende mathematische Beschreibung definiert. Aus diesem Grund ist die Herangehensweise von WIEDEMANN für diese Arbeit nicht geeignet.

DEUBEL [45, S. 49-58] schlägt aufbauend auf KANO ET AL. [213] eine Kurve des Typs Standardabhängigkeit (Abbildung 4.10 (c)) vor, weil diese einen direkten Zusammenhang zwischen der KWE und der TE abbilden sowie die degressiven Randbereiche und der quasi lineare mittlere Bereich die Wahrnehmung von Produkten durch Kunden gut widerspiegeln kann. Im mittleren Bereich verbessert eine steigende TE direkt die Ausprägung der KWE. In den Randbereichen ist eine Verbesserung bzw. Verschlechterung der TE in der KWE kaum spürbar. Als Beispiel kann die Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeugs betrachtet werden. Bei einer niedrigen Ausprägung ist eine Verschlechterung kaum relevant, weil die KWE von sich aus niedrig ist. Das gleiche gilt für eine hohe Ausprägung in die andere Richtung. Bei einer mittleren Höchstgeschwindigkeit werden Kunden eine leicht höhere oder niedrigere Ausprägung direkt wahrnehmen.

Die Standardabhängigkeit ähnelt zum einen einer kumulierten Gaußverteilung und lässt sich zum anderen über Formel (4.4) mathematisch beschreiben [45, S. 56]. Dabei stellen OG und

## 4 Detaillierung des Vorgehens

UG den oberen und unteren Grenzwert der TE dar.  $x_0$  definiert den Wendepunkt der Kurve und  $k$  dessen Steilheit:

$$f(x) = \frac{OG - UG}{1 + e^{-k(x-x_0)}} + UG \quad (4.4)$$

Durch die grafische und mathematische Definition durch DEUBEL greift diese Arbeit darauf zurück, um die benötigten Korrelationsfunktionen ableiten zu können, auch ohne Daten der KWE als Grundlage zu haben, weil diese von den OEM geheim gehalten werden.

Die zu bestimmenden Korrelationsfunktionen lassen sich in zwei Kategorien teilen: Zum einen existiert für TE über die ADAC Datenbank [209] und die Benchmarkplattform a2mac1 [210] eine große Datengrundlage. Sind für die entsprechende TE Daten in diesen Datenbanken vorhanden, wird die Korrelationskurve über diese Datenbasis gebildet. Diese Art der Korrelationen werden deshalb nachfolgend datenbasierte Korrelationsfunktionen genannt. Zum anderen besitzen manche TE keine breite, frei zugängliche Datengrundlage. Diese sind technisch tiefergehende TE, wie die freie Crashlänge, oder neuartige TE, wie die Bildschirmgröße je Passagier. Für diese TE kann über die mathematische Beschreibung der Korrelation (Formel (4.4)) eine grenzwertbasierte Korrelationsfunktion abgeleitet werden.

Für die datenbasierten Korrelationsfunktionen bilden die erwähnten Datenbanken mit TE und die Datenbank des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) zu jährlichen Neuzulassungen in Deutschland [216] die Grundlage. Die Datenbanken ordnen ihre Daten den Fahrzeugen entsprechend ihrer Derivate und Motorisierung zu. Über die Typschlüsselnummer der einzelnen Fahrzeuge können die Datenbanken miteinander verknüpft werden. Diese Verknüpfung ermöglicht es, eine verkaufszahlengewichtete Anzahl der Ausprägungen jeder TE zu erstellen. Sie beschreibt, wie viele Fahrzeuge mit der entsprechenden Ausprägung einer betrachteten TE im gewählten Jahr in Deutschland verkauft wurden. Diese verkaufszahlengewichtete Anzahl der Ausprägungen der TE entspricht einer Gaußverteilung. Mittlere Ausprägungen der TE, wie sie in Massenfahrzeugen vorkommen, werden oft verkauft, während extreme Ausprägungen der TE spitzer Fahrzeuge selten sind. Die kumulierte Form dieser Gaußverteilung bildet die Korrektionsfunktion. Dabei ist auf der Ordinate die kumulierte, verkaufszahlengewichtete Anzahl der Ausprägungen der TE als Ausprägung der KWE zu definieren. Diese datenbasierte Korrektionsfunktion bildet die grafische Definition nach DEUBEL [45, S. 52-53] ab. Abbildung 4.11 veranschaulicht das Vorgehen zur Erstellung der datenbasierten Korrelationsfunktionen:

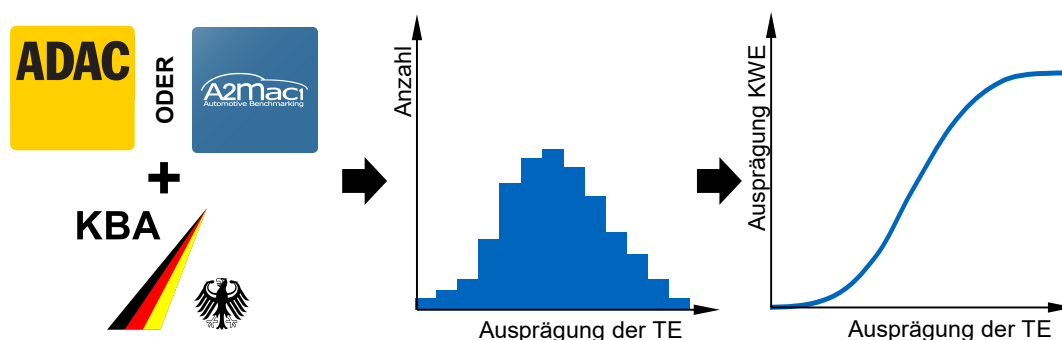


Abbildung 4.11: Erstellung der datenbasierten Korrelationsfunktionen (Quellen der Logos [209, 210, 216])

Die kumulierte Form der Gaußverteilung ist durch Formel (4.5) beschrieben. OG ist durch die Nominalskala von 0 bis 10, mit 10 als höchstem Wert, bestimmt. Untere Bereiche dieser Skala sind nicht marktfähig [36, S. 26, 37], weshalb diese in der Fahrzeugkonzeptentwicklung nicht berücksichtigt werden. In der vorliegenden Arbeit wird der Wert 4, der eine mangelhafte Ausprägung der Eigenschaft beschreibt [37], als unterer Grenzwert definiert. Spitze FK in zukünftiger, geteilter Mobilität für spezifische Anwendungsfälle können in einzelnen KWE mangelhafte Ausprägungen aufweisen, weil der Nutzer dies für eine hohe Erfüllung anderer KWE in Kauf nehmen wird.

$$f(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\pm(x - \mu)}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right] (OG - UG) + UG \quad (4.5)$$

Die TE ohne eine freizugängliche Datenbank benötigen aufgrund der fehlenden Daten eine grenzwertbasierte Korrelationsfunktionserstellung (Formel (4.4)). Hierfür müssen je TE die vier Variablen OG, UG, k und  $x_0$  bestimmt werden. OG und UG lassen sich wie für die datenbasierten Korrelationsfunktionen mit den Werten 10 und 4 bestimmen. Für die Bestimmung von k und  $x_0$  müssen zwei weitere Punkte  $((x_1|y_1)$  und  $(x_2|y_2))$  definiert werden (Abbildung 4.12), um sie durch die Formeln (4.6) und (4.7) festzulegen.

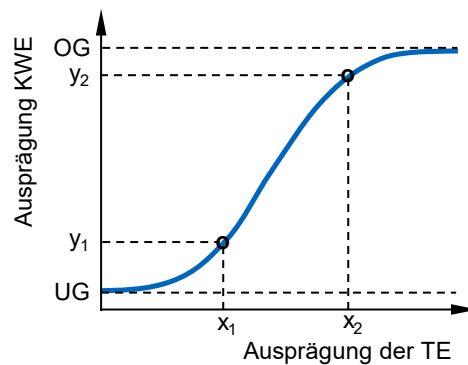


Abbildung 4.12: Erstellung der grenzwertbasierten Korrelationsfunktion

$$k = \frac{a_1 - a_2}{x_2 - x_1} \quad \text{mit } a_i = \ln \left( \frac{OG - UG}{y_i - UG} - 1 \right), i = 1,2 \quad (4.6)$$

$$x_0 = \frac{a_2(x_2 - x_1)}{a_1 - a_2} + x_2 \quad \text{mit } a_i = \ln \left( \frac{OG - UG}{y_i - UG} - 1 \right), i = 1,2 \quad (4.7)$$

Für diese Punktebestimmung fällt die Wahl auf die minimale und maximale Ausprägung im Markt bzw. der Analogie, wenn es sich um neuartige Eigenschaften handelt, die in anderen Bereichen Anwendung finden. Die Ausprägungen dieser TE bilden  $x_1$  und  $x_2$ . Der Wert der KWE der maximalen Ausprägung ( $y_2$ ) wird auf  $(OG - 0,1)$  festgelegt. Der Wert für  $y_1$  beträgt 5, weil es sich um die minimale Ausprägung, die aktuell noch marktfähig wäre, handelt und spitze FK, die durch die autonome Fahrfunktion entstehen werden, nicht berücksichtigt sind [37].

Eine detaillierte Beschreibung der Methodik der Ableitung der daten- und der grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen ist in den Vorarbeiten [195, 197] zu finden.

### Implementierung

Für die Implementierung des Prozessschrittes der Umwandlung der KWE in TE müssen zuerst die TE bestimmt werden, welche die jeweiligen KWE physikalisch messbar machen. Die TE sollen eine package- oder softwarebezogene Information aufweisen, um für den weiterführenden Prozess einen nutzbaren Inhalt zu besitzen. Dieser soll lösungsneutral sein, um keine Vorauswahl innerhalb von Hardware- oder Softwarekomponenten und in der Funktionsteilung durch Hardware und Software vorzunehmen. Es können einer KWE mehrere TE zugeordnet werden, wenn es deren physikalische Beschreibung erfordert.

Auf diese Weise werden insgesamt 28 TE (Anhang E) definiert. Dabei werden 22 KWE von jeweils einer TE und drei weitere KWE von jeweils zwei TE abgebildet. Die KWE „Gepäckmenge“ bildet einen Sonderfall ab, weil sie mit einer TE korreliert, diese sich aber je nach wichtigster Sekundärtätigkeit im Fahrzeug in „Stauvolumen Personenfahrzeuge“ oder „Stauvolumen Gepäcktransport“ aufteilt. Das „Stauvolumen Gepäcktransport“ wird benötigt, wenn die Sekundärtätigkeit „Beladung“ am höchsten priorisiert ist. Dieser Unterscheidung liegen wie bei heutigen Pkw und Nutzfahrzeugen unterschiedliche Korrelationsfunktionen zugrunde, sodass sich insgesamt 29 Korrelationsfunktionen ergeben.

Insgesamt drei KWE („Erkennung Fahrzeuginnenraum“, „externe Kommunikation“ und „Infotainment Individualisierung“) lassen sich mit dem Stand der Wissenschaft zum heutigen Zeitpunkt nicht bestimmen, weshalb sich keine TE ableiten lässt. Es bedarf disziplinspezifischer Forschung. Anhang E zeigt die Zuordnung der KWE zu TE und definiert diese.

Die ADAC Datenbank [209], Fahrzeugberichte zu SAE-Maßen [217] der Benchmarkplattform a2mac1 [210] und die KBA Datenbank mit den Verkaufszahlen des Jahres 2020 [218] liefern die Datengrundlage für die Implementierung der datenbasierten Korrelationsfunktionen. Aufgrund dieser vorhandenen Daten werden 17 der 29 Korrelationen datenbasiert (Abbildung 4.11) errechnet. Für elf TE wird die grenzwertbasierte Methode (Abbildung 4.12) angewendet.

Die TE der KWE Fahrstil können nicht anhand der ADAC Datenbank erstellt werden, weil diese ausschließlich klassische TE enthält. Deshalb dienen Realfahrdaten [219, 220] als Grundlage für diese Korrelationen. Die TE „Schnelligkeit des Fahrstils“ passt nicht in das Muster der degressiven Funktionen im Bereich der Extremwerte [201, S. 45]. Eine verkürzte Fahrtzeit hat zu jedem Zeitpunkt eine gleichbleibend positive Auswirkung auf die Kundenzufriedenheit, weshalb diese abweichend von der beschriebenen Methodik zur Erstellung der Korrelationsfunktionen linear mit der KWE korreliert wird. Alle Korrelationsfunktionen mit ihrer Erstellungsart und ihrer mathematischen Beschreibung sind in Anhang F (Tabelle F.1) dokumentiert.

Abbildung 4.13 zeigt die Bildung der datenbasierten Korrelationsfunktionen am Beispiel der TE „Höchstgeschwindigkeit“. In Abbildung 4.13(a) ist die Anzahl der jeweiligen Höchstgeschwindigkeiten der Fahrzeuge, die im Jahr 2020 in Deutschland zugelassen wurden, in einem Histogramm (blau) dargestellt. Aus diesem lässt sich die Gaußverteilung (orange) berechnen. Deren Mittelwert liegt bei ca. 200 km/h. Die Häufung bei 250 km/h stellt eine Abweichung dar, weil viele Premiumfahrzeuge bei dieser Geschwindigkeit abgeriegelt sind und es kaum Fahrzeuge gibt, die größere Höchstgeschwindigkeiten aufweisen. Die daraus abgeleitete kumulierte Gaußverteilung (Abbildung 4.13(b)) mit der unteren Grenze des Kundenwertes bei 4 und der oberen Grenze bei 10 stellt die Korrelationsfunktion zwischen der KWE „Längsdynamik“ und der TE „Höchstgeschwindigkeit“ dar. Bei der Bildung der kumulierten Gaußverteilung ist die positive oder negative Orientierung zu bestimmen. In Abbildung 4.13(b) ist eine positive Orientierung dargestellt, weil eine große Höchstgeschwindigkeit einen hohen Kundenwert ergibt.



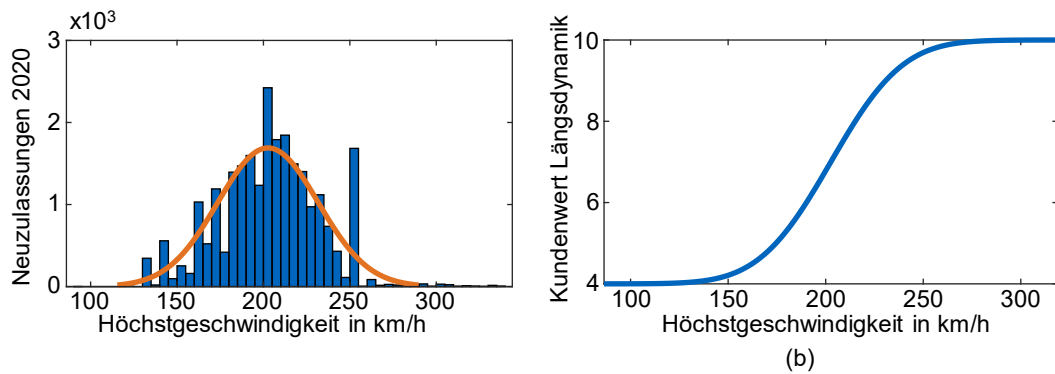


Abbildung 4.13: Bildung der datenbasierten Korrelationsfunktionen am Beispiel der Ableitung der TE „Höchstgeschwindigkeit“ aus der KWE „Längsdynamik“: (a) Gaußverteilung der Neuzulassungen aus dem Jahr 2020; (b) kumulierte Gaußverteilung als Korrelationsfunktion

Diesem Vorgehen folgend sind in Abbildung 4.14 beispielhaft für die datenbasiert abgeleiteten TE die Korrelationsfunktionen der Schwerpunkthöhe in mm (Abbildung 4.14(a)), der effektiven Kopffreiheit H61 in mm (Abbildung 4.14(b)) der Reichweite im Worldwide harmonized Light Duty Test Procedure (WLTP) [221] in km (Abbildung 4.14(c)), und des Raddurchmessers in mm (Abbildung 4.14(d)) veranschaulicht. Dabei liefert die Benchmarkplattform a2mac1 [210] die Daten der Korrelationsfunktion der effektive Kopffreiheit H61 (Abbildung 4.14(b)) und die ADAC Datenbank [209] die Daten der anderen TE (Abbildung 4.14 (a, c, d)), wobei für die Reichweite im WLTP ausschließlich Daten von BEV herangezogen werden.

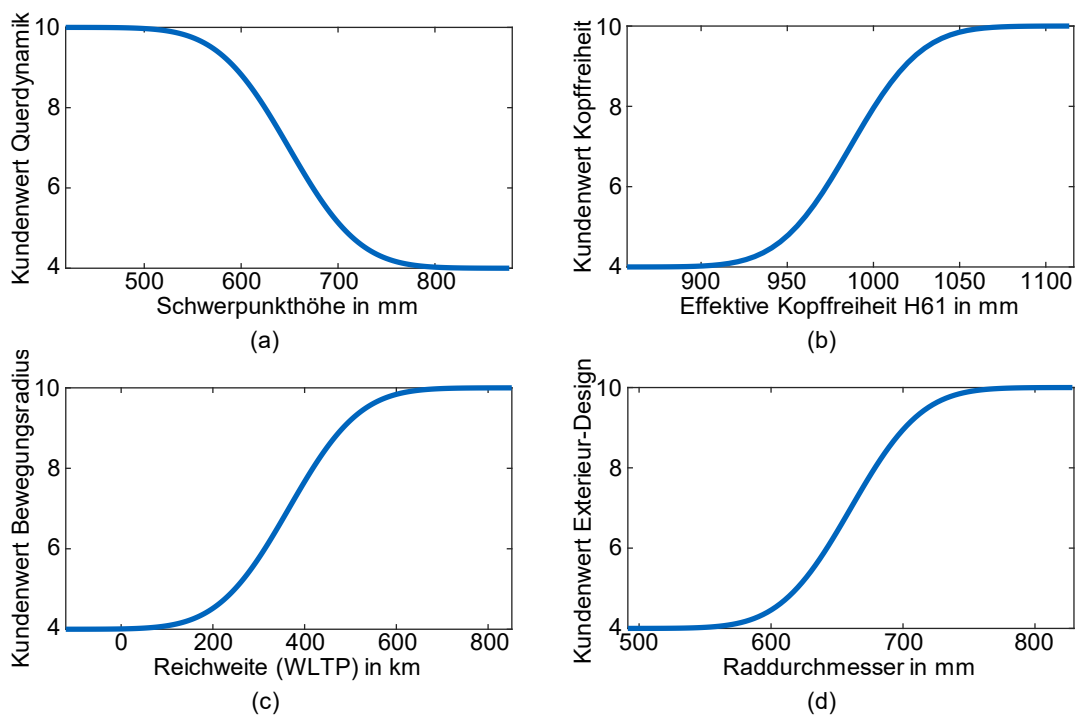


Abbildung 4.14: Auswahl der datenbasierten Korrelationsfunktionen: (a) Schwerpunkthöhe in mm, (b) effektive Kopffreiheit H61 in mm, (c) Reichweite (WLTP) in km und (d) Raddurchmesser in mm

## 4 Detaillierung des Vorgehens

Die Korrelationsfunktionen der effektiven Kopffreiheit H61 (Abbildung 4.14(b)), der Reichweite (WLTP) (Abbildung 4.14(c)) und des Raddurchmessers (Abbildung 4.14(d)) haben eine positive Orientierung, während die Korrelationsfunktion der Schwerpunkthöhe (Abbildung 4.14(a)) negativ orientiert ist. Die mathematische Beschreibung dieser vier Korrelationsfunktionen und der weiteren 13 datenbasierten Korrelationsfunktionen ist in Anhang F in Tabelle F.1 aufgeführt.

Eine Besonderheit bei den datenbasierten Korrelationsfunktionen stellt die Schwerpunkthöhe dar. Es existieren zu dieser keine frei verfügbaren Daten. Deshalb muss eine Größe in der vorhandenen Datenbank gefunden werden, mit der sie abgeleitet werden kann. Hierfür stellt FÜR BETH [222] ein Regressionsmodell (Formel (4.8)) zur Bestimmung der Schwerpunkthöhe ( $h_{CG}$ ) bereit, das die Fahrzeughöhe ( $h_{veh}$ ) und Fahrzeugmasse ( $m_{veh}$ ), deren Daten in der ADAC Datenbank verfügbar sind, als Basis nutzt:

$$h_{CG} = 0,425666 * h_{veh} + 6,73477 \frac{mm}{kg} * 10^{-6} * m_{veh} - 0,0814173 mm \quad (4.8)$$

FÜR BETHS [222] Modell stammt aus dem Jahr 2016, weshalb eine Validierung mit aktuellen Fahrzeugen nötig ist, um dessen Anwendbarkeit sicherzustellen. Hierfür dient eine Schwerpunkthöhenvermessung über das Momentengleichgewicht auf einer schiefen Ebene mit Radlastmessung, die in der Vorarbeit [195, S. xvii-xviii] beschrieben ist. Die Vermessung der drei BEV „Tesla Model 3“, „VW ID.3“ und „BMW i3“ ergibt das in Tabelle 4.2 dargestellte Ergebnis:

Tabelle 4.2: Schwerpunkthöhenmessung und Vergleich mit der Schwerpunkthöhenregression nach Vorarbeit [195, S. 29]

Fahrzeug	Schwerpunkthöhe (Messung)	Schwerpunkthöhe (Regression)	Abweichung (absolut)	Abweichung (relativ)
Tesla Model 3	379,1 mm	514,5 mm	135,4 mm	35,7 %
VW ID.3	545,3 mm	559,1 mm	13,8 mm	2,5 %
BMW i3	579,0 mm	569,8 mm	-9,2 mm	-1,6 %

Das Regressionsmodell weist zu den Schwerpunkthöhenmessungen des VW ID.3 und des BMW i3 eine geringe Abweichung (2,5 % und 1,6 %) auf. Für den Tesla Model 3 ist es hingegen deutlich ungenauer (35,7 %). Ohne Kenntnisse der Datengrundlage von FÜR BETH [222] kann diese Abweichung nicht erklärt werden. Nichtsdestotrotz ist die Anwendbarkeit des Regressionsmodelles durch die Messungen aufgezeigt. Zum einen dürfte der Tesla Model 3 durch seine geringe Bodenfreiheit und seine niedrig verbaute Batterie für Regressionen der Schwerpunkthöhe ein Ausreißer sein und zum anderen existiert kein anderes Modell, das für diese Arbeit zur Schwerpunkthöhenberechnung verwendet werden könnte.

Als zweite Form der Korrelationsbildung sind die grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen durch die Wahl der minimalen und maximalen Ausprägung im Markt bzw. einer Analogie definiert. Bei den TE, die in heutigen Fahrzeugen existieren, aber nicht in der ADAC Datenbank oder der Benchmarkplattform a2mac1 [210] veröffentlicht sind oder deren heutige Ausprägungen in den Randbedingungen zukünftiger Mobilität unplausibel sind, wird auf Extremwerte in dieser TE von Fahrzeugen und Prototypen zurückgegriffen. Für neuartige TE, die durch autonome, geteilte und elektrische Mobilität entstehen, wird eine passende Analogie in anderen Mobilitäts- oder Lebensbereichen gewählt, um durch deren maximale und minimale Ausprägung die Korrelationsfunktionen zu bestimmen. Hierfür nutzt diese Arbeit verschiedene Quellen aus

Benchmarkplattformen, populären Fachzeitschriften, wissenschaftlicher Literatur und Normen, die in Anhang F (Tabelle F.2) dargestellt sind.

Abbildung 4.15 zeigt beispielhaft die Korrelationsfunktionen der TE „Türbreite pro Sitzplatz“ und „vordere Crashlänge“. Die Grenzwerte zum Erstellen der Korrelationsfunktionen entstammen der Benchmarkplattform a2mac1 [210] und sie sind beide positiv orientiert.

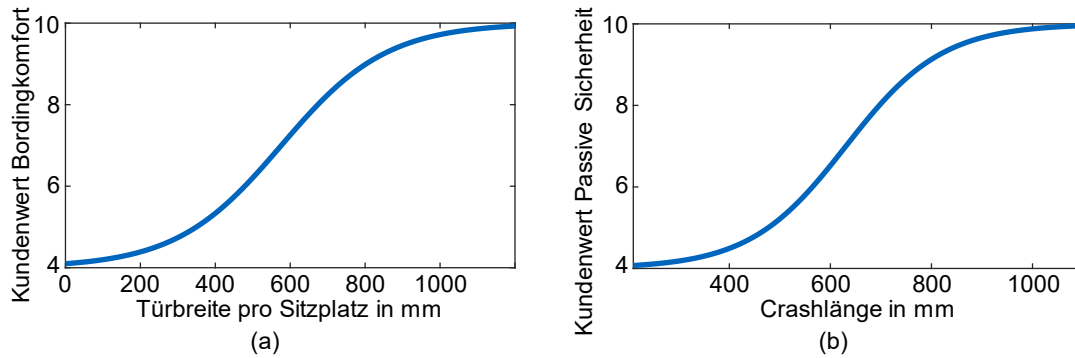


Abbildung 4.15: Auswahl der grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen: (a) Türbreite pro Sitzplatz in mm und (b) Crashlänge in mm

### 4.2.3 Ergebnisse

Die Korrelationsfunktionen (Abbildung 4.14, Abbildung 4.15 und Tabelle F.1) leiten aus den KWE, als Ergebnis des ersten Prozessschrittes (Abbildung 4.7), die TE, als Ergebnis dieses zweiten Prozessschrittes, ab.

Zur Präsentation der Ergebnisse dient weiterhin das FK 2, dessen Ausprägungen der TE in Tabelle 4.3 aufgelistet sind. Die entsprechenden Ausprägungen der KWE, die den Startpunkt dieses Prozessschrittes darstellen, sind zur besseren Nachvollziehbarkeit den TE gegenübergestellt.

Tabelle 4.3: Ausprägung der technischen Eigenschaften von FK 2 und die vorausgehenden Ausprägungen der kundenwerten Eigenschaften

Kundenwerte Eigenschaft	Kundenwert	Technische Eigenschaft	Phys. tech. Wert
<b>Fahrdynamik</b>			
Längsdynamik	7,0	Höchstgeschwindigkeit	203 km/h
		Beschleunigungszeit 0- 100 km/h	8,6 s
Querdynamik	7,0	Schwerpunkthöhe	649 mm
Vertikaldynamik	9,2	Aufbaubeschleunigung	0,58 m/s <sup>2</sup>
Wendefähigkeit	9,2	Wendekreis	9,0 m

## 4 Detaillierung des Vorgehens

---

Kundenwerte Eigenschaft	Kundenwert	Technische Eigenschaft	Phys. tech. Wert
<b>Ergonomie</b>			
Boardingkomfort	7,8	Tritthöhe	436 mm
		Lichte Höhe	1622 mm
Boardingzeit	6,7	Türbreite/Sitzplätze	550 mm
Beinfreiheit	7,3	Beinfreiheit L53	710 mm
Schulterfreiheit	6,7	Schulterfreiheit W3/Sitzplatz	500 mm
Kopffreiheit	7,5	Effektive Kopffreiheit H61	991 mm
Akustik im Innenraum	6,0	Schallpegel bei 100 km/h	66 dB
<b>Sicherheit</b>			
Passive Sicherheit	9,2	Crashlänge	810 mm
Qualität der Automation	8,2	Krit. Fahrereignisse pro 100.000 km	26
Aktive Sicherheit	7,6	Elastizität 60 - 100 km/h	4,4 s
<b>Alltagstauglichkeit</b>			
Schlechtwegefähigkeit	7,9	Bodenfreiheit	170 mm
Gepäckvolumen	7,0	Stauvolumen Personenfahrzeuge	450 l
Bewegungsradius	7,5	Reichweite (WLTP)	392 km
Ökonomie	6,3	Anschaffungskosten	44.300 €
Ökologie	9,2	Emissionen der Batterieherstellung	2,7 tCO <sub>2</sub> -eq.
Passagiere	8	Anzahl Sitzplätze	4
<b>Fahrstil</b>			
Komfort (Fahrstil)	8,7	Max. Ruck	0,54 m/s <sup>3</sup>
		Max. Beschleunigung	0,17 m/s <sup>2</sup>
Subjektive Sicherheit (Fahrstil)	7,5	Homöostatische Risikowahrnehmung	0,89
Reisezeitpotential (Fahrstil)	7,3	Schnelligkeit	1,99
Fahrverbrauch	4,8	Verbrauch pro 100 km	20,2 kWh
<b>Luxus</b>			
Built-In Infotainment	7,7	Bildschirmfläche/Sitzplatz	730 cm <sup>2</sup>
Exterieur-Design	7,1	Raddurchmesser	662 mm

### 4.2.4 Plausibilisierung

Nach den Ergebnissen, welche die TE des FK 2 vorstellen, sollen die Korrelationsfunktionen, auf denen diese Ergebnisse beruhen, plausibilisiert werden. Eine Validierung des Vorgehens ist nicht möglich, weil die Ergebnisse mit realen Daten verglichen werden müssten [223, S. 59, 224, S. 121], um zu prüfen, ob die Korrelationsfunktionen die reale Verknüpfung von KWE und TE abbilden [225, S. 15]. Wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, gibt es keine Datenbank, die diese Daten beinhaltet. Die OEM betrachten ihre Einschätzung des Kundenwertes aller KWE als geheim und veröffentlichen sie nicht.

Aus diesem Grund soll eine Plausibilisierung das Vorgehen bestätigen. Eine Plausibilisierung soll nach RABE ET AL. [225, S. 22] die Angemessenheit des Ergebnisses für die Anwendung durch die Nachvollziehbarkeit der Zusammenhänge und die Schlüssigkeit der Ergebnisse bestätigen. Die Nachvollziehbarkeit der Zusammenhänge ist durch die Zielsetzung des Prozessschrittes (Kapitel 4.2.1) und die darauf ausgelegte Herleitung des Vorgehens (Kapitel 4.2.2) gegeben.

Für die Schlüssigkeit der Ergebnisse sollen die datenbasierten und die grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen separat betrachtet werden. Das grenzwertbasierte Vorgehen lässt sich auf die datenbasiert erstellten Korrelationsfunktionen anwenden. Aus diesem Grund kann die Schlüssigkeit der datenbasierten Korrelationsfunktion durch einen Vergleich der beiden Möglichkeiten begutachtet werden. Für die grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen soll eine Expertenbefragung die Schlüssigkeit klären.

Zum Vergleich der beiden Korrelationsarten für die Plausibilisierung der datenbasierten Korrelationsfunktionen bedarf es ein Maß, das die Abweichungen misst. Übliche L-normierte Distanzmaße, wie Manhattan-Distanz oder Euklidische-Distanz, welche die Ähnlichkeit von Kurven beschreiben, sind durch die unterschiedlichen Einheiten und Dimensionen der TE nicht anwendbar [226, S. 113]. Eine vereinfachte Abwandlung dieser Ähnlichkeitsmaße durch den prozentualen Relativwert des maximalen Abstandes in Abszissen- ( $\Delta TE$ ) und Ordinatenrichtung ( $\Delta KWE$ ) sowie die Steigungen im Wendepunkt ( $\Delta S$ ) soll deshalb nachfolgend die Schlüssigkeit der datenbasierten Korrelationsfunktionen aufzeigen (Abbildung 4.16).

Diese Vergleichsmaße berechnen sich nach den Formeln (4.9) - (4.11).  $y_{limit}$  und  $x_{limit}$  sind der Ordinaten- und der Abszissenwert der grenzwertbasierten Korrelationsfunktion im maximalen Abstand zur datenbasierten Korrelationsfunktion in der jeweiligen Koordinate.  $y_{data}$  und  $x_{data}$  stellen die entsprechenden Werte der datenbasierten Korrelationsfunktion dar.  $S_{limit}$  und  $S_{data}$  bezeichnen die Steigung der grenzwert- bzw. der datenbasierten Korrelationsfunktion im Wendepunkt.

$$\Delta TE = \left| \frac{y_{limit} - y_{data}}{y_{data}} \right| \quad (4.9)$$

$$\Delta KWE = \left| \frac{x_{limit} - x_{data}}{x_{data}} \right| \quad (4.10)$$

$$\Delta S = \left| \frac{S_{limit} - S_{data}}{S_{data}} \right| \quad (4.11)$$

Als Einschränkung für die Berechnung von  $\Delta TE$  und  $\Delta KWE$  ist die KWE auf das Intervall zwischen dem Kundenwert 5 und dem Kundenwert 9 beschränkt, weil darüber hinaus in den konvergierenden Funktionen für  $\Delta TE$  hohe Werte entstehen, ohne dass die

## 4 Detaillierung des Vorgehens

Korrelationsfunktionen eine signifikante Abweichung aufweisen. Abbildung 4.16 veranschaulicht dieses Vorgehen zur Plausibilisierung der datenbasierten Korrelationsfunktionen:

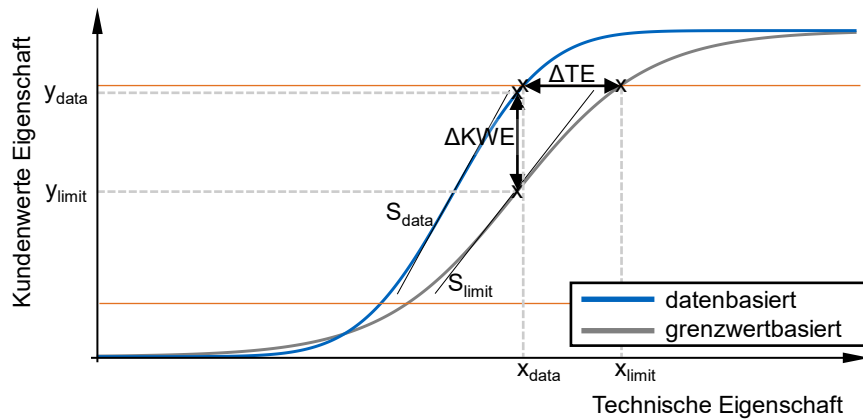


Abbildung 4.16: Plausibilisierung der datenbasierten Korrelationsfunktionen

Das 95. und das 5. Perzentil der Daten der jeweiligen TE stellen für die grenzwertbasierte Korrelationsfunktion die zu bestimmenden Werte für einen Kundenwert von 9,9 und 5 dar. Die Auswahl dieser Perzentile begründet sich durch die daraus entstehende Filterung von Sonderfahrzeugen mit extremen Ausprägungen spezifischer TE.

Mit diesem Plausibilisierungsverfahren ergeben sich die Abweichungen, die in Tabelle G.1 (Anhang G) dokumentiert sind. Abbildung 4.17 veranschaulicht den in der Plausibilisierung vorgenommenen Vergleich der Korrelationsfunktionen anhand der Auswahl aus Abbildung 4.14:

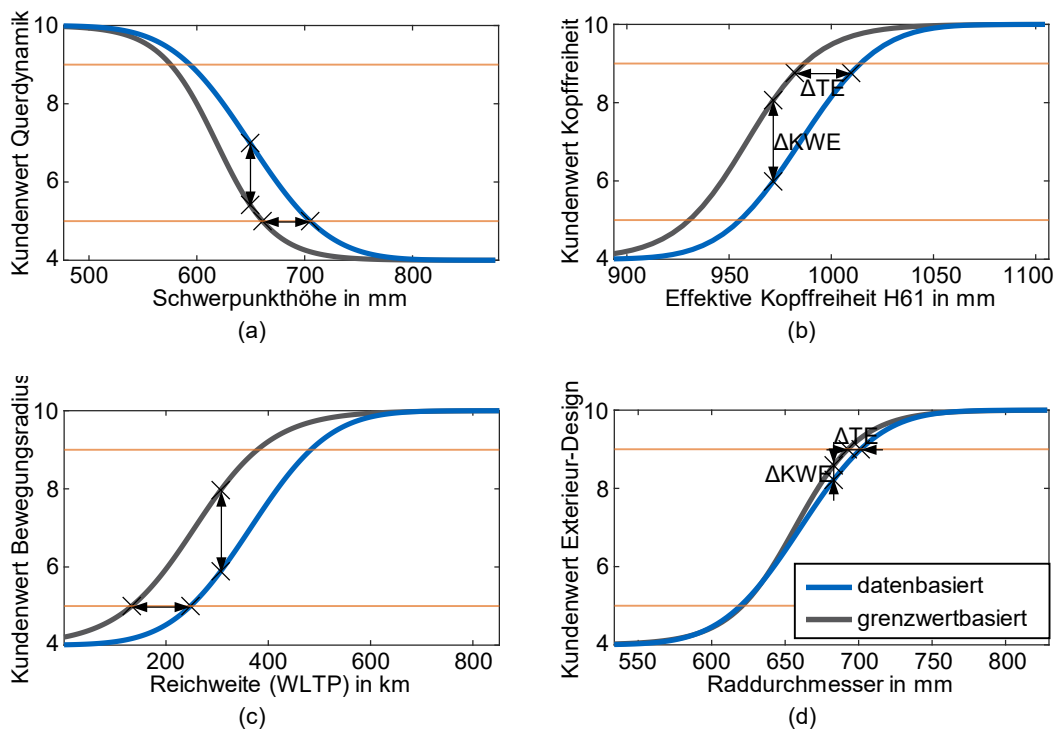


Abbildung 4.17: Auswahl der Plausibilisierung der datenbasierten Korrelationsfunktionen: (a) Schwerpunkthöhe in mm, (b) effektive Kopffreiheit H61 in mm, (c) Reichweite (WLTP) in km und (d) Raddurchmesser in mm

Lediglich die vier TE „Verbrauch“, „Anschaffungskosten“, „Fahrkomfort Beschleunigung“ und „Fahrkomfort Ruck“ weisen Abweichungen über 50% auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesen TE in den Ausprägungen große Ausreißer vorhanden sind, die trotz Vorfilterung durch die beschriebenen Perzentile die grenzwertbasierte Korrelationsfunktion verzerren. Insgesamt kann durch das Ergebnis das Vorgehen mit datenbasierten und grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen plausibilisiert werden, weil beide Verfahren ähnliche Ergebnisse liefern. Die Schlüssigkeit der datenbasierten Korrelationsfunktionen und deren Plausibilität ist damit bestätigt. Diese Plausibilisierung des Vorgehens zur Erstellung der datenbasierten Korrelationsfunktionen kann jedoch nicht als Validierung von deren Ergebnissen interpretiert werden.

Eine Befragung von zehn Experten soll die Plausibilisierung der zweiten Korrelationsfunktionsart, der grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen, liefern. Die Experten zeichnen sich durch ihr Wissen über die Konzeptentwicklung von AV oder die Korrelationsbildung zwischen KWE und TE aus. Zwei aktuelle Fahrzeuge bzw. aktuelle Beispiele der Analogie pro Korrelationsfunktion dienen als Plausibilisierungsfälle. Diese beiden Plausibilisierungsfälle variieren bei jeder TE zwischen neutraleren und extremeren Ausprägungen, um eine Varianz zu gewährleisten. Die Experten bewerten den jeweiligen Kundenwert der KWE. Durch einen grafischen Vergleich des Mittelwertes und des 10. und 90. Perzentils der Expertenantworten mit dem Kundenwert, der durch die Korrelationsfunktion bestimmt wird, kann die jeweilige Korrelationsfunktion plausibilisiert werden.

Dieses Vorgehen ist eine vereinfachte Form eines Box-Plot-Diagrammes, das für die Darstellung von Expertenantworten eine gebräuchliche Methode ist [227]. Die TE „Aufbaubeschleunigung“ und „kritische Fahrereignisse pro 100.000 km“ erfahren keine Plausibilisierung. Die ISO 2631-1 [228] bildet die Grundlage der Korrelationsfunktion der Aufbaubeschleunigung und sorgt durch die normierte Datengrundlage dafür, dass diese als plausibel gelten kann. Für die kritischen Fahrereignisse pro 100.000 km können zum jetzigen Zeitpunkt ausschließlich Daten aller autonomen Versuchsfahrten in Kalifornien [229] verwendet werden, weil diese als einzige Datenbank veröffentlicht werden müssen. Sie sollten keinen erforderlichen Serienstand abbilden, weshalb für die kritischen Fahrereignisse pro 100.000 km mit den angewendeten Methoden keine plausible Korrelationsfunktion erstellt werden kann. Dies ist nachzuholen, sobald Daten zu seriennahen Fahrten von AV vorliegen.

Die Plausibilisierungsergebnisse sind in Abbildung G.1 (Anhang G) dargestellt. Grundsätzlich zeigen sie eine hohe Schlüssigkeit und Plausibilität der Korrelationsfunktionen. Lediglich die TE „Tritthöhe“, „vordere Crashlänge“ und „Bildschirmfläche pro Sitzplatz“ ergeben eine Abweichung. Weil diese Abweichungen nur vereinzelt bei extremen Ausprägungen auftreten, ist davon auszugehen, dass bei der Befragung eine Tendenz zur Mitte [230, S. 200] die Experten zu neutraleren Antworten verleitet hat. Abbildung 4.18 zeigt beispielhaft die Plausibilisierungsergebnisse der TE „Lichte Höhe“ und „Türbreite pro Sitzplatz. Die Expertenantworten für die KWE sind mit ihrem Mittelwert und ihrem 10. und 90. Perzentil zum jeweiligen Fahrzeug dargestellt.

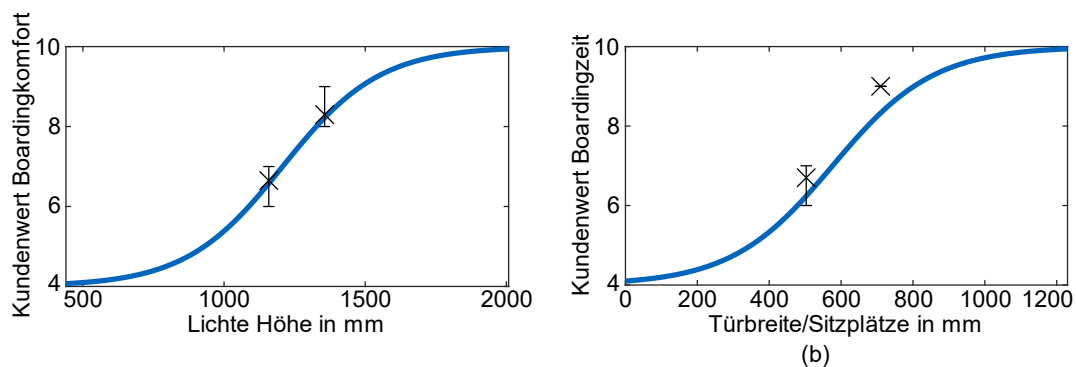


Abbildung 4.18: Auswahl der Plausibilisierung der grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen: (a) Lichte Höhe in mm und (b) Türbreite pro Sitzplatz in mm

### 4.2.5 Diskussion und Ausblick

Die Diskussion und der Ausblick der Ableitung von TE aus den KWE der FK bezieht sich erstens auf das Vorgehen und dessen Umsetzung im Rahmen dieser Arbeit (Kapitel 4.2.2) sowie zweitens auf die Ergebnisse und die Plausibilisierung (Kapitel 4.2.3 & 4.2.4).

Die Zielsetzung des zweiten Prozessschrittes (Kapitel 4.2.1) fordert eine Umwandlung der nominalskalierten KWE in physikalisch, technisch beschreibbare TE. Die Nutzung von Korrelationsfunktionen ermöglicht dies in kontinuierlicher Weise. Die in der Literatur geforderte degressive Form der Korrelationsfunktionen bei extremen Ausprägungen lässt sich durch die beiden vorgestellten Methoden (daten- und grenzwertbasiert) erreichen. Das datenbasierte Vorgehen kann für TE, die in konventionellen FK bereits bestehen, als robust betrachtet werden, weil es alle in Deutschland verkauften Fahrzeuge aufgreift und nach deren TE sortiert. Die Gewichtung nach Verkaufszahlen hebt zum einen besonders nachgefragte Ausprägungen einer TE hervor und filtert zugleich extreme Ausprägungen ohne relevante Verkaufszahlen heraus. Dieses datenbasierte Vorgehen dürfte alle Korrelationsfunktionen der einzelnen OEM, die diese geheim halten, verkaufszahlengewichtet zusammenführen.

Als Kritik an diesem Vorgehen muss festgestellt werden, dass für diese Arbeit Daten konventioneller (batterieelektrischer) FK für die Korrelationsfunktionen autonomer und geteilter FK genutzt werden. Inwieweit dies für beispielsweise Innenraummaße zutreffend ist, kann ohne weitergehende Probandenversuche an Sitzkisten nicht beantwortet werden. Diese Daten scheinen aber zum heutigen Zeitpunkt den geeignetsten Startpunkt für die Korrelationsfunktionen autonomer, geteilter und elektrischer FK zu bieten.

Für TE, die durch die Automation der Fahrfunktion an Bedeutung gewinnen oder durch diese eine Relevanz in der Fahrzeugkonzeptentwicklung erhalten und in heutigen FK nicht betrachtet werden, ermöglicht das grenzwertbasierte Vorgehen die Bildung von Korrelationsfunktionen. Durch die Auswahl passender Analogien und Testdaten aus Bereichen, in denen heutzutage diese TE eine Rolle spielen, ergeben sich Daten zur Bildung entsprechender Korrelationsfunktionen. Dabei ist die Wahl der Grenzwerte, welche die benötigten Datenpunkte für die mathematische Beschreibung nach DEUBEL [45, S. 56] liefern, ein bedeutender Manipulationsfaktor. Aus diesem Grund sind datenbasierte Korrelationsfunktionen objektiver und, sofern deren Erstellung möglich ist, den grenzwertbasierten vorzuziehen.



Nichtsdestotrotz erlaubt das zweigeteilte Vorgehen die Korrelationsfunktionsbildung für klassische TE mithilfe von Daten aus bestehenden Fahrzeugen, die anhand ihrer Verkaufszahlen gewichtet sind, sowie für neuartige TE mithilfe von Analogien und Testdaten. Somit ist für jede TE eine Korrelationsfunktion zu der ihr vorstehenden KWE möglich. Von den 27 identifizierten KWE können für drei keine passende TE gefunden werden, weil keine ausreichende Forschung zu der jeweiligen Quantifizierung besteht. Hier ist fachspezifische Grundlagenforschung nötig.

Die Korrelationsfunktionen der weiteren KWE und deren resultierenden TE als Ergebnisse werden in der Plausibilisierung auf ihre Schlüssigkeit überprüft. Die Plausibilisierung wird dabei zweigeteilt durchgeführt. Für datenbasierte Korrelationsfunktionen ist ebenfalls ein grenzwertbasiertes Vorgehen möglich, sodass deren Ähnlichkeit die Plausibilität zeigt. Dieses Vorgehen kann zwar die Plausibilität, aber keinesfalls die Validität der Ergebnisse aufzeigen. Für die grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen schätzen zehn Experten die Ausprägung der KWE anhand der Betrachtung bestehender Fahrzeuge. Dies ist zur groben Plausibilisierung der Ergebnisse für diese Fahrzeuge und für die gesamte Korrelationsfunktion geeignet. Es kann jedoch keine Validität bestätigen.

Eine Validierung der Korrelationsfunktionen benötigt je Verknüpfung von KWE und TE einen eigens dafür ausgelegten Versuch. Diese Versuche können je nach TE Fahrversuche, ergonomische Versuche an Sitzkisten, Designstudien oder weitere Versuchskonzepte sein. Anhand von Experten- und/oder Probandenstudien an diesen Versuchsaufbauten kann eine Validität der einzelnen Korrelationsfunktion überprüft werden. In einer Vorveröffentlichung [35], die mit einer Vorarbeit [231] verknüpft ist, werden beispielsweise Fahrversuche ermittelt, mit deren Hilfe die Korrelationsfunktionen des Fahrstils bewertet werden können. Diese Vorveröffentlichung stellt dabei aber fest, dass sie selbst nur der Ausgangspunkt für weiterführende Forschung in der Quantifizierung des Fahrstils von AV sein könne. Eine weitere Vorveröffentlichung [232] zeigt auf, wie anhand einer parametrischen Sitzkiste die KWE „Boardingkomfort“ und die dazugehörigen TE mit einer Probandenstudie tiefgreifender erforscht werden können. Diese detaillierten Versuche sind zukünftig zur Überprüfung der Validität der Korrelationsfunktionen für alle Verknüpfungen von KWE zu TE notwendig. Weitere Vorarbeiten [198–200] schlagen einige Versuchsaufbauten hierzu vor.

### 4.3 Technische Eigenschaften → Auslegungsparameter

Die abgeleiteten TE genügen nicht, um ein FK auszulegen. In diesem dritten Prozessschritt müssen daher die dafür nötigen Auslegungsparameter (Anhang H) ermittelt werden, die sich auf zu treffende Topologie- und Komponentenentscheidungen, die in den beiden vorherigen Prozessschritten nicht bestimmt werden konnten, beziehen. Außerdem genügt der Informationsgehalt der abgeleiteten TE nicht für alle benötigten Auslegungsparameter, weshalb diese erweitert werden müssen. Für diesen dritten Prozessschritt der Erschließung der Auslegungsparameter existiert eine Vorarbeit in [233].

#### 4.3.1 Zielsetzung

Neben den TE werden Topologie- und Komponententechnologieentscheidungen benötigt, um das FK abzuleiten. Bei den Topologieentscheidungen handelt es sich beispielsweise um die

## 4 Detaillierung des Vorgehens

Innenraum- oder die Antriebsstrangtopologie, die das FK maßgeblich beeinflussen. Entscheidungen zu Komponententechnologien sind unter anderem bei der elektrischen Maschine oder der Batterie nötig. Dementsprechend gilt es, diese Entscheidungen anhand der zum betrachteten FK vorliegenden Informationen bestmöglich zu treffen.

Zusätzlich genügen die nach dem zweiten Prozessschritt hergeleiteten 28 TE für die Ableitung des FK nicht. Deshalb müssen weitere TE, die in den vorgelagerten Prozessschritten nicht betrachtet werden konnten, anhand der Ausprägungen der vorhandenen TE und Sekundärtätigkeiten abgeschätzt werden. Ebenso sind Komponentenspezifikationen notwendig, die nicht aus Nutzerbedürfnissen hervorgehen, das Package des Fahrzeugs aber beeinflussen.

Dementsprechend dienen die bisher generierten Informationen mit den 28 TE als Eingangsgrößen des dritten Prozessschrittes. Die Ausgangsgrößen bilden KÖNIGS [24, S. xxxiii-xxxv] ungefähr 150 Auslegungsparameter (Anhang H), welche die hergeleiteten TE, zusätzlich abgeschätzte TE, Komponentenspezifikationen sowie Entscheidungen zu Topologien und Komponententechnologien enthalten.

### 4.3.2 Vorgehen

Zur methodischen Ableitung der für die Auslegung der FK benötigten Auslegungsparameter bedarf es verschiedener Ansätze. Topologie- und Komponententechnologieentscheidungen beinhalten diskrete Berechnungen, die sich ab einem jeweiligen Schwellwert ändern. Die Erweiterung der TE und Komponentenspezifikationen muss hingegen stetig erfolgen, weil diese durch physikalisch technische Einheiten beschrieben sind.

Neben einfachen Abhängigkeiten, bei denen der Auslegungsparameter aus einem Eingangsparameter bestimmt wird, existieren Verknüpfungen, bei denen dagegen Auslegungsparameter aus mehreren, in den vorherigen Prozessschritten ermittelten, Informationen berechnet werden müssen. Hierfür sind gewichtete Summen notwendig, um die Eingangsparameter zusammenzuführen. Die finale Überführung in den Auslegungsparameter kann je nach dessen Art diskret oder stetig erfolgen. Abbildung 4.19 zeigt das Vorgehen:

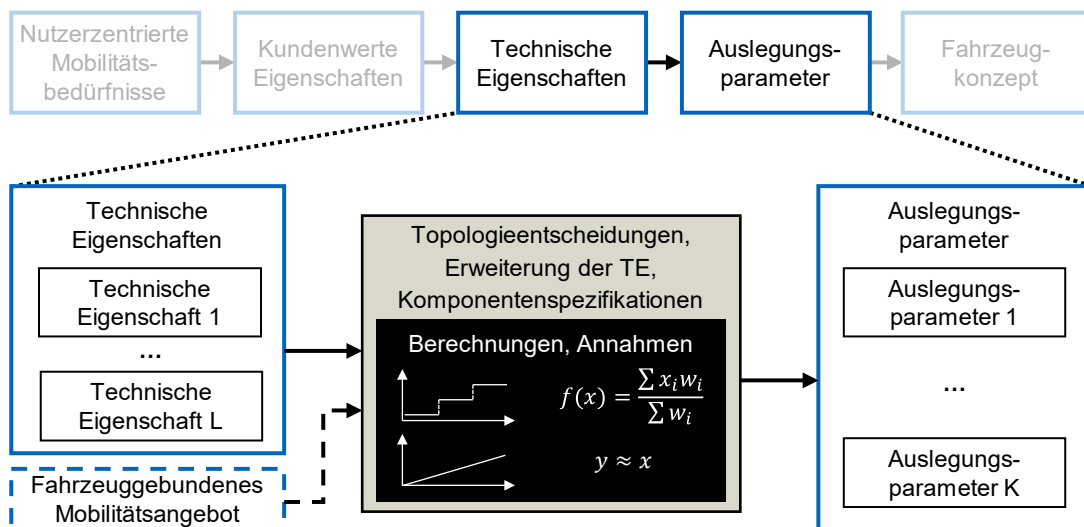


Abbildung 4.19: Vorgehen zur Ableitung von Auslegungsparametern aus technischen Eigenschaften

## Methodik

Grundsätzlich kann zwischen diskreten und stetigen Berechnungen unterschieden werden. Diskrete Modelle springen ab einem definierten Schwellwert der Abszisse auf den nächsten Lösungswert auf der Ordinate, während stetige Modelle kontinuierlich jedem Abszissenwert einen spezifischen Ordinatenwert zuordnen [234, S. 1-4, 235, 236]. In der Fahrzeugkonzeptentwicklung spielen beide zur Berechnung der Auslegungsparameter eine wichtige Rolle [72].

Topologie- und Komponententechnologieentscheidungen sind diskrete Berechnungen, weil eine Auswahl zwischen einer begrenzten Anzahl an Varianten notwendig ist. Beispielhaft ist bei der Antriebsstrangtopologie eine Entscheidung bezüglich Vorder-, Hinter- oder Allradantrieb zu treffen oder bei der Batterieauslegung der Zelltyp zu wählen [72]. Für diese Auslegungsparameterart müssen demnach Schwellwerte der zuvor berechneten Nutzerbedürfnisse oder TE bestimmt werden, ab denen eine andere Topologie oder Komponententechnologie gewählt wird. Abbildung 4.20 verbildlicht die Berechnung diskreter Auslegungsparameter:

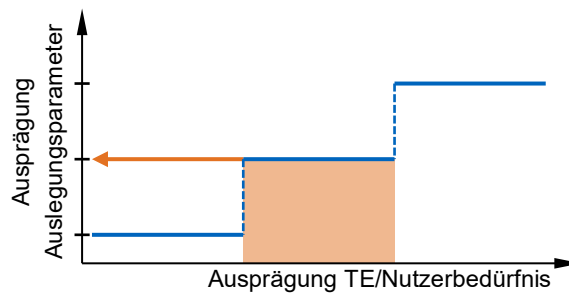


Abbildung 4.20: Berechnung diskreter Auslegungsparameter

Neben diesen diskreten Entscheidungen ist die Mehrzahl der Auslegungsparameter stetiger Natur. Diese sind physikalisch messbar und beschreiben Topologien oder Komponenten im Detail [72]. Bei diesen Auslegungsparametern handelt es sich zum einen um TE und zum anderen um Komponentenspezifikationen. Die Erweiterung der TE, die in den bisherigen Prozessschritten vernachlässigt wurden, kann durch eine stetige Berechnung, die lineare Zusammenhänge annimmt, erfolgen. Die unteren und oberen Grenzwerte der zu berechnenden Auslegungsparameter müssen definiert werden, sodass innerhalb dieser Grenzen eine lineare Interpolation mithilfe der bestehenden TE erfolgen kann. Abbildung 4.21 verdeutlicht dieses Vorgehen:

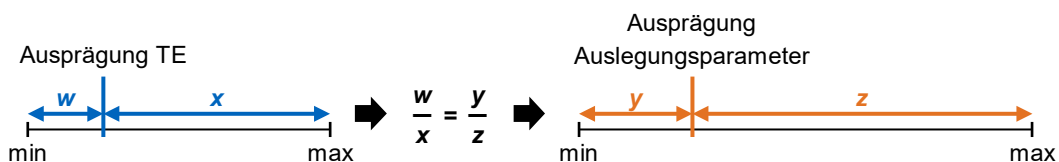


Abbildung 4.21: Berechnung stetiger Auslegungsparameter

## 4 Detaillierung des Vorgehens

Komponentenspezifikationen sind physikalische Merkmale der Komponenten, die sich nicht direkt aus dem Nutzerbedürfnis ergeben, sondern über das FK und dessen Package indirekten Einfluss haben. Sie sind für die Auslegung und Positionierung der jeweiligen Komponenten aber unerlässlich [72, 237]. Diese Komponentenspezifikationen als Auslegungsparameter sind durch Abschätzungen zu bestimmen. KÖNIG ET AL. [237] geben einen Überblick über relevante Parameter.

Einige Auslegungsparameter sind nicht ausschließlich auf Basis eines Eingangsparameters bestimmbar. Beispielsweise wirken sich die Ausprägungen aller Sekundärtätigkeiten auf die Innenraumtopologie oder auf den Sitzlehnenwinkel aus. Deshalb bedarf es über die jeweiligen Ausprägungen der Sekundärtätigkeiten gewichtete Berechnungen, um einen Wert zu erhalten. Dieser Wert kann aufgrund seiner Stetigkeit des Auslegungsparameters wie beim Sitzlehnenwinkel verwendet werden oder muss für diskrete Auslegungsparameter wie der Innenraumtopologie auf Basis von Abbildung 4.20 umgewandelt werden.

### Implementierung

Für die Beschreibung der Berechnung aller Auslegungsparameter (Anhang H und KÖNIG [24, S. xxxiii-xxxv]), die für die Auslegung des FK notwendig sind, sei auf die Vorarbeit vom RAUDSZUS [233] verwiesen. Nachfolgend wird auf exemplarische Fälle eingegangen, um die Implementierung der Auslegungsparameter zu erläutern. Dafür wird zuerst auf diskrete und auf kontinuierliche Auslegungsparameter eingegangen. Nachfolgend werden gewichtet berechnete Auslegungsparameter thematisiert.

Ein diskreter Auslegungsparameter, der als Beispiel Verwendung finden soll, ist die Anzahl der Sitzreihen. Er ist diskret, weil die Berechnung sprunghaft über die TE „Anzahl der Sitzplätze“ erfolgt. Die Anzahl der Sitzplätze reicht von null für reine Transportfahrzeuge bis neun für die maximale Personenanzahl in Pkw [172]. Gemäß heutigen Fahrzeugen existieren für null Sitzplätze null Sitzreihen, für ein bis zwei Sitzplätze eine Sitzreihe, für drei bis sechs Sitzplätze zwei Sitzreihen und für sieben bis neun Sitzplätze drei Sitzreihen [209]. Abbildung 4.22 zeigt diese Berechnung der Anzahl der Sitzreihen als diskreten Auslegungsparameter:

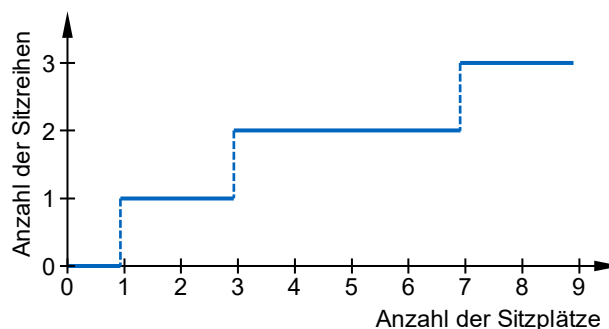


Abbildung 4.22: Diskrete Berechnung der Anzahl der Sitzreihen

Als exemplarische Implementierung der stetigen Auslegungsparameter dient die Abschätzung zur Erweiterung der TE um die hintere und die seitliche freie Crashlänge. Die jeweilige freie Crashlänge ist der maximale Weg, um den das Fahrzeug von außen eingedrückt werden kann, ohne dass die Fahrgastzelle intrudiert. Somit ist die freie Crashlänge die Summe aller Freiräume zwischen blockbildenden Komponenten an der jeweiligen Fahrzeugseite [28, S. 162]. Die hintere

und die seitliche freie Crashlänge können aus der TE „vordere freie Crashlänge“, die im bisherigen Prozessverlauf hergeleitet wurde, abgeschätzt werden. Deren Grenzwerte bilden das Intervall, in dem die lineare Interpolation zur Berechnung der Auslegungsparameter durchgeführt wird.

Dieses Vorgehen ist aus technischer Betrachtung nicht korrekt, weil die verschiedenen freien Crashlängen von unterschiedlichen Faktoren, wie der Insassensicherheit, der Batteriesicherheit, der Karosseriematerialien usw. geprägt werden, aber darüber hinaus auch indirekt durch weitere TE wie Exterieur-Design oder Kofferraumvolumen entstehen können. Dementsprechend besteht diese direkte Abhängigkeit einer linearen Interpolation zwischen der vorderen und den anderen freien Crashlängen nicht. Im Kontext der vorliegenden Arbeit, der die gesamte Fahrzeugkonzeptentwicklung betrachtet und nicht auf dieser Detaillierungsebene einzelne Auslegungsparameter mit allen Einflussfaktoren simulieren kann, ist diese umfängliche Berechnung jedoch nicht möglich, weshalb zur Grobabschätzung auf die lineare Interpolation zurückgegriffen wird.

Die Grenzwerte für die vordere freie Crashlänge sind 189 mm und 918 mm, sodass eine Intervalllänge von 729 mm entsteht [210]. Die hintere freie Crashlänge hat die Grenzwerte 150 mm und 550 mm und die seitliche freie Crashlänge 164 mm und 282 mm mit den jeweiligen Intervalllängen von 400 mm und 118 mm [210]. Mit diesen Maßen lassen sich anhand der Ausprägung der vorderen freien Crashlänge die beiden anderen Werte abschätzen. Mit einer vorderen freien Crashlänge von 380 mm ergibt sich demnach eine hintere freie Crashlänge von 255 mm und eine seitliche freie Crashlänge von 195 mm. Abbildung 4.23 verdeutlicht dieses Vorgehen:

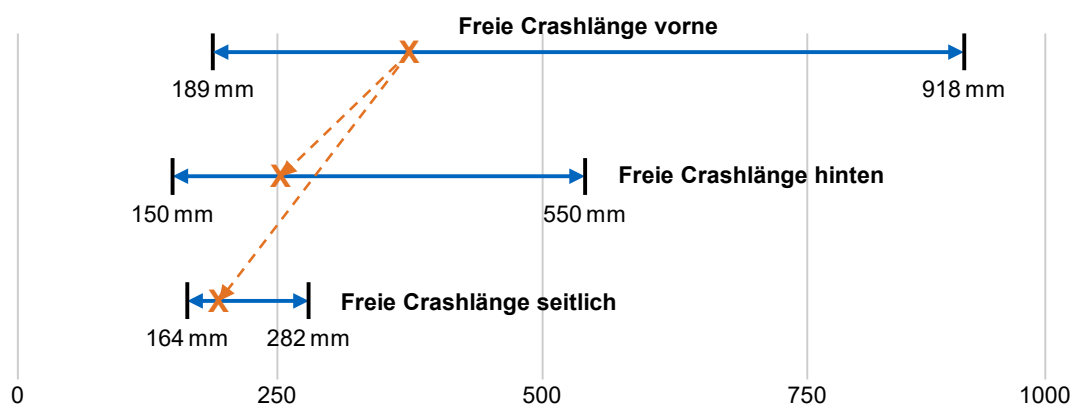


Abbildung 4.23: Stetige Berechnung zur Abschätzung der hinteren und seitlichen freien Crashlänge nach [233]; Daten der unteren und oberen Grenzwerte [210]

Für Auslegungsparameter, die von mehreren zuvor ermittelten Größen abhängen, sind gewichtete Berechnungen notwendig. Dies betrifft diskrete und stetige Auslegungsparameter. Ein Beispiel der diskreten gewichteten Berechnung ist die Innenraumtopologie. Für die stetige gewichtete Berechnung ist der Sitzlehnenwinkel exemplarisch.

Beide Auslegungsparameter ergeben sich aus den Ausprägungen der Sekundärtätigkeiten des Fahrzeugderivates. Die unterschiedlichen Sekundärtätigkeiten favorisieren verschiedene Innenraumtopologien und unterschiedliche minimale und maximale Sitzlehnenwinkel [238–242]. Der Wert des Auslegungsparameters  $x$  wird über eine gewichtete Summe mithilfe der Ausprägungen der Sekundärtätigkeiten  $SA_i$  als Gewichtungsfaktor und einem dieser Sekundärtätigkeit zugeordneten Wert des Auslegungsparameters  $x_i$  bestimmt (Formel (4.12)).  $i$  bezieht sich auf die in

## 4 Detaillierung des Vorgehens

dieser Arbeit betrachteten Sekundärtätigkeiten (menschliches) Selbstfahren (sd), Entspannen (re), Arbeiten (wo) und Schlafen (sl).

$$x = \frac{SA_{sd}x_{sd} + SA_{re}x_{re} + SA_{wo}x_{wo} + SA_{sl}x_{sl}}{SA_{sd} + SA_{re} + SA_{wo} + SA_{sl}} \quad (4.12)$$

Tabelle 4.4 fasst die in dieser Arbeit verwendeten Werte für die Auslegungsparameter je Sekundärtätigkeit zusammen und nennt die Quellen, anhand derer sie festgelegt sind. Bei den stetigen Auslegungsparametern des minimalen ( $\alpha_{\min}$ ) und maximalen Sitzlehnenwinkels ( $\alpha_{\max}$ ) ergibt sich durch Formel (4.12) und mithilfe der Parameter aus Tabelle 4.4 der Auslegungsparameterwert des betrachteten FK.

Für den diskreten Auslegungsparameter der Innenraumtopologie bedarf es zur mathematischen Berechnung der Einführung des Innenraumtopologiefaktors (ITF) als selbstdefinierter Ersatzfaktor. Bis zum Schwellwert von 50 definiert dieser eine vis-à-vis-Anordnung mit sich zugewandten Sitzreihen und darüber hinaus eine konventionelle Anordnung mit den Sitzreihen in Fahrtrichtung. Bei einer Sitzreihe ist diese immer in Fahrtrichtung orientiert und bei drei Sitzreihen sind für eine vis-à-vis-Anordnung die ersten beiden Sitzreihen sich zugewandt. Darüber hinaus existieren für zwei Sitzreihen eine Rücken-an-Rücken-Topologie und für drei Sitzreihen eine vis-à-vis-Anordnung, bei der die beiden hinteren Sitzreihen sich zugewandt sind. Diese werden als Sondertopologien betrachtet und finden deshalb in der automatisierten Auslegung keine Anwendung.

Tabelle 4.4: Parameterwert je Sekundärtätigkeit zur Berechnung der Auslegungsparameter Innenraumtopologie und Sitzlehnenwinkel

Sekundärtätigkeit (i)	Innenraumtopologiefaktor (ITF <sub>i</sub> )	Maximaler Sitzlehnenwinkel ( $\alpha_{\max,i}$ )	Minimaler Sitzlehnenwinkel ( $\alpha_{\min,i}$ )
Selbstfahren (sd)	100	83° [243, S. 376]	62° [243, S. 376]
Entspannen (re)	17 [238, S. 36-37, 239]	68° [240, S. 175, 241]	56° [240, S. 175, 241]
Arbeiten (wo)	50 [238, S. 36-37, 239]	90° [244]	60° [244]
Schlafen (sl)	83 [238, S. 36-37, 239]	25° [241, 242]	0° [241, 242]

### 4.3.3 Ergebnisse

Für die Berechnung der Auslegungsparameter dienen die TE und das fahrzeuggebundene Mobilitätsangebot als Eingangsgrößen. Für das FK 2 sind diese in Tabelle 4.3 respektive Abbildung 4.5 spezifiziert.

Die Auflistung aller Auslegungsparameter (Anhang H und KÖNIG [24, S. xxxiii-xxxv]) für FK 2 ist nicht sinnvoll. Exemplarisch werden in Tabelle 4.5 nur die Innenraumparameter der zweiten Sitzreihe aufgeführt:

Tabelle 4.5: Auslegungsparameter des FK 2 am Beispiel der Innenraumparameter der zweiten Sitzreihe

Auslegungsparameter	Wert	Auslegungsparameter	Wert
Anzahl Sitze	2	Zusätzliche Beinfreiheit	375 mm
Oberkörperlänge	965 mm	Breite der Rückenlehne	404 mm
Maximaler Sitzlehnenwinkel	55,7°	Einzelarmlehne Breite	80 mm
Minimaler Sitzlehnenwinkel	40,0°	Doppelarmlehne Breite	80 mm
Freiraum Kopf zur Decke	237,4 mm	Freiraum zwischen den Sitzen	96 mm
Sitztiefe	460 mm	Freiraum zur Wand	48 mm
Sitzverstellung x-Richtung	0 mm	Dicke der Rückenlehne	150 mm
Sitzhöhe	415 mm	Dicke des Sitzes	150 mm
Sitzverstellung z-Richtung	0 mm	Länge der Rückenlehne	868,5 mm
Fußlänge	285 mm		

Zur Beschreibung der Berechnung der Auslegungsparameter werden die zuvor in Kapitel 4.3.2 genannten Beispiele der Innenraumtopologie, des minimalen und maximalen Sitzlehnenwinkels sowie der hinteren und seitlichen freien Crashlänge aufgegriffen.

Einer der für FK prägendsten Auslegungsparameter ist die Innenraumtopologie. Diese wird mithilfe der diskreten gewichteten Berechnung in (Formel (4.12) und den Parameterwerten aus Tabelle 4.4 berechnet. Die Ausprägungen der Sekundärtätigkeiten von Derivat 2, welche die Gewichtungsfaktoren dieser Berechnung darstellen, sind für Selbstfahren 1,04, für Entspannen 6,02, für Arbeiten 0,53 und für Schlafen 2,40 (Abbildung 4.5). Aufgrund der Nichtbeachtung aller Werte unter 1,2 (Kapitel 4.1.3) gehen nur die Sekundärtätigkeiten „Entspannen“ und „Schlafen“ in die Berechnung ein. Dies ergibt einen Innenraumtopologiefaktor von 35,81, der unterhalb des Schwellwertes von 50 liegt und deshalb eine vis-à-vis-Anordnung für das FK initiiert. Auf die gleiche Weise findet eine gewichtete Berechnung des minimalen und maximalen Sitzlehnenwinkels statt. Für diese ergeben sich Werte von 40,0° und 55,7°.

Die Abschätzung der hinteren und seitlichen freien Crashlänge aus der vorderen freien Crashlänge wurde im Vorgehen als Beispiel für stetige Größen verwendet. Die TE „vordere freie Crashlänge“ des FK 2 beträgt 729 mm. Dies ergibt 74 % des Intervalls der vorderen Crashlänge von 189 mm bis 918 mm. Die entsprechenden abgeschätzten Werte für die hintere und die seitliche freie Crashlänge sind demnach 427 mm und 246 mm.

Alle weiteren Auslegungsparameter werden mit den vorgestellten Methoden berechnet. Für die detaillierte Beschreibung sei auf die Vorarbeit von RAUDSZUS [233] verwiesen.

### 4.3.4 Plausibilisierung

Die Plausibilität der Auslegungsparameter hat zwei Ebenen. Zum einen muss jeder Wert für sich und zum anderen müssen die Werte durch die bestehenden Wechselwirkungen in ihrer Gesamtheit plausibel sein.

## 4 Detaillierung des Vorgehens

---

Ersteres ist dadurch gegeben, dass die Topologien und Komponententechnologien als diskrete Auslegungsparameter sowie die erweiterten TE und Komponentenkennwerte als stetige Auslegungsparameter umsetzbar sein müssen. Dies kann mit dem vorgestellten Vorgehen nicht final behauptet werden, weil manche Technologien in ihrer Auslegung Sprünge beispielsweise aufgrund von Standardisierung einzelner Bauteile aufweisen. Das vorgestellte Vorgehen kann somit zu Werten innerhalb dieser Sprünge führen. Durch die Berechnungen im Rahmen der momentan vorhandenen Technologiegrenzen ergeben sich allerdings keine unplausiblen Auslegungsparameter.

Für die Plausibilität der Auslegungsparameter in der Gesamtheit als zweites gilt es, deren Zusammen- und Wechselwirkung zu betrachten. Diese ergeben im anschließenden Prozessschritt das FK. Dessen Plausibilität bestätigt dementsprechend nachgelagert die Plausibilität der gewählten Auslegungsparameter in ihrer Gesamtheit, wodurch dazu an dieser Stelle keine Aussage getroffen werden kann.

### 4.3.5 Diskussion und Ausblick

Die Auslegungsparameter werden nachfolgend in zwei Gruppen diskutiert: Es wird dabei zum einen in Topologie- und Komponententechnologieentscheidungen und zum anderen in die Erweiterung der TE und die Komponentenspezifikationen.

Topologie- und Komponententechnologieentscheidungen sind oftmals strategische Entscheidungen des OEM, in die sich die FK einordnen. In konventionellen Fahrzeugen definiert beispielsweise die Antriebsstrangtopologie bei einigen OEM das Markenimage, sodass neue FK diesbezüglich vorab festgelegt sind. Ebenso legen OEM Komponentenbaukästen an, auf deren Basis Komponententechnologien vorausgewählt werden. Unter anderem ist es für keinen OEM möglich, alle Batteriezelltypen variabel nach FK zu verwenden. Aufgrund von Standardisierung zur Erhöhung der Stückzahlen findet durch die strategische Baukastendefinition eine Vorauswahl statt, die in der Festlegung der Auslegungsparameter Grenzen setzt.

Eine auslegungsprozessgetriebene Entscheidung für alle Topologie- und Komponententechnologien scheint deshalb in der industriellen Anwendung nicht sinnvoll, um dem Fahrzeugkonzeptingenieur Freiheiten zu lassen, OEM spezifische Strategieentscheidungen anzuwenden. Aus wissenschaftlicher Sicht ist diese Entscheidung in dieser Arbeit implementiert, um Ergebnisse aus dem gesamten Lösungsraum ableiten zu können.

Nichtsdestotrotz sollten nicht alle Topologieentscheidungen beim OEM standardisiert werden. Deren Auswirkung auf die Erfüllung der Nutzerbedürfnisse scheint eine sinnvolle Abwägung zu sein. Topologieentscheidungen, die direkt vom Nutzer wahrgenommen werden, sollten variabel und durch den Prozess herleitbar sein. Die Innenraumtopologie, die maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der Ausübung von Sekundärtätigkeiten hat, ist ein solches Beispiel.

Die zweite Gruppe, die erweiterten TE und die Komponentenspezifikation, sind als Prozessschritt an dieser Stelle nur nötig, weil es im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich ist, für alle Auslegungsparameter die gesamte Prozesskette zu betrachten. Somit ist diese nachträgliche Abschätzung der Auslegungsparameter für den industriellen Einsatz nicht zu empfehlen, sondern nur in Ausnahmefällen anzuwenden. Die systematische Herleitung aller TE über die gesamte Prozesskette sollte das Ziel sein.



## 4.4 Auslegungsparameter → Fahrzeugkonzept

Der vierte und finale Prozessschritt leitet anhand der zuvor berechneten Auslegungsparameter das FK mit seinem Packageplan und allen weiteren Informationen ab. Diese Simulationen stützen sich weitgehend auf die Dissertationen von KÖNIG [24] und NICOLETTI [25]. Die notwendigen Erweiterungen dieser beiden Vorgehen zur Integration von Softwareaspekten in die Fahrzeugkonzeptentwicklung kommen unter anderem aus der Dissertation von KOCH [23] und sind in der Vorveröffentlichung [245] und den Vorarbeiten [201, 233, 246, 247] aufbereitet.

### 4.4.1 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieses letzten Prozessschrittes ist deckungsgleich mit der Zielsetzung des Gesamtprozesses (Kapitel 3.1). Es gilt, autonome, geteilte und elektrische FK zu erstellen und darzustellen. Dies beinhaltet zum einen, das Package unter den Randbedingungen von zukünftiger Mobilität umzusetzen, und zum anderen, konzeptrelevante Aspekte der Software des Fahrzeugs in einer Anforderungsliste zu sammeln.

Für das Package müssen neue Auslegungskriterien definiert werden. Die konventionelle Packageerstellung nach SAE J1100 [217], die unter anderem den Ferspunkt des Fahrers, der in AV nicht mehr vorhanden ist, als Startpunkt für die Innenraumauslegung definiert, ist zum Teil nicht anwendbar. Für die Anforderungsliste muss definiert werden, welche softwarebasierten Aspekte konzeptrelevant sind und aus diesem Grund Teil der Beschreibung des FK sein müssen.

Generell gilt für den Prozessschritt der Generierung des FK, dass überprüft werden muss, inwieweit Modellierungen für konventionelle BEV auf die Entwicklung von autonomen, geteilten und elektrischen FK übertragen werden können und welche Teilmodelle durch Anpassungen übertragbar sind.

Als Eingangsgrößen für diesen Prozessschritt dienen die im vorherigen Prozessschritt (Kapitel 4.3) abgeleiteten Auslegungsparameter. Mithilfe dieser müssen die Komponenten dimensioniert und positioniert sowie alle weiteren Informationen hergeleitet werden.

### 4.4.2 Vorgehen

Zur Generierung des FK aus den Auslegungsparametern sind verschiedene Teilprozessschritte notwendig (Abbildung 4.24). In einem ersten Schritt sind spezifische Komponentenkennwerte mithilfe von Simulationen zu beziffern. Eine LDS berechnet beispielsweise aus den gewählten Auslegungsparametern zu Beschleunigungszeit, Höchstgeschwindigkeit oder Reichweite die Komponentenkennwerte des Batterieenergieinhaltes oder der Spezifikation der elektrischen Maschine. In einem zweiten Schritt gilt es, die Softwareeinflüsse auf diese konventionelle, hardwarebasierte Simulation durch eine Manipulation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Beispielsweise kann Eco-Driving in AV den Verbrauch des FK reduzieren [23]. Diese Einsparung muss auf die zuvor berechneten Komponentenkennwerte angewandt werden. Mithilfe dieser Werte kann im dritten Schritt eine Komponentenauswahl durch deren Dimensionierung erfolgen. Die Positionierung der Komponenten im Package als vierter Schritt ergibt die Hardware des FK.

## 4 Detaillierung des Vorgehens

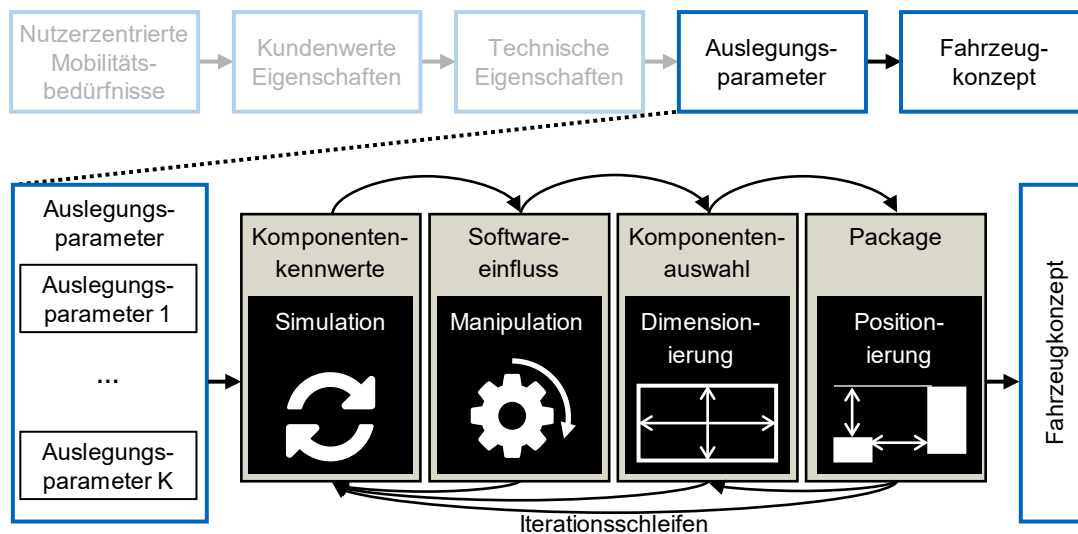


Abbildung 4.24: Vorgehen zur Ableitung von Fahrzeugkonzepten aus Auslegungsparametern

Die Umsetzung durch die Integration der Dissertationen von NICOLETTI [25], KÖNIG [24] und KOCH [23] sind nachfolgend methodisch und in ihrer Implementierung beschrieben. NICOLETTI [25] befasst sich mit konventionellen BEV und bildet mit seinen Modellen das Grundgerüst. KÖNIG [24] baut auf ihn auf und erweitert die Modelle zur Hardwareauslegung von AV. KOCH [19] beschäftigt sich mit der Antriebsstrangauslegung von AV und zeigt, wie Eco-Driving-Algorithmen und deren erzielte Energieeinsparung Auswirkung auf das FK haben.

### Methodik

Die Vorgehen von NICOLETTI [25, S. 23-56] und KÖNIG [24, S. 27-60], welche die konventionelle, hardwarebasierte Fahrzeugkonzeptentwicklung als Zielsetzung haben, berücksichtigen in ihrer Zielsetzung keine Softwareeinflüsse. Des besseren Verständnisses halber wird die Methodik deshalb nachfolgend nicht in der Prozessreihenfolge „Komponentenkennwerte“, „Softwareeinfluss“, „Komponentenauswahl“ und „Package“ beschrieben. Stattdessen wird auf die Vorgehen von NICOLETTI und KÖNIG, die aufeinander aufbauen, eingegangen und die Integration der Ergebnisse von KOCH als Softwareeinfluss herangezogen.

NICOLETTI [25] modelliert BEV in der frühen Entwicklungsphase mit dem Hauptziel der Quantifizierung von volumetrischen und gravimetrischen Sekundäreffekten zur Bestimmung optimaler BEV-Antriebsstrangtopologien. Der Lösungsraum möglicher Topologien ist durch eine Analyse vordefiniert [73]. Die Grundlage seiner Modellierungen stellt eine Komponentendatenbank [248] dar und als Eingangsgrößen dienen klassische Auslegungsparameter [72]. Abbildung 4.25 veranschaulicht das Vorgehen von NICOLETTI [25, S. 23].

Eine LDS [249] ermittelt aus diesen Auslegungsparametern die benötigten Komponentenkennwerte, die in die volumetrische Modellierung eingehen. Diese Modellierung erfolgt für die sieben Module „Karosserie“, „Fahrwerk“ (u.a. [250]), „Exterieur“, „Interieur“ (u.a. [76]), „Antriebsstrang“ (u.a. [76, 251]), „Elektronik“ und „Sonstiges“ mit empirischen Modellen, die aus der Komponentendatenbank abgeleitet werden. Aus den berechneten Dimensionen der Komponenten erfolgt deren empirische Massemodellierung [252], die sich an den Vorgehen von S. FUCHS [48] und FELGENHAUER [253] orientiert.

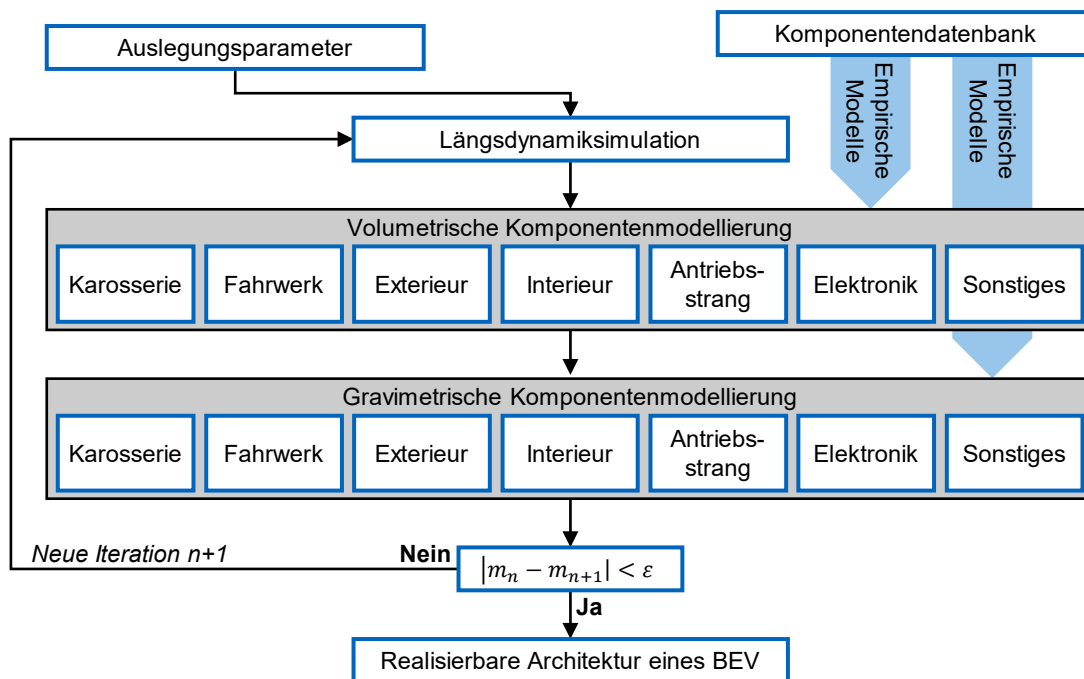


Abbildung 4.25: Vorgehen von NICOLETTI zur Modellierung der Hardware und des Packages von BEV nach [25, S. 23]

Zur Berechnung der Sekundäreffekte erfolgt dieses Vorgehen in Iterationsschleifen bis der Masseunterschied zweier aufeinander folgenden Iterationen ( $m_n$  und  $m_{n+1}$ ) eine Toleranzgrenze  $\varepsilon$  unterschreitet. Das daraus resultierende FK ist eine realisierbare Architektur eines BEV mit den gewünschten Auslegungsparametern unter Berücksichtigung volumetrischer und gravimetrischer Sekundäreffekte.

KÖNIG [24] entwirft eine Methodik zur Hardwareauslegung von autonomen FK (Abbildung 4.26). Dafür analysiert er die Komponenten auf Anpassungen durch neue oder hinzukommende Technologien oder durch verändertes Nutzerverhalten und erarbeitet eine neue Packagegenerierung, welche die Anforderungen an ein autonomes FK erfüllt [60].

Für das Vorgehen von KÖNIG sind Auslegungsparameter, die sich durch die Auslegung eines autonomen FK von NICOLETTI unterscheiden, als Eingangsgrößen zu bestimmen. In der Antriebsstrangauslegung als ersten Schritt seines Vorgehens berechnet die gleiche LDS wie bei NICOLETTI [249] auf Basis der Auslegungsparameter die Komponentenkenwerte, die für die Komponentendimensionierung herangezogen werden. Für die Komponentendimensionierung nutzt er die volumetrischen Modellierungen von NICOLETTI [25, S. xxxix-xlvi].

Die Generierung des Packages stellt einen wesentlichen Neigkeitswert bei KÖNIG [24] dar. Neben den Freiheiten bei der Innenraumtopologie in Form von veränderten Sitzanordnungen wie vis-à-vis existieren neue Freiheitsgrade durch reduzierte Randbedingungen [58]. Zum einen sind konventionelle Methoden mit Maßketten, die den Ferspunkt des Fahrers als Ausgangspunkt nehmen [217], für die Generierung des Packages von AV nicht bindend, und zum anderen verändern sich generelle Anforderungen an das Package sowie vorgesehene Packageräume für bestimmte Funktionen. Nicht mehr benötigte Sichtfelder des Fahrers und neue Freiräume für Kofferraum und Karosserie sind nur Beispiele [58].

## 4 Detaillierung des Vorgehens

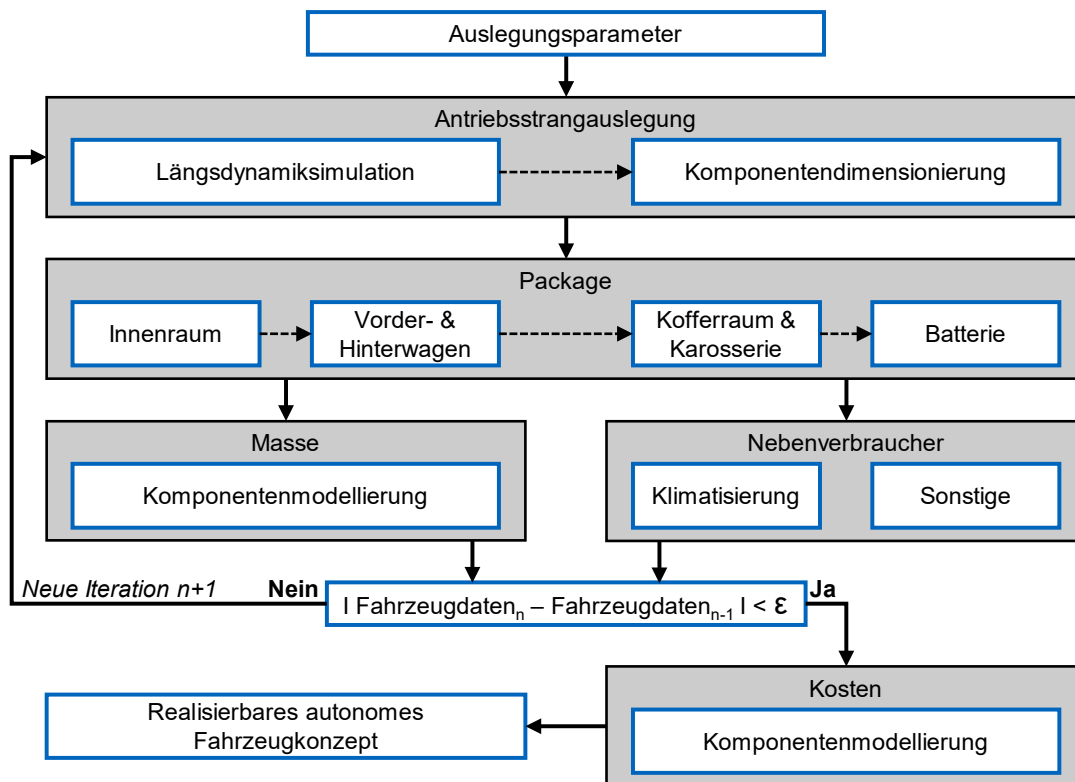


Abbildung 4.26: Vorgehen von KÖNIG zur Modellierung der Hardware und des Packages von AV nach [24, S. 35]

Mit den dimensionierten Komponenten des Antriebsstranges und dem Gesamtfahrzeugpackage ist es möglich, die Fahrzeugmasse über Komponentenmodellierungen, die größtenteils von NICOLETTI [25, S. xlvii-lii] stammen, zu bestimmen. Des Weiteren berechnet KÖNIG auf Basis des Packages die Nebenverbraucher des FK, wie insbesondere die Klimatisierung [254], die von dessen Innenraumdimensionen abhängt.

Ergebnisse einzelner Teilschritte haben Auswirkungen auf vorgelagerte Schritte. Beispielsweise ist die Gesamtfahrzeugmasse eine wichtige Größe der LDS oder der Nebenverbrauch bestimmt die Dimensionierung der Batterie mit. Deshalb initiiert KÖNIG eine Iterationsschleife nach Masse- und Nebenverbrauchersimulation zur Antriebsstrangauslegung. Als Kriterium zum Start dieser Iterationsschleife dient ein Vergleich von Fahrzeugdaten mit der vorherigen Iteration (Fahrzeugdaten<sub>n</sub> und Fahrzeugdaten<sub>n-1</sub>). Fällt die Differenz dieser Fahrzeugdaten unter eine Toleranzgrenze  $\epsilon$  ermittelt eine Kostenmodellierung die Kosten des realisierbaren autonomen FK, das wiederum das Ergebnis des Vorgehens für die initial angegebenen Auslegungsparameter ist.

Die Auslegungen von NICOLETTI und KÖNIG sind hardwarebasiert und berücksichtigen keinen Einfluss der Software, die eine immer größere Rolle in autonomen, geteilten und elektrischen FK spielt [255]. Ein Softwareeinfluss, der maßgebliche Auswirkungen auf das FK haben kann, ist Eco-Driving [256]. Durch einen optimierten Betriebspunkt des Antriebsstranges, den das Fahrzeug selbst wählt, weil er nicht von einer Pedalstellung, die vom Fahrer vorgegeben wird, gesetzt wird, kann der Verbrauch des Fahrzeugs reduziert werden [256]. KOCH zeigt nicht nur dieses Potential [256] auf, sondern präsentiert Sekundäreffekte über eine Antriebsstrangoptimierung, die sich aus dem Eco-Driving ergeben [257]. Mit seinem Eco-Driving-Algorithmus [258]

können AV bis zu 8 % des Verbrauchs einsparen, wodurch die Batterie kleiner dimensioniert und Masse eingespart werden kann.

Einen weiteren Einfluss von Software auf das Konzept eines AV ergibt sich durch den Fahrstil. Die Fahrweise des FK beeinflusst maßgeblich die Wahrnehmung der Insassen in Bezug auf Fahrkomfort, subjektive Sicherheit und Reisezeit. Deshalb bedarf es Fahrzyklen, die diesen Einfluss aufnehmen. Entsprechende an den Fahrstil angepassten Fahrzyklen sind in einer Vorveröffentlichung [245] und deren Implementierung [259] detailliert beschrieben und simulierbar.

### Implementierung

Die Implementierung der Fahrzeugkonzeptgenerierung beruht auf der Implementierung von KÖNIG [24, S. 34-60, 260], die die Komponentenmodelle von NICOLETTI [25, S. xxxix-lii] aufgreift und integriert hat. Nach der Simulation der Komponentenkennwerte ist aufbauend auf KÖNIG eine Erweiterung eingefügt, um Softwareeinflüsse aufzugreifen.

Die Auslegungsparameter, die der dritte Prozessschritt (Kapitel 4.3) als Ergebnis generiert, beinhalten alle Eingangsparameter von KÖNIG [24, S. xxxiii-xxxv]. Lediglich Auslegungsparameter für den Softwareeinfluss, wie Eco-Driving, sind zusätzlich ergänzt. Aus diesem Grund greift diese Arbeit die Implementierung von KÖNIG [24, S. 34-60, 260] vollständig auf und fügt nach der LDS den Softwareeinfluss ein. Der Ablauf ist nachfolgend beschrieben:

Die LDS [249, 261] berechnet aus den Auslegungsparametern und Werten eines Initialfahrzeuges bzw. den Werten der vorherigen Iterationsschleife (Abbildung 4.26) Komponentenkennwerte des Antriebsstranges. Dies inkludiert die Kennwerte der elektrischen Maschine, wie die Skalierung deren Kennfeldes, Getriebekennwerte, wie dessen Übersetzung, und Gesamtfahrzeugkennwerte, wie dessen Verbrauch. Die LDS beruht dabei weiterhin auf klassischen Fahrzyklen, wie den WLTP [221]. Eine Integration der bereits veröffentlichten Fahrzyklen basierend auf Fahrstileigenschaften [245, 259] erfolgt aufgrund der fehlenden Kompatibilität mit der LDS [249], die KÖNIG und NICOLETTI verwenden, nicht.

Der Einfluss der Software des AV auf dessen Kennwerte findet anschließend Betrachtung. Eine Manipulation der berechneten oder vorgegebenen Kennwerte um einen Faktor des Softwareeinflusses stellt sicher, dass deren Auswirkungen in der Komponentenauslegung berücksichtigt werden.

KOCH [23, S. 35-53] präsentiert durch seinen Eco-Driving-Algorithmus [258, 262] ein Werkzeug, um die Einsparmöglichkeiten durch intelligentes energieeffizientes Fahren zu quantifizieren. Je nach Literatur [263–267] werden Einsparpotentiale von bis zu 40 % diskutiert. Diese Studien variieren aber in ihrer Systemgrenze und operieren teilweise unter theoretischen Maximalbedingungen. Die vorliegende Arbeit schlägt einen Konstantwert vor, der je nach beabsichtigter Integration von Eco-Driving-Algorithmen angepasst werden muss, weil die Methodik von KOCH [23, S. 35-60] in die Fahrzeugkonzeptentwicklung, wie sie in der vorliegenden Arbeit beschrieben wird, nicht vollständig integrierbar ist und eine einfache Approximation der Komplexität des Problems nicht gerecht wird. Nach KOCH [23, S. 62-64, 256, 258] ist ein initialer Konstantwert von 5 % Energieersparnis zu wählen.

Mithilfe der Komponentenkennwerte und deren softwarebegründeter Manipulation können die Komponenten des FK dimensioniert werden. Hierfür findet die volumetrische Komponentenmodellierung von NICOLETTI [25, S. xxxix-xlvi] bei KÖNIG [24, S. 40-53] Anwendung. NICOLETTI

## 4 Detaillierung des Vorgehens

gliedert die verschiedenen Gewerke des FK (Abbildung 4.25) in Komponenten und detailliert diese, wenn dies zur Modellierung notwendig ist, in ihre Bauteile. Empirische Regressionen, die auf vorhandenen Fahrzeugkomponenten basieren, ermitteln die geometrischen Maße dieser Bauteile anhand der berechneten Komponentenkennwerte. Die Datenbank [248], die er für dieses Vorgehen benötigt, beinhaltet beispielsweise geometrische Daten der Benchmarkingplattform A2mac1 [210] und Komponentenkennwerte der ADAC Datenbank [209]. Die empirischen Regressionen liefern einen Konstantwert für die geometrischen Abmaße eines Bauteils, wenn diese von keinem Komponentenkennwert abhängig sind, oder eine lineare Regression über die, für das Bauteil relevanten, Komponentenkennwerte. Die resultierenden volumetrischen Komponentenmodellierungen sind bei NICOLETTI [25, S. xxxix-xlvi] detailliert hergeleitet und beschrieben.

Zur Erläuterung der Modellierung von NICOLETTI soll nachfolgend beispielhaft seine Herleitung der Regression für das Statorvolumen einer elektrischen Maschine ( $V_{mach,stat}$ ) beschrieben werden. Mithilfe des Statorvolumens berechnet er über einen empirisch ermittelten Faktor des Verhältnisses der Statorlänge und des Statordurchmessers, der von der Art der elektrischen Maschine (Permanentmagnet-Synchronmaschine oder Drehstrom-Asynchronmaschine) abhängt, die geometrischen Abmaße des Stators. Die Berücksichtigung der Dicke des Gehäuses der elektrischen Maschine, die er über einen Konstantwert approximiert, liefert deren Komponentendimensionen [25, S. xlii-xliv].

Seine Berechnung des Statorvolumens basiert auf einer Regression mit der maximalen Leistung der elektrischen Maschine ( $P_{mach,max}$ ). Abbildung 4.27 zeigt die Datenpunkte, die er für die Regression heranzieht, und die resultierende empirische Regression, die Formel (4.13) ergibt [25, S. xliii]:

$$V_{mach,stat} = -2,793 l + (0,0948 l kW^{-1}) P_{mach,max} \quad (4.13)$$

Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , das angibt, wie viele Prozent der Varianz der Ordinate durch die Abszisse beschrieben sind [268, S. 219], beträgt für die Regression des Statorvolumens 87,2%.

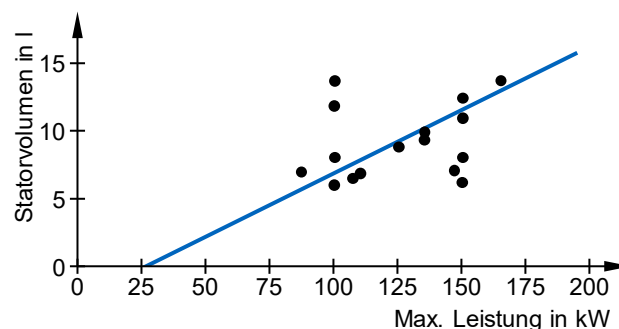


Abbildung 4.27: Empirische Regression am Beispiel des Statorvolumens über der maximalen Leistung der elektrischen Maschine nach [269, S. 45]

Die auf diese Weise dimensionierten Komponenten werden im Zuge der Generierung des Packages positioniert. Wie im Teil Methodik dargestellt, ist dies mit dem konventionellen Vorgehen [217] nicht möglich, weil zum einen der Ferspunkt des Fahrers als Startpunkt der Innenraumauslegung nicht existiert und zum anderen Freiheitsgrade, die sich durch die Automation der Fahraufgabe ergeben, nicht berücksichtigt werden. KÖNIG [24, S. 40-53, 58]

entwickelt deshalb eine Methode zum Packaging der Komponenten in AV, die auf Grenzflächen basiert (Abbildung 4.28).

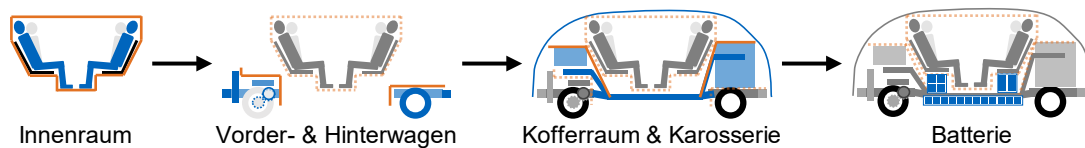


Abbildung 4.28: Grenzflächenbasiertes Package nach KÖNIG [24, S. 42, 58]

Durch die Ausführung von Sekundärtätigkeiten und dem Wegfall der Fahraufgabe steigt der Innenraum für die Nutzer des Fahrzeugs zu dessen wichtigstem Bereich auf [35]. Die Grenzflächen des Innenraums stellen dementsprechend den ersten Auslegungsschritt dar. Nach oben bestimmt die Kopffreiheit der Passagiere diese Grenzfläche. Je nach Innenraumtopologie begrenzen nach vorne und hinten der Sitz mit seinem Verstellfeld oder die Beinfreiheit den Innenraum. Nach unten schließen die Sitzhöhe und die Fußaufstandsfläche die Grenzfläche ab. [24, S. 42-45]

Die Grenzflächen des Vorder- und Hinterwagens mit den Komponenten des Antriebsstranges und des Fahrwerks bilden den zweiten Auslegungsschritt. Je nach Antriebstopologie sind diese im Vorder- oder Hinterwagen zu positionieren und benötigen zur Funktionserfüllung ausreichend Bauraum [24, S. 46-49]. Als Drittes muss das benötigte Kofferraumvolumen zwischen dem vorderen und hinteren Ende der Grenzfläche des Innenraums und den Grenzflächen des Vorder- und des Hinterwagens vorgesehen werden. Die Karosserie bildet mit der Crashstruktur über Vorder- und Hinterwagen und der Außenhaut, die alle bisherigen Grenzflächen umschließt, ein zusammenhängendes Fahrzeug [24, S. 49-52]. Der letzte Schritt füllt das benötigte Batterievolume im Bauraum im Unterboden und unter den Sitzen auf [24, S. 52-53].

Nach dem Packaging ist es möglich, die Gesamtmasse des FK zu bestimmen, weil alle Gewerke mit ihren Komponenten, einschließlich der Karosserie mit dem Crashsystem, definiert sind. Die Massemodellierung stammt bei KÖNIG [24, S. 56-57] wie die volumetrische Modellierung von NICOLETTI [25, S. xvii-lij, 252]. Diese gravimetrischen Modelle basieren vergleichbar mit den volumetrischen Modellen (Abbildung 4.27) auf empirischen Regressionen, die lineare Zusammenhänge zu geometrischen Abmessungen, spezifischen Komponenten Kennwerten oder der Masse anderer Komponenten bzw. des Gesamtfahrzeuges aufweisen oder mit einem Konstantwert die Komponentenmasse approximieren. Diese gravimetrischen Modellierungen können bei NICOLETTI [25, S. xvii-lij] eingesehen werden.

Neben der finalen Massemodellierung ist die Bestimmung der Nebenverbraucher nach der Generierung des Packages möglich, weil die Auslegung des größten Nebenverbrauchers, der Klimatisierung, vom Innenraumvolumen abhängt. KÖNIG [24, S. 53-55, 254] modelliert die Klimatisierung durch ein auf Regressionen basierendes Metamodell der in der Industrie verwendeten Klimatisierungssimulation KULI [270]. Ebenso zählen die für die automatisierte Fahrfunktion benötigte Sensorik und Rechenleistung zu den Nebenverbrauchern, weil sie nicht der direkten Bewegung des Fahrzeugs dienen [265, 271]. KÖNIG [24, S. 53] quantifiziert diese Art des Nebenverbrauchs über Literaturwerte.

Durch eine Prüfung der Konvergenzkriterien startet KÖNIG [24, S. 34-35] eine weitere Iterationschleife oder leitet das finale Ergebnis seines Vorgehens aus. Die betrachteten Konvergenzkriterien, auf deren Basis ein vernachlässigbarer Unterschied des Ergebnisses der aktuellen mit

## 4 Detaillierung des Vorgehens

der vorherigen Iterationsschleife geprüft wird, sind zum einen für den Antriebsstrang das maximale Drehmoment und die maximale Leistung der elektrischen Maschine sowie die Batteriekapazität und zum anderen für das Gesamtfahrzeug die Dimensionen Fahrzeughöhe, Radstand, vorderer und hinterer Überhang und Fahrzeugbreite sowie die Leermasse des Fahrzeugs [24, S. 34-35, 260].

Als finale Berechnung des Prozessschrittes der Erstellung des FK aus den Auslegungsparametern erfolgt KÖNIGS [24, S. 57-59] Kostenmodellierung, die auf den Parametern aus [48, 237] beruht, zur Bestimmung der Beschaffungskosten des FK. Das Kostenmodell basiert dabei ähnlich wie das Massemodell auf Konstantwerten für standardisierte Komponenten, wie den Airbags, und auf Komponenten deren Kosten von den geforderten Anforderungen abhängen, wie es beispielsweise bei der Batterie und deren Kapazität der Fall ist [24, S. 58].

Als Ergebnis liefert diese Implementierung zum einen ein dreidimensionales Package des FK mithilfe von KÖNIG [24, S. 34-60, 260] und zum anderen eine Anforderungsliste mit allen relevanten Softwareinflüssen. Diese Anforderungsliste beinhaltet zusätzlich Gesamtfahrzeugdaten, wie die Anschaffungskosten und die Gesamtfahrzeugmasse.

### 4.4.3 Ergebnisse

Das beschriebene Vorgehen erstellt aus den Ergebnissen des vorherigen Prozessschrittes (Kapitel 4.3.3), den Auslegungsparametern, das vollständige FK für autonome, geteilte und elektrische Mobilität. Weiterhin dient FK 2 als Anschauungsbeispiel für die Erstellung der FK mit Package und Anforderungsliste.

Das Package (Abbildung 4.29) ist geprägt durch die vis-à-vis-Innenraumtopologie und die geringen Sitzlehnenwinkel. Die Ausprägungen der Innenraumtopologie und des Sitzlehnenwinkels sind in Kapitel 4.3.2 hergeleitet.

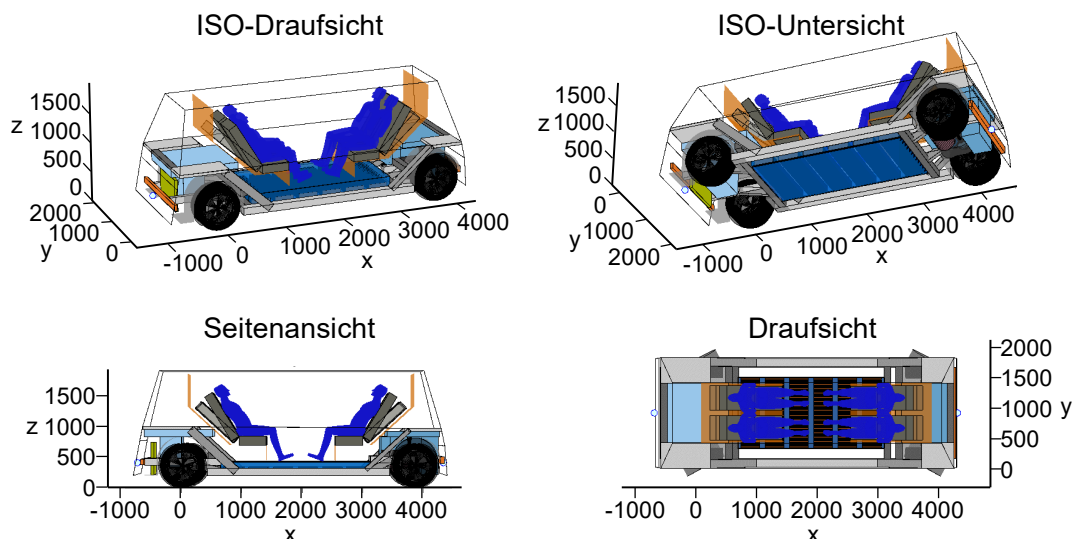


Abbildung 4.29: Darstellung des Packages von FK 2 (erstellt mit [272], übernommen von [260])



Das Farbschema der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 4.29 von Innen nach Außen folgendermaßen definiert: Die dunkelblauen Silhouetten der Passagiere befinden sich auf den grauen Sitzen, deren maximale Lehnenlage dargestellt und deren minimale Lehnenlage transparent sichtbar ist. An diesen minimalen Lagen der Sitzlehnen orientieren sich in transparentem Orange die Grenzflächen des Innenraums.

Im Vorder- und Hinterwagen ist in Orange der Querträger des Crashsystems sichtbar. Hinter diesem ist im Vorderwagen in Gelb der Lüfter verortet. Je nach Antriebstopologie sind elektrische Maschine(n) (braun) und Getriebe (dunkelgrau) im Vorder- und/oder Hinterwagen positioniert. In Abbildung 4.29 in der ISO-Untersicht sind sie im Hinterwagen erkennbar. Die Räder mit ihren Lenkwinkeln sind in der Seitenansicht in Schwarz und in der Draufsicht in Grau dargestellt.

Die Karosserie umschließt die bisherigen Komponenten in Hellgrau. Die Kofferräume (hellblau) integrieren sich in den Vorder- und Hinterwagen. Final findet die Batterie (dunkelblau) im Unterboden und, wenn benötigt, unter den Sitzen Platz.

Das FK 2 hat eine Leermasse von 2523 kg. Seine Höhe beträgt 1966 mm und seine Breite 1857 mm. Seine Länge misst 5228 mm, wobei der Radstand 3887 mm lang ist. Die Gepäckräume sind gleichmäßig auf Vorder- und Hinterwagen verteilt.

Der Antriebsstrang besteht aus einer Batterie, die ausschließlich im Unterboden verortet ist, weil der Platz für die benötigte Kapazität (brutto 84,2 kWh und netto 77,5 kWh) begnügt, sowie einer elektrischen Maschine und einem Getriebe an der Hinterachse. Mit der verbauten Batterie kann das FK mit einem Verbrauch von 19,87 kWh/100km 390 km zurücklegen. Die elektrische Maschine liefert ein maximales Drehmoment von 351 Nm und eine maximale Leistung von 236 kW. Das 1-Ganggetriebe hat eine Übersetzung von 10.

Die Innenraummaße sind in den Auslegungsparametern vorgegeben und im FK umgesetzt. Exemplarisch herausgegriffen beträgt der Freiraum zwischen Kopf eines 95-Perzentil Mannes und dem Dachhimmel 237 mm sowie die zusätzliche Beinfreiheit zum kollisionsfreien Bewegen der Beine 375 mm.

Neben diesen klassischen Kennwerten sind für autonome FK weitere Anforderungen wichtig, die in der Anforderungsliste (Tabelle 4.6) gesammelt werden. Diese Anforderungsliste enthält die Software, die das FK beeinflusst, Hardware, die durch Software beeinflusst bzw. die im Package nicht dargestellt ist, und KWE, die aufgrund fehlender technischer Quantifizierung (Kapitel 4.2) nicht weiter betrachtet wurden. Ebenso gibt sie den gewünschten Kundenwert des Exterieur-Designs an, weil dieser im Packageplan über den Raddurchmesser hinaus keine Anwendung findet, für den Nutzer jedoch eine signifikante Rolle spielen kann.

Dieses FK mit dem Package aus Abbildung 4.29 und der Anforderungsliste aus Tabelle 4.6 hat Anschaffungskosten in Höhe von 47.532€.

## 4 Detaillierung des Vorgehens

Tabelle 4.6: Anforderungsliste des FK 2

Anforderung	KenngroÙe	Wert
Komfort des Fahrstils	Max. Ruck	0,54 m/s <sup>3</sup>
	Max. Beschleunigung	0,17 m/s <sup>2</sup>
Subjektive Sicherheit des Fahrstils	homöostatische Risikowahrnehmung	0,89
Zeitpotential des Fahrstils	Schnelligkeit	1,99
Eco-Driving	Einsparung	5%
Qualität der Automation	Krit. Fahrereignisse pro 100.000 km	26
Akustik im Innenraum	Schalldruckpegel bei 100 km/h	66 dB
Bildschirmgröße	Bildschirmfläche pro Sitz	730 cm <sup>2</sup>
Externe Kommunikation	Kundenwert	7,8
Erkennung Innenraum	Kundenwert	7,0
Infotainment Individualisierung	Kundenwert	7,3
Exterieur-Design	Kundenwert	7,1

Das FK bildet das Ergebnis der Konzeptauslegung für ein Derivat, das vor allem für Entspannen und weniger priorisiert für Schlafen ausgelegt ist. Es handelt sich dabei um ein Taxi. Die Investitionsbereitschaft der Nutzer für Mobilität durch dieses Taxi ist mittelgroß und das Sicherheitsbedürfnis eher groß. Diese Aspekte spiegeln sich an verschiedenen Punkten des FK wider. Die Sekundärtätigkeiten prägen den Innenraum. Zum Entspannen sind genügend große Bildschirme vorhanden und die Akustik im Innenraum ist geräuscharm, was durch aktive Geräuschunterdrückung unterstützt werden muss. Die Anschaffungskosten, die zwangsläufig auf die Fahrtkosten des Taxis im Betrieb umgelegt werden, treffen die Investitionsbereitschaft der Nutzer. Der sichere Fahrstil und die freien Crashlängen, die im Package (Abbildung 4.29) zu sehen sind, ergeben eine hohe Sicherheit. Das Exterieur-Design, das im Verhältnis zu anderen Fahrzeugen eine mittlere Güte besitzen soll, ist für ein Taxi mit mittlerer Investitionsbereitschaft plausibel.

Das FK 2 erfüllt auf diese Weise einen Beitrag zur Befriedigung der Bedürfnisse des Nutzerszenarios Familie mit einem Nutzererfüllungsgrad von 80 % (Abbildung 4.5). Durch die Anwendung des Gesamtvorgehens der vorliegenden Arbeit ist sein Konzept systematisch hergeleitet.

### 4.4.4 Validierung

Die Validierung des beschriebenen Vorgehens und der daraus hervorgehenden Ergebnisse erfolgt unter Bezugnahme auf die Validierungen von NICOLETTI [25, S. 57-70], KÖNIG [24, S. 60-63] und KOCH [23, S. 51-53], weil deren Modellierungen die Grundlage des Prozessschrittes der Generierung des FK aus den Auslegungsparametern bilden.

Die LDS ist in ihren Bestandteilen Verbrauchs- und Beschleunigungssimulation validiert. Realfahrten mit den drei Versuchsfahrzeugen VW e-Golf (Modelljahr 2014) [237], VW ID.3 Pro Performance 1st (Modelljahr 2020) [25, S. 57-59] und Tesla Model 3 Standard Range Plus

(Modelljahr 2020) [24, S. 38-39] bestätigen die Validität der LDS. Für die Beschleunigungszeit erfolgten 0km/h auf 100km/h Beschleunigungsvorgänge und für den Verbrauch wurde der WLTP [221] auf einem Rollenprüfstand abgefahren. Für eine Darstellung der exakten Validierungsergebnisse sei auf die zitierten Arbeiten verwiesen.

KOCH prüft seinen Eco-Driving-Algorithmus, auf dessen Basis die Annahmen für die Softwareauswirkungen auf den Traktionsverbrauch eines AV erfolgen, mit einer Validierung seiner Fahrprofilerstellung an Realfahrdaten [23, S. 51-53, 219, 258]. Den Beweis der Optimalität seiner energieeffizienten Fahrweise erbringt er durch den Vergleich mit einer dynamischen Programmierung des Problems [256].

NICOLETTI validiert seine volumetrische [25, S. 59-64] und gravimetrische [25, S. 64-66] Modellierung mithilfe eines Vergleiches der berechneten Werte mit den realen Werten von 18 BEV der Modelljahre 2018-2021. Die Daten der realen Fahrzeuge für die Parametrierung der Modellierung entnimmt er der ADAC Datenbank [209] und der Benchmarkingplattform A2mac1 [210]. Die Differenz der berechneten Werte zu den Realwerten liefert die Genauigkeit seiner Modellierungen. Abbildung 4.30 zeigt exemplarisch die Validierung für die Leermasse des Fahrzeugs. Diese ergibt eine durchschnittliche Genauigkeit von 2,9 %.

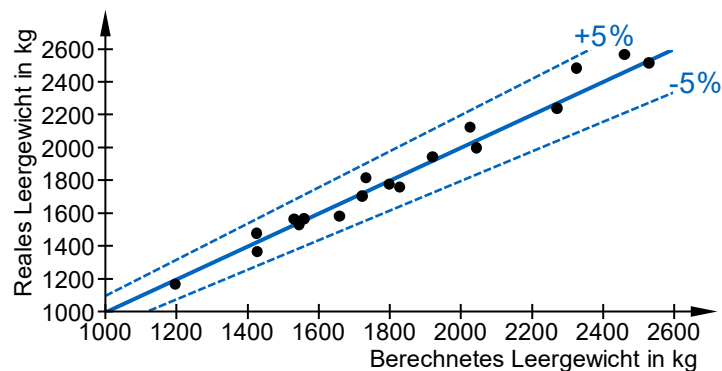


Abbildung 4.30: Validierung am Beispiel der Leermasse des Fahrzeugs nach [25, S. 66]

Das Packagemodell validiert KÖNIG [24, S. 60-63] über eine Koppelung von bestehenden BEV und autonomen Konzeptfahrzeugen. Er nutzt den Audi e-tron 55 advanced quattro (Modelljahr 2019), den Jaguar I-Pace EV400 First Edition AWD (Modelljahr 2018), Tesla Model 3 Standard Range Plus (Modelljahr 2020) und den VW ID.3 Pro Performance 1st (Modelljahr 2020) (Abbildung 4.31(a)) für die Validierung der BEV.

Das Package der vier BEV validiert KÖNIG über einen grafischen Vergleich der Realfahrzeuge und der simulierten FK. Deren Gesamtfahrzeugdaten sind durch seine Gesamtmodellierung hinreichend genau (-4,7% bis +5,8% Abweichung) getroffen [24, S. 61]. Die einzigen Werte, die eine größere Abweichung aufzeigen, sind das Moment und die Leistung der elektrischen Maschinen, was KÖNIG auf die verwendete Skalierung des Motorkennfeldes zurückführt [24, S. 61].

Als autonomes Konzeptfahrzeug verwendet KÖNIG [24, S. 62-63] Zoox, weil für dieses die meisten Daten zur Verfügung stehen. Die Simulation kann nur eine Plausibilisierung des Modells für AV sein, weil in deren Parametrierung aufgrund von fehlenden Daten zahlreiche Annahmen gemacht werden. Diese Plausibilität sieht KÖNIG [24, S. 63] als erfüllt, was er grafisch zeigt (Abbildung 4.31(b)).

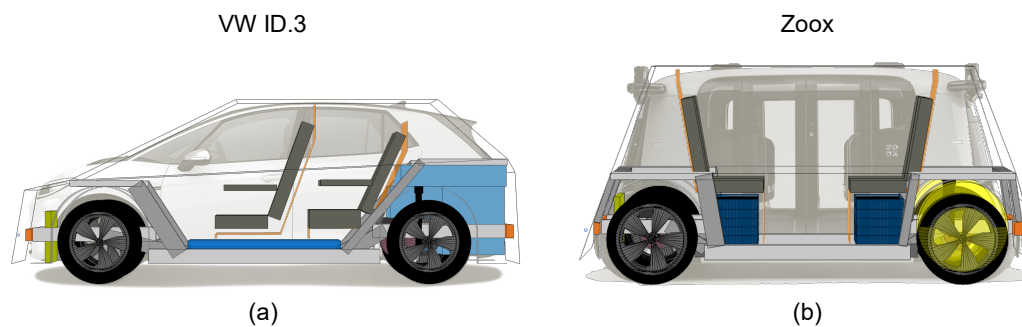


Abbildung 4.31: Validierung des Packages nach KÖNIG: (a) VW ID.3 [24, S. 61] und (b) Zoox [24, S. 63]

Das Kostenmodell erfährt eine Plausibilisierung durch KÖNIG [24, S. 59], indem er seine simulierten Anschaffungskosten mit Literaturwerten zum VW ID.3 Pure Performance City im Jahr 2020 und im Jahr 2030 vergleicht. Aufgrund einer großen Unsicherheit bei Kostenmodellierungen, die sich aus fehlenden veröffentlichten Daten, dem Einfluss der Unternehmenspolitik auf Kosten, einer Subventionierung neuer Technologien durch Unternehmen und einem hohen Gewinnanteil durch Sonderausstattung ergeben [48, S. 91], bewertet KÖNIG [24, S. 59] seine Kostenmodellierung als ausreichend genau.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass die Hauptbestandteile der Umwandlung der Auslegungparameter in das FK durch KÖNIG, NICOLETTI und KOCH validiert sind. Ausschließlich das nachgelagerte Kostenmodell, das für die Erstellung der FK ohne Einfluss ist und lediglich eine zusätzliche Information zum erstellten FK generiert, erfährt keine Validierung, sondern nur eine Plausibilisierung.

### 4.4.5 Diskussion und Ausblick

Die Generierung des FK aus Auslegungsparametern als letzter Prozessschritt soll nachfolgend aus zwei Perspektiven diskutiert werden. Zum einen soll die durchgeführte Implementierung und zum anderen die Tiefe der Integration der Software kritisch hinterfragt werden.

Empirische Regressionen sind für die volumetrische und gravimetrische Modellierung ein gebräuchliches Vorgehen [47, 48, 77, 87, 89, 273]. Die Modellierungen von NICOLETTI [25, S. xxxix-iii] bieten den größten Detaillierungsgrad und stützen sich auf die aktuellste Datenbasis. Deren Verwendung ist demnach gerechtfertigt und macht zukünftig lediglich eine kontinuierliche Aktualisierung der Komponentendatenbank, die den Regressionen zugrunde liegt, notwendig.

Das grenzkurvenbasierte Vorgehen beim Packaging löst die Aufgabe, die Freiheitsgrade des Packages eines AV abzubilden und den Ferspunkt des Fahrers als Startpunkt zu ersetzen. Diese grundlegende Herausforderung erfüllt KÖNIGS [24, S. 40-53] Vorgehen. Zur detaillierteren Modellierung des Packages eines AV ist es notwendig, zu einem maßkettenbasierten Packagingverfahren zurückzukehren. Hierfür existiert jedoch kein Vorgehen, das die genannten Herausforderungen aufgreift. Zukünftige Forschung sollte demnach Maßketten für autonome FK definieren, um diese mittelfristig der Industrie vergleichsweise standardisiert wie in der SAE J1100 [217] zur Verfügung zu stellen.

Die vorliegende Arbeit wirft die Notwendigkeit der Betrachtung der Softwareinflüsse auf das FK auf. Diese Feststellung ist eine grundlegende Neuerung in der Fahrzeugkonzeptentwicklung, die sich konventionell mit der Auslegung und Positionierung der Hardwarekomponenten beschäftigt.

Die Methodik zur Generierung des FK aus den Auslegungsparametern greift dies auf und ermöglicht durch die Manipulation der Komponentenkenwerte eine Integration der Softwareeinflüsse. Die Haupteinflüsse der Software können auf diese Weise adressiert werden. Es ist aber eine tiefere Integration von Software in diesen Prozessschritt notwendig, weil ihre Einflüsse sich nicht nur auf die Komponentenkenwerte, die Ein- und Ausgangsgrößen der Simulationsbausteine darstellen, sondern auch auf die Simulationsbausteine selbst beziehen können. Ein Beispiel wäre die Auslegung des Sensorikkonzeptes, die in der vorliegenden Arbeit vernachlässigt wird.

Eine Vorveröffentlichung [245] und zwei Vorarbeiten [201, 247] beschäftigen sich detailliert mit der Auswirkung verschiedener Fahrstile auf das FK. Der Fahrstil, dessen Parameter bei einem AV das Fahrzeug selbst und nicht der Fahrer vorgibt, ist für den Nutzer eine bedeutende Eigenschaft [62]. Weil die Fahrzeugkonzeptentwicklung sich vornehmlich auf die Längsdynamik in der Auslegung konzentriert, findet sich der Fahrstil im Fahrzyklus, der in der LDS abgefahren wird, wieder. Die Fahrzyklen dienen einer standardisierten Messung des Fahrverbrauches ohne einen Einfluss des Fahrstils des Fahrers. Verwendete Fahrzyklen sind beispielsweise der WLTP [221] und der Neue Europäische Fahrzyklus [274]. Wenn der Fahrstil Teil des FK ist, muss dieser Bestandteil dessen Entwicklung sein und darf nicht durch standardisierte Fahrzyklen eliminiert werden. Die Vorveröffentlichung [245] mit dem zugehörigen Algorithmus [259] präsentiert eine Methodik, um auf Basis einer adaptive Geschwindigkeitsregelung Fahrzyklen für AV auf Grundlage deren jeweiligen Fahrstils zu ermitteln. Der Fahrstil ist dabei über die KWE zu Fahrkomfort, Schnelligkeit, subjektive Sicherheit und Verbrauch beschrieben (Anhang D).

Eine Substitution der konventionell verwendeten standardisierten Fahrzyklen durch einen dem Fahrstil des AV entsprechenden Fahrzyklus scheint für die Entwicklung autonomer, geteilter und elektrischer FK notwendig. Dies kann durch einen vorab festgelegten Katalog an Fahrzyklen, der die verschiedenen Kombinationen der Fahrstilparameter beinhaltet, oder durch eine Integration einer Fahrprofilsimulation in die LDS geschehen. Im Kontext dieser Arbeit ist die Integration nicht umgesetzt. Die Bestandteile sind aber durch die LDS von KÖNIG ET AL. [249, 261] und durch die Vorveröffentlichung zu Fahrzyklen von AV [245] mit dem entsprechenden Algorithmus [259] gegeben.

Im Allgemeinen gilt es, die Einflüsse der Software auf das FK strukturiert und detailliert zu untersuchen. Diese Arbeit zeigt die Notwendigkeit der Betrachtung und die initialen Auswirkungen auf die Antriebsstrangauslegung in Form des Eco-Drivings und der fahrstilbeeinflussten Fahrzyklen auf. Insbesondere in der Automatisierung der Fahrfunktion und den damit verknüpften Fahrzeugkomponenten, wie der Sensorik, scheinen diese Analyse und eine weitere Integration in die Fahrzeugkonzeptentwicklung notwendig.



# 5 Anwendung

Nach der Herleitung des Gesamtverfahrens in Kapitel 3 und dessen Detaillierung in Kapitel 4 soll in diesem Kapitel eine Anwendung anhand eines vollständigen Nutzerszenarios aufgezeigt werden. Für die Anwendung werden die beiden Prozessbausteine „Fahrzeuggebundenes Mobilitätsangebot“ und „Fahrzeugkonzept“ gezeigt.

Der Startpunkt wird bewusst nicht bei den nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnissen verortet, weil durch die Optimierung und die Zuordnung der Nutzerbedürfnisse zu den Derivaten im ersten Prozessschritt eine Nachvollziehbarkeit durch den Leser erschwert wäre. Ab dem Prozessschritt „Fahrzeuggebundenes Mobilitätsangebot“ ist das Gesamtverfahren insofern linear und nachvollziehbarer, dass die Derivate bzw. die FK einzeln betrachtet werden können und die Ergebnisse nicht mehr interferieren. In den Abbildungen 5.1-5.4 werden jedem Nutzer seine Derivate zugeordnet, um sowohl die Derivate für die Herleitung der FK als auch deren Nutzer mit ihren Bedürfnissen, aus denen sie hervorgehen, vorliegen zu haben.

Die Anwendung erfolgt mithilfe des VASEM-Tools [272]. VASEM steht als Akronym für Vehicle concept development for Autonomous, Shared, and Electric Mobility. Das Tool stellt die Implementierung des detaillierten Vorgehens in Kapitel 4 dar und ermöglicht die Simulation autonomer, geteilter und elektrischer FK in einer zusammenhängenden Toolkette. In seiner Gesamtheit ist das VASEM-Tool eine Unterstützung für einen Fahrzeugkonzeptingenieur in der Auslegung zukünftiger FK. Die Vorarbeiten [112, 233, 275] haben bei der Entwicklung von VASEM mitgewirkt. KÖNIGS AuVeCoDe-Tool [260], dessen Akronym Autonomous Vehicle Concept Development bedeutet und das als Ziel die Auslegung der Hardwarekomponenten von AV und deren Package hat, ist, wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben, in VASEM integriert.

Für die bessere Verständlichkeit der einzelnen Prozessbausteine soll nachfolgend das Nutzerszenario der Familie (Abbildung 4.1) mit einem Nutzererfüllungsgrad von 80 % dienen. Das Anschauungsbeispiel aus Kapitel 4, FK 2, geht aus dieser Koppelung hervor und bildet für den Leser einen Wiedererkennungswert.

Die sechs Derivate, die sich durch die Minimierung der Anzahl der benötigten Derivate ergeben, sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Ihre Aufteilung auf die vier Nutzer (Vater, Mutter, Jugendlicher und Kind) und der entsprechende Fahrzeugtyp (Privat, Carsharing-Taxi oder Ridesharing-Shuttle (Abbildung 2.3)) ist den Abbildungen 5.1-5.4 zu entnehmen. Diese sechs Derivate ermöglichen es, gemeinsam genutzte FK auszulegen, anstatt jedem der 20 Einzelbedürfnisse der Nutzer in Bezug auf die Sekundärtätigkeiten ein separates FK zu konzipieren.

Der Vater (Abbildung 5.1) nutzt Derivat 1 und Derivat 6. Derivat 1 stellt ein Privatfahrzeug mit fünf Sitzplätzen dar, das hauptsächlich für die Sekundärtätigkeit „Arbeiten“ konzipiert ist, aber auch die Sekundärtätigkeiten „Entspannen“ und „Selbstfahren“ in niedrigerer Priorisierung zulässt. Derivat 6 ist ein Shuttle, das auf den Transport von Gütern ausgelegt ist. Beide Derivate bedienen ein hohes generelles Mobilitätsbedürfnis und haben mittlere bis hohe Investitionsbereitschaften und ein mittleres Sicherheitsbedürfnis der Nutzer.

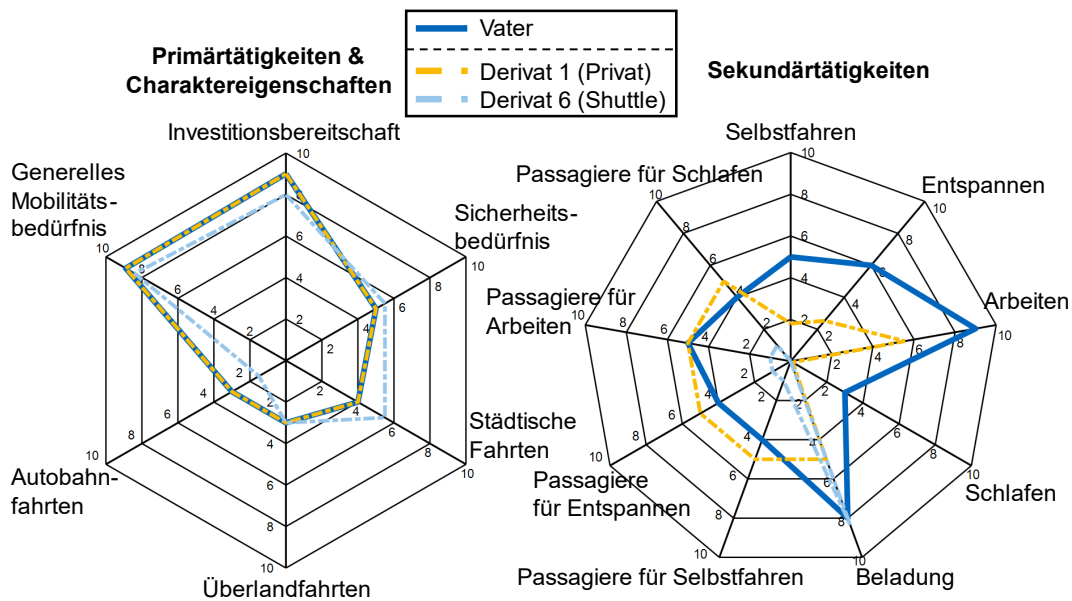


Abbildung 5.1: Nutzer Vater und die ihm zugeordneten Derivate

Die Mutter der Familie (Abbildung 5.2) nutzt für ihre Mobilität drei Derivate. Derivat 2 ist das Taxi, das in Kapitel 4 als Anschauungsbeispiel gedient hat. Es ist in den Sekundärtätigkeiten vor allem für Entspannen und untergeordnet für Schlafen ausgelegt und hat vier Sitzplätze. Die Investitionsbereitschaft ist mittel und das Sicherheitsbedürfnis eher hoch.

Derivat 4 ist ebenfalls ein Taxi mit vier Sitzplätzen, das für die Sekundärtätigkeiten „Arbeiten“ und „Selbstfahren“ ausgerichtet ist. Als Charaktereigenschaften der Nutzer sind ein mittleres Sicherheitsbedürfnis und eine mittlere Investitionsbereitschaft ausgeprägt. Derivat 6 ist das gleiche Shuttle wie beim Vater.

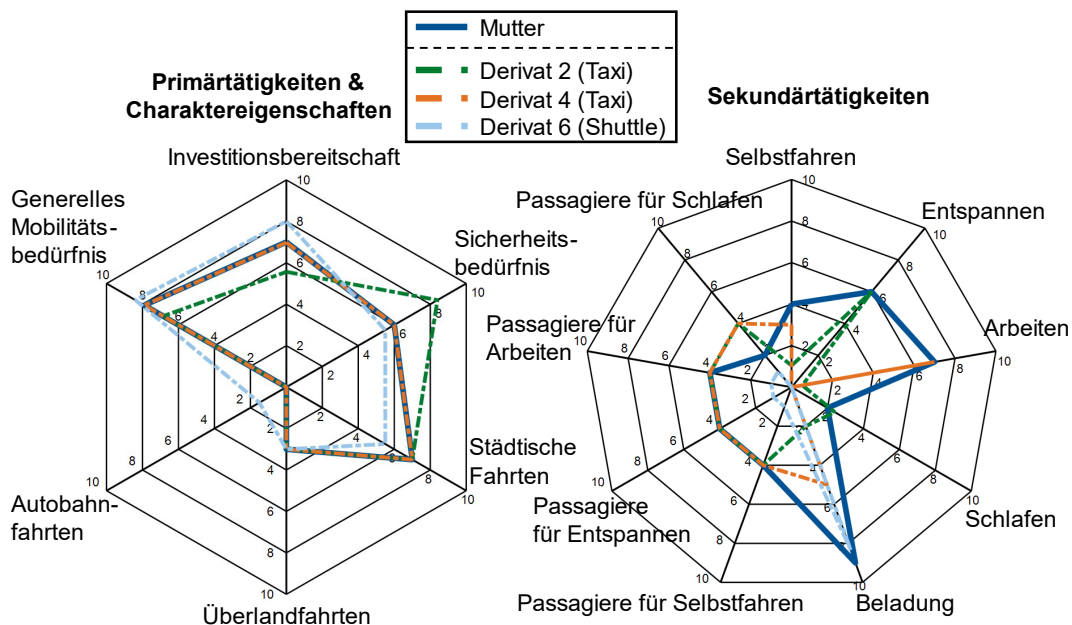


Abbildung 5.2: Nutzer Mutter und die ihr zugeordneten Derivate



Die Mobilitätsbedürfnisse des Jugendlichen (Abbildung 5.3) werden durch die beiden Derivate 2 und 5 befriedigt. Derivat 2 nutzt ebenfalls die Mutter. Derivat 5 ist ein Taxi mit fünf Sitzplätzen, das vor allem die Sekundärtätigkeit „Entspannen“ bereitstellt und für eher geringere Investitionsbereitschaft mit einem hohem Sicherheitsbedürfnis ausgelegt ist.

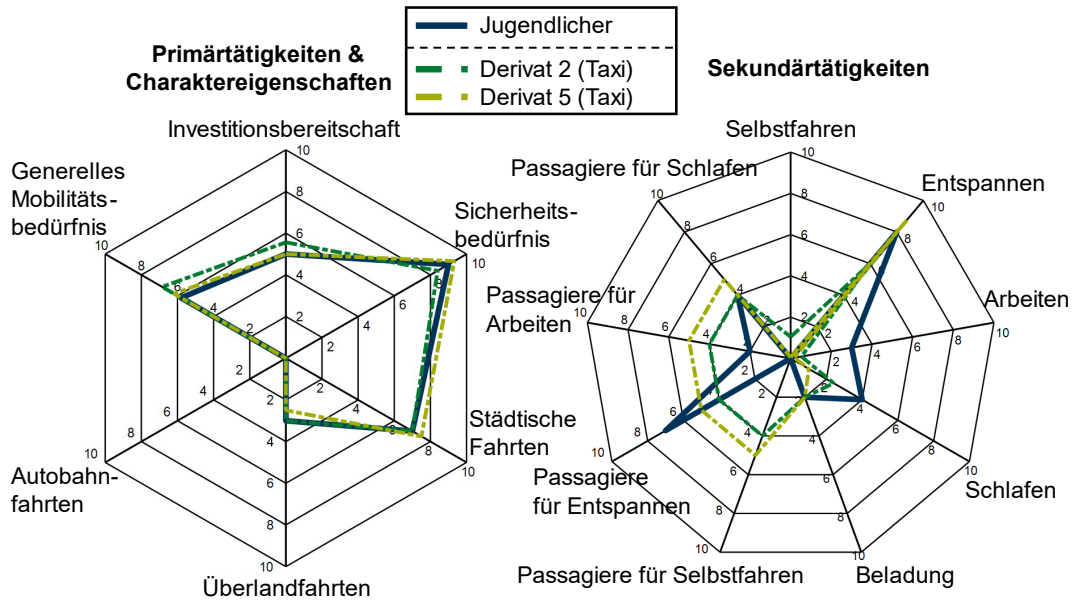


Abbildung 5.3: Nutzer Jugendlicher und die ihm zugeordneten Derivate

Der letzte Nutzer des Nutzerszenarios „Familie“ ist das Kind (Abbildung 5.4). Es nutzt neben Derivat 5, das auch der Jugendliche zur Erfüllung seiner Mobilitätsbedürfnisse benötigt, Derivat 3. Dies ist ein Taxi für vier Personen, das vorzugsweise für die Sekundärtätigkeit „Schlafen“ dient. Das Sicherheitsbedürfnis ist hoch und die Investitionsbereitschaft mittel.

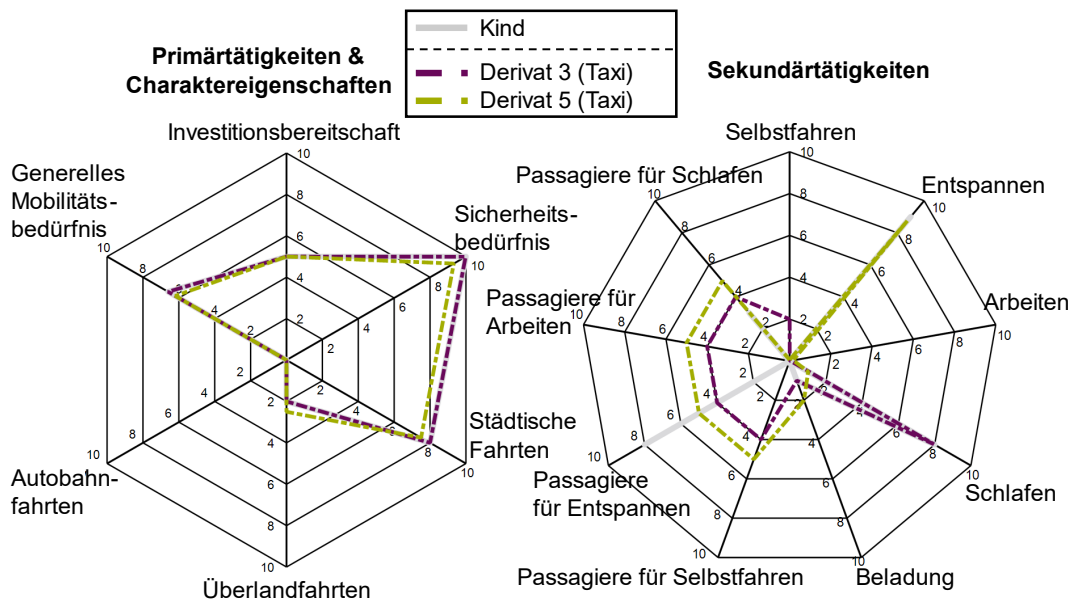


Abbildung 5.4: Nutzer Kind und die ihm zugeordneten Derivate

## 5 Anwendung

Die Familie benötigt für einen Nutzererfüllungsgrad von 80 % lediglich ein Privatfahrzeug und kann die weiteren fünf Fahrzeuge mit anderen Mobilitätsnutzern mit den gleichen Bedürfnissen teilen. Im Vergleich zu heutigen Fahrzeugen entstehen somit spezialisierte bedürfnisgerechte Fahrzeuge, die größtenteils durch ihre geteilte Nutzung weniger Standzeiten haben.

Die nachfolgende Fuzzylogik zur Umwandlung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes der Derivate in KWE der FK ist für Shuttle nicht valide (Kapitel 4.1.4). Die Gründe hierfür wurden ausführlich in Kapitel 4.1.5 diskutiert. Derivat 6 findet demnach in dieser Anwendung keine Betrachtung, weil dieser Prozessschritt für Shuttlefahrzeuge mit dem Stand der vorliegenden Arbeit nicht vollzogen werden kann.

Die anderen fünf Derivate werden mithilfe der Fahrzeugkonzeptentwicklung, welche die vorliegende Arbeit beschreibt (Kapitel 4), zu FK entwickelt. Über die Prozessbausteine „KWE“, „TE“ und „Auslegungsparameter“ werden die FK mit ihrem Packageplan und der dazugehörigen Anforderungsliste hergeleitet. Für die jeweiligen Packagepläne gilt dabei das gleiche Farbschema wie in Abbildung 4.29. FK 2 ist als Anschauungsbeispiel bereits in Kapitel 4.4.3 mit Abbildung 4.29 und Tabelle 4.6 dargestellt. Dementsprechend werden nachfolgend die FK 1, 3, 4 und 5 vorgestellt.

FK 1 ist ein Privatfahrzeug mit fünf Sitzplätzen, das vordergründig zum Arbeiten und als weitere Sekundärtätigkeit zum Entspannen und Selbstfahren ausgelegt ist. Sein Package ist in Abbildung 5.5 veranschaulicht. FK 1 besitzt eine konventionelle Innenraumanordnung mit eher aufrechten Sitzlehnenwinkeln, um die Sekundärtätigkeiten „Arbeiten“ und „Selbstfahren“ zu ermöglichen.

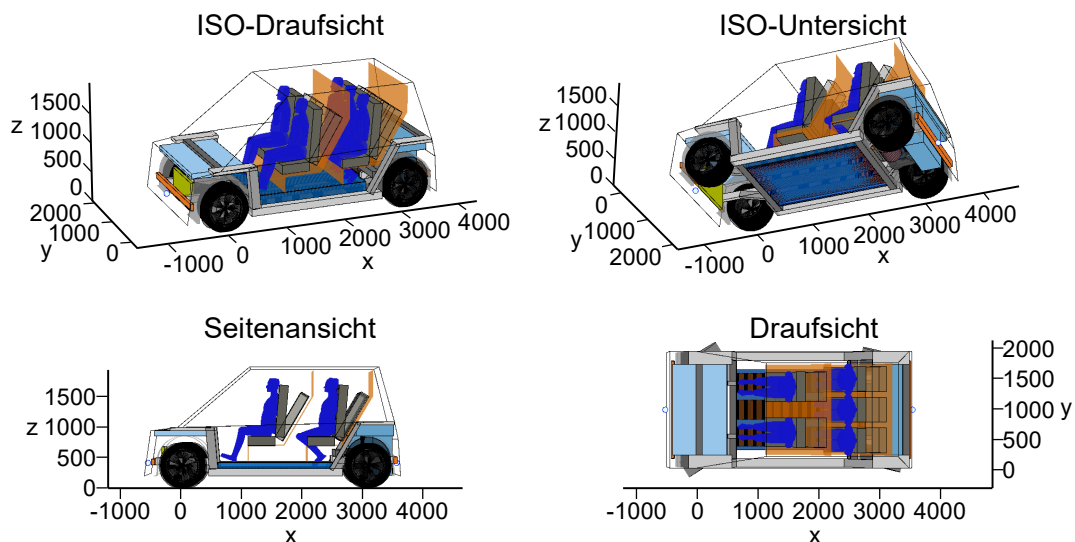


Abbildung 5.5: Darstellung des Package von FK 1 (erstellt mit VASEM [272], übernommen von AuVe-CoDe [260])

FK 1 hat eine Gesamtlänge von 4268 mm mit einem Radstand von 3094 mm. Seine Breite beträgt 1970 mm und seine Höhe 2012 mm. Seine Leermasse ist mit 2182 kg veranschlagt. Durch die nötigen Sichtwinkel zum Selbstfahren befindet sich der Großteil des Gepäckraumes im Hinterwagen.

Die Anforderungsliste des FK 1 ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Die Werte des Fahrstils liegen für dessen Komfort im mittleren bis hohen, für die subjektive Sicherheit im mittleren und für das Zeitpotential ebenso im mittleren Bereich. Für die Priorisierung der Sekundärtätigkeiten in der

Reihenfolge „Arbeiten“, „Entspannen“ und „Selbstfahren“ mit den Charaktereigenschaften eines eher geringen Sicherheitsbedürfnisses und einer hohen Investitionsbereitschaft scheint dieser Fahrstil zielführend. Die Akustik im Innenraum soll mit aktiver Geräuscherdrückung gut sein und die Bildschirmgrößen eher kleiner. Der hohe Wert des Exterieur-Designs ergibt sich aus dem Fahrzeugtyp „Privat“ und bedarf in der späteren Serienentwicklung des FK 1 entsprechender Designelemente zur Erreichung seines Wertes.

Tabelle 5.1: Anforderungsliste des FK 1

Anforderung	Kenngroße	Wert
Komfort des Fahrstils	Max. Ruck	0,66 m/s <sup>3</sup>
	Max. Beschleunigung	0,15 m/s <sup>2</sup>
Subjektive Sicherheit des Fahrstils	homöostatische Risikowahrnehmung	0,87
Zeitpotential des Fahrstils	Schnelligkeit	1,93
Eco-Driving	Einsparung	5%
Qualität der Automation	Krit. Fahrereignisse pro 100.000 km	28
Akustik im Innenraum	Schalldruckpegel bei 100 km/h	66 dB
Bildschirmgröße	Bildschirmfläche pro Sitz	490 cm <sup>2</sup>
Externe Kommunikation	Kundenwert	6,8
Erkennung Innenraum	Kundenwert	7,0
Infotainment Individualisierung	Kundenwert	6,7
Exterieur-Design	Kundenwert	9,1

Das nächste Fahrzeug ist FK 3. Es ist ein Taxi mit insgesamt vier Sitzplätzen und für die Sekundärtätigkeit „Schlafen“ ausgelegt (Abbildung 5.4). Dies spiegelt sich in seinem Package (Abbildung 5.6) wider. Die Innenraumtopologie ist eine klassische Anordnung und die Sitzlehnenwinkel sind in ihren minimalen und maximalen Ausprägungen flach. Dadurch ergeben sich folgende Gesamtfahrzeugmaße: Die Fahrzeuglänge beträgt 5846 mm mit einem Radstand von 4506 mm. Die Fahrzeugbreite ist 1882 mm und die Höhe 1780 mm. Die Leermasse des FK 3 wird mit 2488 kg veranschlagt. Durch den großen Radstand ist der Bauraum der Batterie im Unterboden ausreichend für die benötigte Kapazität.

Die Anforderungsliste des FK 3 (Tabelle 5.2) zeigt Werte eines komfortablen Fahrstils, der sicher ist, aber ein geringes Zeitpotential aufzeigt. Der Innenraum ist mithilfe von aktiver Geräuscherdrückung ruhig und die Bildschirmgröße pro Sitzplatz ist im mittleren Bereich. Die Kundenwerte zur externen Kommunikation, zur Erkennung des Innenraumes und zur Infotainment Individualisierung sind einem Taxi entsprechend im mittleren, neutralen Spektrum. Das Exterieur-Design fällt unter die erwartbaren Werte eines Taxis, was auf die geringe Investitionsbereitschaft für FK 3 zurückführbar zu sein scheint.

## 5 Anwendung

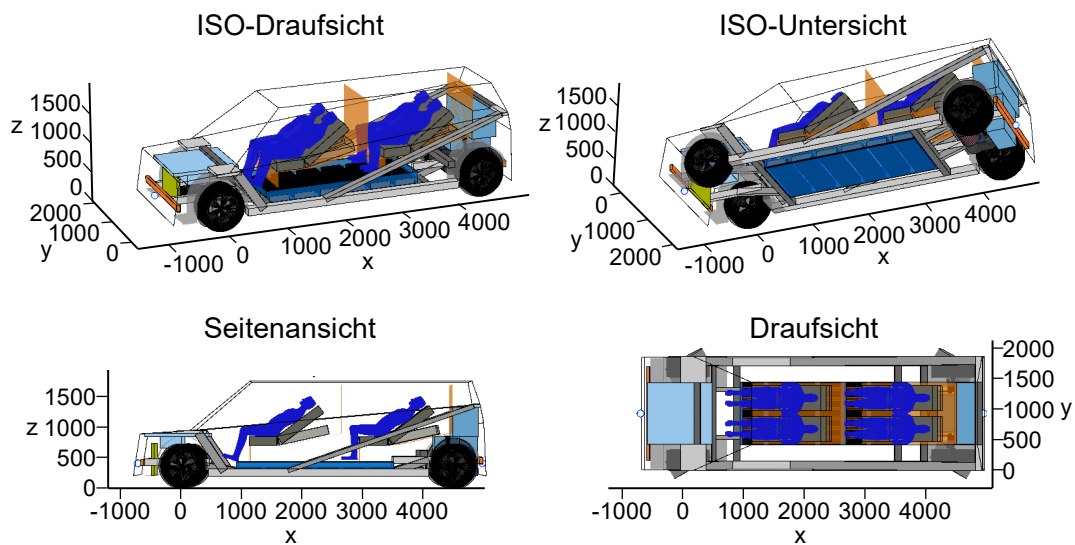


Abbildung 5.6: Darstellung des Package von FK 3 (erstellt mit VASEM [272], übernommen von AuVe-CoDe [260])

Tabelle 5.2: Anforderungsliste des FK 3

Anforderung	KenngroÙe	Wert
Komfort des Fahrstils	Max. Ruck	0,38 m/s <sup>3</sup>
	Max. Beschleunigung	0,08 m/s <sup>2</sup>
Subjektive Sicherheit des Fahrstils	homöostatische Risikowahrnehmung	1,07
Zeitpotential des Fahrstils	Schnelligkeit	2,04
Eco-Driving	Einsparung	5%
Qualität der Automation	Krit. Fahrereignisse pro 100.000 km	32
Akustik im Innenraum	Schalldruckpegel bei 100 km/h	65 dB
BildschirmgröÙe	BildschirmfläÙe pro Sitz	700 cm <sup>2</sup>
Externe Kommunikation	Kundenwert	7,7
Erkennung Innenraum	Kundenwert	7,0
Infotainment Individualisierung	Kundenwert	7,4
Exterieur-Design	Kundenwert	6,7

FK 4 bildet das nächste Fahrzeug der benötigten Flotte für die Familie mit einem Nutzererfüllungsgrad von 80 %. Der Fahrzeugtyp des FK 4 ist ein Taxi. Es bietet Platz für vier Passagiere. Primär soll es das Arbeiten während der Fahrt unterstützen. Nachgelagert soll das menschliche Selbstfahren in diesem FK ebenso möglich sein. Aufgrund von zweiterem ist die Anordnung des Innenraums klassisch mit Blick nach vorne. Beide Sekundärtätigkeiten bewirken eher aufrechte bis sehr aufrechte Sitzlehnenwinkel, was für das Package (Abbildung 5.7) prägend ist. Die nötigen Sichtfelder zum Selbstfahren verschieben einen Großteil des Kofferraums in den Hinterwagen.

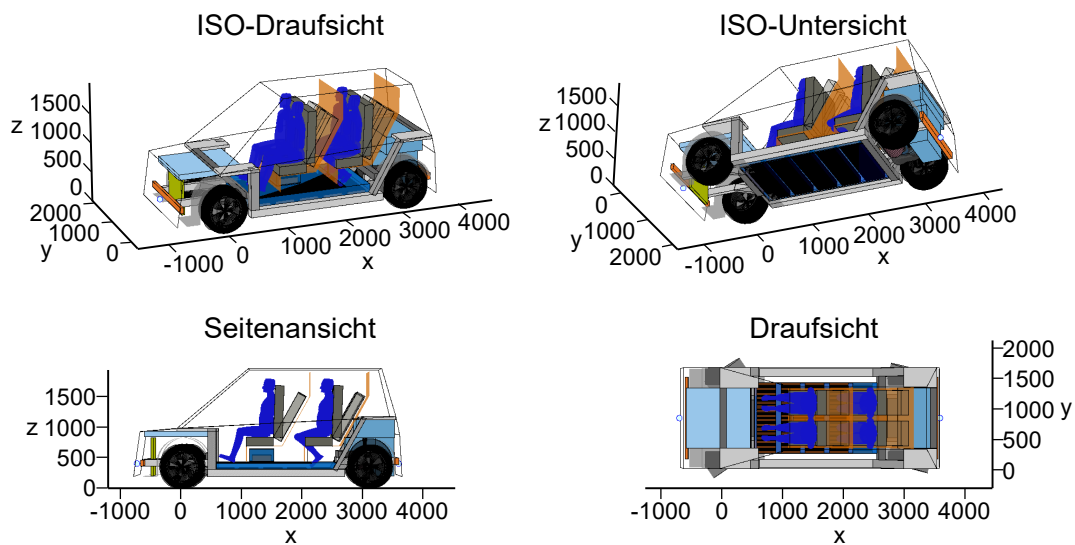


Abbildung 5.7: Darstellung des Package von FK 4 (erstellt mit VASEM [272], übernommen von AuVe-CoDe [260])

Die Maße von FK 4 betragen für die Länge 4481 mm mit einem Radstand von 3144 mm, für die Breite 1708 mm und für die Höhe 2002 mm. Dies ergibt eine simulierte Leermasse von 2107 kg. Die geringere Breite und der geringere Radstand im Vergleich zu FK 3 bewirken bei einer ähnlichen Reichweitenanforderung im WLTP (etwas unter 400 km) eine Änderung der Batterieform. Neben dem Unterboden wird der Packageraum unter den Sitzen der ersten Sitzreihe für die Batterie benötigt, um genügend Kapazität verbauen zu können. Die hinzukommende Anforderungsliste für FK 4 ist in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3: Anforderungsliste des FK 4

Anforderung	Kenngroße	Wert
Komfort des Fahrstils	Max. Ruck	0,41 m/s <sup>3</sup>
	Max. Beschleunigung	0,10 m/s <sup>2</sup>
Subjektive Sicherheit des Fahrstils	homöostatische Risikowahrnehmung	0,87
Zeitpotential des Fahrstils	Schnelligkeit	1,96
Eco-Driving	Einsparung	5%
Qualität der Automation	Krit. Fahrereignisse pro 100.000 km	28
Akustik im Innenraum	Schalldruckpegel bei 100 km/h	66 dB
Bildschirmgröße	Bildschirmfläche pro Sitz	730 cm <sup>2</sup>
Externe Kommunikation	Kundenwert	7,5
Erkennung Innenraum	Kundenwert	7,0
Infotainment Individualisierung	Kundenwert	7,0
Exterieur-Design	Kundenwert	7,4

## 5 Anwendung

Entsprechend der priorisierten Sekundärtätigkeit „Arbeiten“ ist der Komfort des Fahrstils eher hoch. Die subjektive Sicherheit und das Zeitpotential sind im mittleren Bereich, was sich bei ersterem mit dem subjektiven Sicherheitsbedürfnis der Mutter, die dieses FK nutzt, deckt. Die weiteren Werte der Anforderungsliste befinden sich für ein Taxi mit einer leicht erhöhten Investitionsbereitschaft und den genannten Sekundärtätigkeiten ebenfalls in erwartbaren Bereichen.

Das letzte FK, das für die Erfüllung der Mobilitätsbedürfnisse der dargestellten Familie simuliert wird, ist FK 5. Es ist ein Taxi mit fünf Sitzplätzen, dessen Innenraum ausschließlich für die Sekundärtätigkeit „Entspannen“ ausgelegt ist. Dies führt zu einer Innenraumtopologie mit vis-à-vis-Anforderung und mittleren Sitzlehnenwinkeln. Der Kofferraum ist gleichmäßig in Vorder- und Hinterwagen verteilt.

Dies führt zu einer Fahrzeuglänge von 5091 mm, wobei der Radstand 3717 mm beträgt. Die Breite von FK 5 ist mit 2052 mm und die Höhe mit 1994 mm beziffert. Seine Leermasse wird mit 2517 kg kalkuliert. Der durch die vis-à-vis-Innenraumtopologie erhöhte Radstand führt dazu, dass eine reine Unterbodenbatterie ausreichend Kapazität für die gewünschte Reichweite bereitstellen kann.

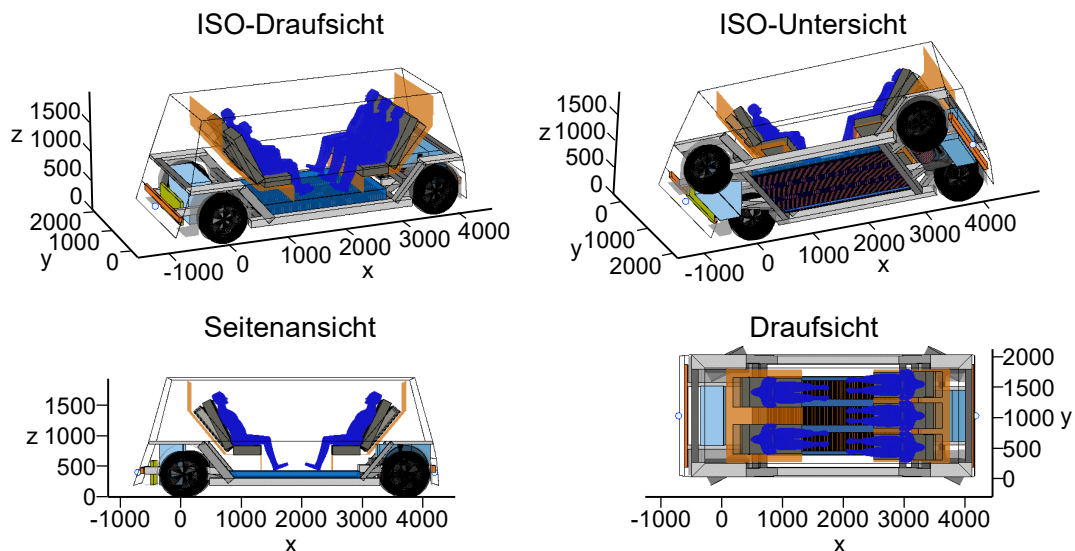


Abbildung 5.8: Darstellung des Package von FK 5 (erstellt mit VASEM [272], übernommen von AuVe-CoDe [260])

Die Anforderungsliste von FK 5 (Tabelle 5.4) zeigt einen Fahrstil mit mittlerem Komfort, eher hoher subjektiver Sicherheit und mittlerem Zeitpotential. Dies ist durch die Sekundärtätigkeit „Entspannen“ mit den Charaktereigenschaften der Nutzer in Form eines hohen subjektiven Sicherheitsbedürfnisses und einer eher niedrigen Investitionsbereitschaft zu begründen. Die Bildschirmgröße pro Sitzplatz und der Lärmpegel entsprechen einer Innenraumumgebung zum Entspannen. Die Kundenwerte der weiteren Anforderungen sind im für ein Taxi erwarteten mittleren Bereich, wobei das Exterieur-Design durch die geringe Investitionsbereitschaft eher schlechter ausfällt.

Tabelle 5.4: Anforderungsliste des FK 5

Anforderung	Kenngroße	Wert
Komfort des Fahrstils	Max. Ruck	0,73 m/s <sup>3</sup>
	Max. Beschleunigung	0,27 m/s <sup>2</sup>
Subjektive Sicherheit des Fahrstils	homöostatische Risikowahrnehmung	0,97
Zeitpotential des Fahrstils	Schnelligkeit	1,98
Eco-Driving	Einsparung	5%
Qualität der Automation	Krit. Fahrereignisse pro 100.000 km	32
Akustik im Innenraum	Schalldruckpegel bei 100 km/h	64 dB
Bildschirmgröße	Bildschirmfläche pro Sitz	730 cm <sup>2</sup>
Externe Kommunikation	Kundenwert	7,4
Erkennung Innenraum	Kundenwert	7,0
Infotainment Individualisierung	Kundenwert	7,4
Exterieur-Design	Kundenwert	6,7

Die Flotte aus diesen FK erfüllt die Bedürfnisse der Nutzergruppe „Familie“ mit einem Erfüllungsgrad von 80 %. Durch die Varianz der einzelnen FK werden alle gewünschten Sekundärtätigkeiten adressiert, Charaktereigenschaften der Nutzer beachtet und Fahrzeugtypen ermöglicht.

Die geometrischen Abmessungen der FK variieren mit dem fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebot, das sie erfüllen sollen. Die Länge bzw. der Radstand der FK ist vor allem durch die Sitzlehnenwinkel und die Anzahl der Sitzreihen bestimmt, wobei die dargestellte Flotte ausschließlich aus FK mit zwei Sitzreihen besteht. Die Breite hängt maßgeblich von der Personenzahl pro Sitzreihe ab. So ist ein FK mit maximal zwei Personen pro Sitzreihe schmaler als ein FK mit drei Personen in einer Sitzreihe. Die Fahrzeughöhe resultiert aus dem Sitzlehnenwinkel und dadurch indirekt aus den gewünschten Sekundärtätigkeiten. In jeder der drei Raumrichtungen führt ein gesteigerter Komfort zu einer Erhöhung der Maße.

Die Fahrstile der FK variieren je nach gewünschter Sekundärtätigkeit und subjektivem Sicherheitsbedürfnis der Nutzer. Dadurch greifen sie ein wesentliches Differenzierungsmerkmal von AV auf, das durch Software getrieben wird. Je nach persönlicher Präferenz und ausgeführter Tätigkeit ist der Fahrstil ein wesentlicher Bestandteil der Nutzerzufriedenheit eines FK.

Eine weitere Differenzierung, die heutzutage eine bedeutende Kaufentscheidung ist, bleibt das Exterieur-Design. Dies ist bereits durch den Raddurchmesser modelliert und muss in Form von Design-Elementen in der weiteren Serienentwicklung zur Erfüllung der Werte aus der Anforderungsliste berücksichtigt werden. Die simulierte Fahrzeugflotte unterscheidet sich in Bezug auf Fahrzeugtyp und Investitionsbereitschaft der Nutzer.

Die Anzahl der Derivate beeinflusst die einzelnen FK der Flotte maßgeblich. Eine höhere Anzahl führt mit spitzeren FK zur spezifischeren und durchschnittlich höheren Erfüllung der Bedürfnisse, während eine niedrigere Anzahl ausgewogene FK ohne spezifisch hohe Nutzererfüllung

## 5 Anwendung

hervorbringt. Dementsprechend ist die Anzahl der Derivate von der Wahl des Nutzererfüllungsgrades abhängig. Abbildung 5.9 zeigt für die drei in dieser Arbeit vorgestellten Nutzerszenarien (Anhang B) die Anzahl an Derivaten abhängig vom Nutzererfüllungsgrad in 10 %-Schritten von 50 %- bis 80 %-Erfüllung.

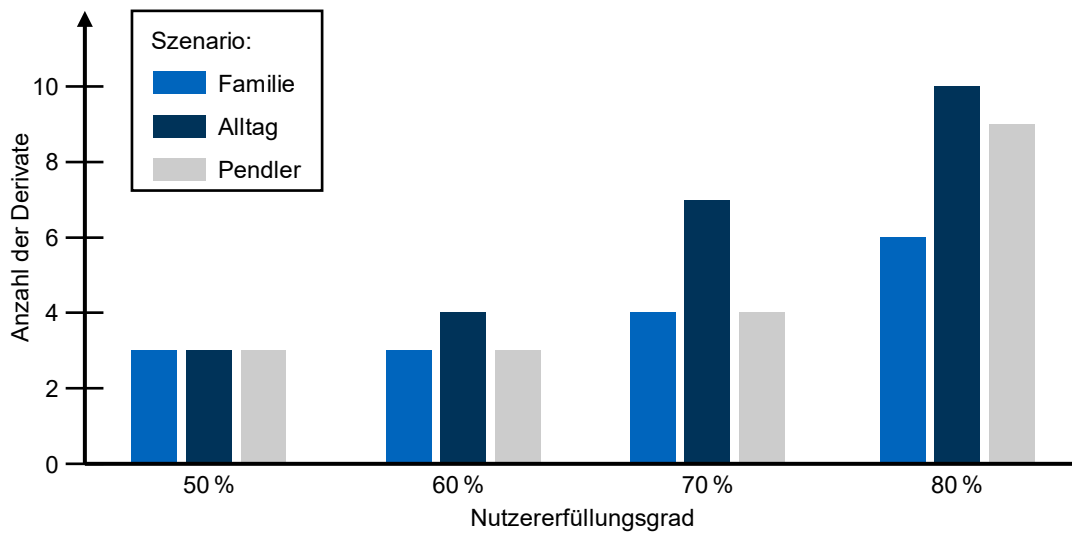


Abbildung 5.9: Anzahl der Derivate abhängig des Nutzererfüllungsgrades am Beispiel der drei Nutzerszenarien

Für das Nutzerszenario der Familie, deren benötigte sechs FK bei einem Nutzererfüllungsgrad von 80% zuvor vorgestellt wurden, ist zu erkennen, dass bei einer Verringerung des Nutzererfüllungsgrades auf 70% nur noch vier und auf 50% bzw. 60% nur noch drei Derivate notwendig wären. Dies zeigt wie OEM ihre Flotte an FK abhängig von der Zufriedenheit ihrer Nutzer, die durch den Nutzererfüllungsgrad dargestellt ist, aufstellen können. Hohe Nutzererfüllungsgrade führen zu einer differenzierten Fahrzeugflotte, sodass das Verkaufsvolumen pro FK sinkt, die Zufriedenheit und somit vermutlich die Investitionsbereitschaft der Nutzer aber steigt. In diesem Spannungsfeld gilt es, sich für Premium- wie Massenmarkthersteller zu positionieren.



# 6 Diskussion

Die einzelnen Teilprozessschritte haben in ihrer Beschreibung bereits jeweils eine Diskussion über ihr Vorgehen und ihre Ergebnisse inkludiert (Kapitel 4.1.5, Kapitel 4.2.5, Kapitel 4.3.5 und Kapitel 4.4.5). Dieses Kapitel soll darauf aufbauend eine Diskussion des Gesamtvorgehens (Kapitel 6.1) und der Gesamtergebnisse (Kapitel 6.2) sowie eine Schlussfolgerung (Kapitel 6.3) liefern.

## 6.1 Diskussion des Gesamtvorgehens

Das Ziel der vorliegenden Arbeit, eine Methode zu entwickeln, welche die Fahrzeugkonzeptentwicklung dahingehend erweitert, dass die Megatrends CASE adressiert sind, ist durch das vorgestellte Gesamtvorgehen (Kapitel 3) und die beschriebenen Teilprozessschritte (Kapitel 4) erfüllt. Die spezifischen Teilziele, die die Forschungslücke (Kapitel 2.3) formuliert, sind, den batterieelektrischen Antriebsstrang modellieren, die Sekundärtätigkeiten mit ihrem Einfluss auf das FK berücksichtigen, die verschiedenen Fahrzeugtypen der geteilten Mobilität aufgreifen und das Package ohne Fahrerarbeitsplatz entwickeln zu können. Diese Teilziele des Gesamtvorgehens sollen nachfolgend diskutiert werden.

Die Elektrifizierung des Antriebsstranges integriert das entwickelte Vorgehen durch das angepasste Portfolio der KWE und TE sowie durch die Betrachtung der veränderten Komponenten in Simulation und Packaging. Die LDS sowie die volumetrischen und gravimetrischen Modelle beziehen sich auf Komponenten eines BEV und das Package beinhaltet die Relevanz der Unterbringung der Batterie. Diese Modellierung beruht allerdings auf heutigen Fahrzeugen, sodass für zukünftige autonome, geteilte und elektrische FK Daten verwendet werden, die nicht dem Stand einer möglichen Marktreife dieser Fahrzeuge entsprechen.

Die Sekundärtätigkeiten, die durch die Automation der Fahraufgabe ermöglicht werden, spielen in jedem Prozessschritt des Gesamtvorgehens eine Rolle. Die Sekundärtätigkeiten beeinflussen die KWE und somit indirekt die TE, indem neue Eigenschaften hinzukommen und konventionelle verschwinden oder eine andere Gewichtung erhalten. Das Portfolio der Auslegungsparameter verändert und erweitert sich durch neue Grenzwerte der vorhandenen Auslegungsparameter wie dem Sitzlehnenwinkel und neue Auslegungsparameter wie der Innenraumtopologie. Die Definition des Derivats im ersten Prozessschritt (Kapitel 4.1) über die Sekundärtätigkeit, welche die heutige Nomenklatur über die Karosseriebauform ersetzt, hebt die besondere Bedeutung der Sekundärtätigkeiten im Gesamtvorgehen besonders heraus.

Geteilte Mobilität betrifft hauptsächlich die Besitzverhältnisse der Fahrzeuge. Das Gesamtvorgehen integriert die Frage nach einem Privatfahrzeug, nach einem Carsharing-Taxi oder nach einem Ridesharing-Shuttle. Auf diese Weise kann jedem Einzelbedürfnis nach Sekundärtätigkeiten ein passender Fahrzeugtyp zugeordnet werden. Diese Nutzerorientierung, welche die

klassische Kundenorientierung ersetzt, ermöglicht die Auslegung von FK für geteilte Mobilität und überwindet die konventionelle Auslegung für einen Kunden, der das Fahrzeug kauft, betreibt und nutzt. Jedoch muss festgehalten werden, dass sich geteilte Mobilität in dieser Arbeit auf die drei betrachteten Fahrzeugtypen beschränkt. Weitere denkbare Fahrzeugtypen wie beispielsweise ein haltestellenbasierter Kleinbus oder eine Mischform der drei berücksichtigten Fahrzeugtypen wie ein Privatfahrzeug, das in nicht genutzten Zeiten als Carsharing-Taxi freigegeben wird, sind nicht implementiert. Das Grundgerüst des Vorgehens sollte diese Erweiterung aber zulassen. Lediglich eine Überarbeitung des ersten Prozessschrittes (Kapitel 4.1) wäre unumgänglich.

Die Packageerstellung autonomer FK ohne Fahrerarbeitsplatz erfolgt durch das Vorgehen von KÖNIG [24, S. 40-53]. Innenraummaße erfahren eine höhere Bedeutung und Auslegungsparameter des Fahrers, wie Sichtwinkel, verschwinden. Die Packageauslegung verändert sich disruptiv, weil konventionelle Fixpunkte, wie der Ferspunkt des Fahrers, nicht mehr vorhanden sind und zur Darstellung der neuartigen Freiheitsgrade ein grenzflächenbasiertes statt eines maßkettenbasierten Packagings erfolgt.

Neben der Betrachtung der expliziten Auswirkungen der Megatrends CASE, die in den Teilzielen des Vorgehens gesammelt sind, ermöglicht das erarbeitete Vorgehen zur Entwicklung autonomer, geteilter und elektrischer FK die Integration der Softwareinflüsse. Konventionelle FK sind durch die Gestaltung und Positionierung ihrer Hardwarekomponenten beschrieben. Zukünftige FK werden aus Nutzersicht immer mehr hinsichtlich Softwarekomponenten bewertet werden, weshalb deren Integration in die Fahrzeugkonzeptentwicklung durch das Gesamtvorgehen eröffnet wird.

Eine weitere Stärke des präsentierten Vorgehens ist die Evolution und nicht die Disruption der konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklung. Es können bestehende Modelle integriert und genutzt werden und es wäre außerdem in einer konservativen Branche wie der Automobilindustrie nahezu unmöglich, bestehende Vorgehen disruptiv zu ersetzen. Die grundsätzliche Erkenntnis dieser Arbeit kann durch eine solche Integration des konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklungsprozesses bei OEM Anwendung finden und hinterlässt nicht den Eindruck theoretischer akademischer Forschung.

## 6.2 Diskussion der Gesamtergebnisse

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Verkehrsumgebung mit autonomer, geteilter und elektrischer Mobilität liegt nach verschiedenen Experteneinschätzungen [6, 12, 59, 276, 277] im Zeitraum 2030 bis 2050 und somit ca. 10 bis 30 Jahre in der Zukunft. Der große Zeithorizont impliziert Unsicherheiten für die betrachteten Szenarios. VON REIBNITZ [278, S. 26-29] beschreibt diese Unsicherheiten in ihrer Szenarioanalyse (Abbildung 6.1). Die Gesamtheit aller in der Zukunft möglichen Szenarien spannt einen Trichter mit der Gegenwart als Spitze auf. Je entfernter der betrachtete Zeitpunkt in der Zukunft liegt, desto größer wird die Fläche, die ein Schnitt durch den Trichter, der diesen Zeitpunkt darstellt, ergibt [278, S. 27]. Die Unsicherheit für ein Szenario wird von Zeitschritt zu Zeitschritt größer, weil die entsprechende Fläche alle zu diesem Zeitpunkt möglichen Szenarien repräsentiert.

Die Implementierung dieser Arbeit kann als Trendlinie interpretiert werden, weil sie sich in jedem Prozessschritt auf Literatur beruft. Somit liegt sie im Mittel aller denkbaren Verkehrsumgebungen. In den Jahren 2030 bis 2050 wird durch Einflüsse, wie beispielsweise Technologiesprünge oder

gesellschaftsverändernde Ereignisse, wie es die Coronapandemie war, ein abweichendes Szenario eintreten (Szenario A oder Szenario B in Abbildung 6.1). Diese Unsicherheit der Ergebnisse dieser Arbeit kann nicht vermieden werden und ist trotzdem als Schwäche zu interpretieren, weil die Ergebnisse an Aussagekraft verlieren und lediglich als Einschätzung und Richtwert anstatt als detaillierte Voraussagen dienen können.

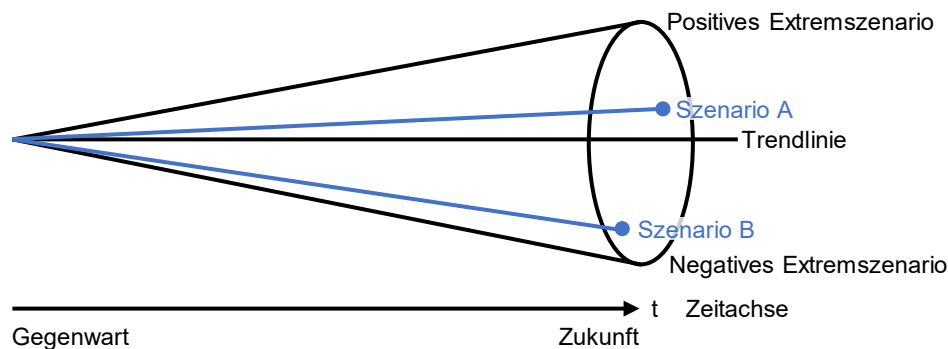


Abbildung 6.1: Szenarioanalyse nach VON REIBNITZ [278, S. 27]

Des Weiteren variiert der Detaillierungsgrad der Zwischenergebnisse und der angewendeten Simulationen und Modelle stark. Die von NICOLETTI [25] verwendeten volumetrischen und gravimetrischen Komponentenmodelle sowie die LDS von KÖNIG ET AL. [249, 261] basieren auf einer kleinteiligen, detaillierten Teilkomponenten- und Funktionsmodellierung, die jeweils in ihren Einzelheiten validiert sind. Die Packagegenerierung von KÖNIG [24, S. 40-53, 58] auf Basis von Grenzflächen verlässt diesen Detaillierungsgrad und kann durch das Zusammenführen von Baugruppen und der Betrachtung von deren Grenzflächen nur noch Wechselwirkungen zwischen diesen Baugruppen erfassen. Zur Erstellung des FK zieht er ungefähr 150 Auslegungsparameter heran. Die vorgelagerten Prozessschritte von den nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnissen bis zu den technischen Eigenschaften können im Umfang dieser Arbeit eine solche Detaillierungstiefe nicht liefern, sodass zur Anwendung der Modellierungen von KÖNIG [24] und NICOLETTI [25] in der Implementierung der vorliegenden Arbeit Annahmen getroffen werden müssen. Dies führt zu Ungenauigkeiten und die Formulierung der Annahmen für alle FK innerhalb der Systemgrenzen lässt keine Einzelfallbetrachtung zur spezifischen Abschätzung zu.

Ein weiterer Kritikpunkt an den Gesamtergebnissen ist deren Validität. Die einzelnen Prozessschritte besitzen eine unterschiedliche Güte in ihrer Validierung. Teilweise können sie nicht validiert werden und erfahren deshalb nur eine Plausibilisierung. Diese fehlende Validierung in Teilen der Prozesskette macht eine Aussage zur Validität der Gesamtergebnisse unmöglich. Deren Plausibilität ist als Mindestgütemaß durch die angewendeten Validierungs- und Plausibilisierungsmethoden sichergestellt.

Die Ergebnisse der Anwendung in Kapitel 5 sind in diesem Zusammenhang zu betrachten. Insbesondere die Anzahl der benötigten Derivate für einen gewünschten Nutzererfüllungsgrad ist als relative Anzahl zum Vergleich innerhalb der Ergebnisse und nicht als absolute Anzahl, die die Flottengröße exakt vorgibt, zu verstehen. Weil die einzelnen FK maßgeblich von den weiteren FK der Flotte abhängen, ist das gewählte Anschauungsbeispiel und seine präsentierten FK ausschließlich eine Anwendung des Vorgehens und kein reales Ergebnis. Ein solches kann das Vorgehen dieser Arbeit mit seiner Implementierung zum heutigen Zeitpunkt aufgrund der aufgezählten Ungenauigkeiten nicht liefern.

### 6.3 Schlussfolgerung

Die zuvor diskutierten Stärken und Schwächen des Gesamtvorgehens und der Gesamtergebnisse sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Sie zeigen deutlich die Stärken dieser Arbeit im methodischen Bereich der Prozessdefinition für die Fahrzeugkonzeptentwicklung für autonome, geteilte und elektrische Mobilität. Die konkreten Ergebnisse, die zum heutigen Zeitpunkt mit diesem Prozess abgeleitet werden, sind hingegen eher als Schwäche zu betrachten.

Tabelle 6.1: Stärken und Schwächen des Gesamtvorgehens und der Gesamtergebnisse

Stärken	Schwächen
Vorgehen adressiert die Megatrends der zukünftigen Mobilität CASE	Ergebnisse besitzen hohe Unsicherheit aufgrund des betrachteten Zeithorizontes
Vorgehen ermöglicht Integration der Softwareeinflüsse	Zwischenergebnisse unterscheiden sich im Detaillierungsgrad
Vorgehen ist Evolution der konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklung	Validierung der Ergebnisse ist nicht möglich

Die Ergebnisse und die Anwendung sind demnach als Abschätzungen zu FK zu sehen und dienen als weitere Plausibilitäts- und Funktionalitätsprüfung des Vorgehens. In dieser Funktion unterstützen die Ergebnisse das Ziel dieser Arbeit, einen Prozess zur Fahrzeugkonzeptentwicklung für zukünftige autonome, geteilte und elektrische Mobilität zu entwerfen. Die Implementierung und das dazugehörige VASEM-Tool [272] sind deshalb als Unterstützung für einen Fahrzeugkonzeptingenieur und nicht als automatisierte Fahrzeugkonzeptentwicklung zu betrachten. Zum heutigen Zeitpunkt sind zu viele Abschätzungen erforderlich, die einer Überprüfung durch einen Experten auf Ebene der Zwischenergebnisse bedürfen.

Zusammenfassend und als Schlussfolgerung dieser Diskussion ist festzuhalten, dass der Neuigkeitswert dieser Arbeit methodisch in der Prozessentwicklung liegt. Ergebnisse, als zweite Möglichkeit eines wissenschaftlichen Neuigkeitswertes, existieren, sind aber nicht ausreichend belastbar, um den Neuigkeitswert dieser Arbeit in den Ergebnissen zu sehen. Dementsprechend liefert diese Arbeit die methodischen Grundlagen für eine detaillierte Erforschung der Fahrzeugkonzeptentwicklung für autonome, geteilte und elektrische Mobilität.

# 7 Zusammenfassung & Ausblick

Dieses abschließende Kapitel fasst die vorliegende Dissertation zusammen und greift dabei die wichtigsten Aspekte der vorangegangenen Seiten auf. Der anschließende Ausblick zeigt Möglichkeiten zur weiteren Forschung an der Fahrzeugkonzeptentwicklung in autonomer, geteilter und elektrischer Mobilität auf.

## 7.1 Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen der Megatrends der Mobilität CASE auf die zukünftigen Fahrzeugkonzepte und deren Entwicklungsprozess. Dazu wird in der Einleitung (Kapitel 1) die Motivation hinter diesem Forschungsthema hergeleitet und die einzelnen Trends „Connected“, „Autonomous“, „Shared“ und „Electric“ beschrieben.

Der Stand der Technik (Kapitel 2) befasst sich mit den inhaltlichen Grundlagen dieser Arbeit und bereitet die bestehende Forschung auf. Dazu wird zuerst die konventionelle Fahrzeugkonzeptentwicklung beschrieben, um darauf aufbauend die einzelnen Aspekte von CASE bezüglich ihrer Auswirkung auf das Fahrzeugkonzept und dessen Entwicklungsprozess zu analysieren. Dabei zeigt sich, dass der Megatrend „Connected“ ein Forschungsfeld für Fahrzeugflotten bzw. Verkehrsinfrastrukturmgebungen ist und keine direkten Auswirkungen auf die Fahrzeugkonzeptentwicklung hat. Dementsprechend stellt der letzte Teil des Standes der Technik die bestehende Forschung zu Fahrzeugkonzepten sowie deren Entwicklungsprozess für autonome, geteilte und elektrische Mobilität vor. Aus dieser Gegenüberstellung geht hervor, dass Einzelaspekte bereits erforscht sind, eine vollständige Betrachtung aller Megatrends in diesem Kontext aber nicht besteht.

Für diese Forschungslücke leitet Kapitel 3 das Gesamtkonzept auf Basis einer Untersuchung von Methodiken der Produktkonzeptentwicklung her. Auf der Grundlage des Axiomatic Designs, des konventionellen Fahrzeugkonzeptentwicklungsprozesses und einer Definition des autonomen, geteilten und elektrischen Fahrzeugkonzeptes wird ein Grobvorgehen zu dessen Entwicklung entworfen. Dieses Vorgehen besteht aus den Prozessbausteinen „Nutzerzentrierte Mobilitätsbedürfnisse“, „Kundenwerte Eigenschaften“, „Technische Eigenschaften“, „Auslegungsparameter“ und „Fahrzeugkonzept“.

Dieses Gesamtvorgehen ist in Kapitel 4 in seinen vier Prozessschritten, die den Übergang der Prozessbausteine beschreiben, detailliert. Jeder Prozessschritt wird anhand seiner Zielsetzung, seines Vorgehens mit der theoretischen Methodik und der praktischen Implementierung, seiner Ergebnisse, seiner Validierung bzw. seiner Plausibilisierung und seiner abschließenden Diskussion mit Ausblick erarbeitet.

Im ersten Prozessschritt (Kapitel 4.1) wird aus den Mobilitätsbedürfnissen einer Nutzergruppe über einen genetischen Algorithmus die minimale Anzahl an Derivaten ermittelt, die benötigt wird,

um die Bedürfnisse der Nutzergruppe zu einem gewählten Erfüllungsgrad zu befriedigen. Die diesen einzelnen Derivaten zugeordneten Nutzerbedürfnisse werden nachfolgend über eine Fuzzylogik in fahrzeugbezogene kundenwertige Eigenschaften übersetzt.

Der zweite Prozessschritt (Kapitel 4.2) berechnet aus diesen in einer Nominalskala vorliegenden kundenwertigen Eigenschaften der Fahrzeugkonzepte physikalisch messbare technische Eigenschaften. Dies erfolgt über Korrelationsfunktionen, die aus Daten bestehender Fahrzeuge und deren Verkaufszahlen oder aus Analogien zu anderen Bereichen, wie der Luftfahrt, erstellt werden.

Die Bestimmung der Auslegungsparameter mit Topologien- und Komponententechnologieentscheidungen bildet den dritten Prozessschritt (Kapitel 4.3). Je nach Auslegungsparameter ermitteln stetige oder diskrete Funktionen, die gewichtet sein können, das Ergebnis.

Der finale Prozessschritt (Kapitel 4.4) der Fahrzeugkonzepterstellung beruht auf KÖNIG und NICOLETTI und simuliert Komponentenkennwerte mithilfe einer Längsdynamiksimulation, berücksichtigt Softwareinflüsse durch deren Manipulation, modelliert Volumen sowie Masse der Komponenten und positioniert alle Komponenten zum Package. Wo es möglich ist, kommen dabei Modelle der Konzeptionierung konventioneller batterieelektrischer Fahrzeuge zum Einsatz. Sobald es die Freiheitsgrade autonomer und geteilter Mobilität erfordern, erfolgt eine darauf angepasste Modellierung. Als Ergebnis ergibt sich das Fahrzeugkonzept mit seinem Package und einer Anforderungsliste, welche die konzeptrelevanten Auswirkungen der Software des Fahrzeugs beinhaltet.

Die Anwendung in Kapitel 5 greift ein Nutzerszenario auf und präsentiert die Fahrzeugkonzepte, die zur Befriedigung von dessen Nutzerbedürfnissen notwendig sind. Darüber hinaus zeigt sie, wie der Nutzererfüllungsgrad die Anzahl an Derivaten beeinflusst und somit die Fahrzeugflotte für ein Nutzerszenario prägt.

Eine Diskussion (Kapitel 6), welche die Stärken dieser Arbeit vor allem im Vorgehen und die Schwächen eher in der Belastbarkeit der Ergebnisse sieht, schließt diese Dissertation ab. Aus der Diskussion geht hervor, dass der Neuigkeitswert dieser Arbeit im methodischen Bereich anzusiedeln ist. Die vorliegende Arbeit liefert die Grundlagen für kommende Forschung in der Fahrzeugkonzeptentwicklung für autonome, geteilte und elektrische Mobilität.

## 7.2 Ausblick

Diese zukünftige Forschung ist in vielen Bereichen möglich, weil diese Arbeit zusammen mit den Arbeiten von KÖNIG [24] und KOCH [23] eine der ersten ist, die Fahrzeugkonzepte im Kontext autonomer, geteilter und elektrischer Mobilität betrachten. Während die vorliegende Arbeit die gesamte Prozesskette betrachtet, erforschen KÖNIG und KOCH spezifische Aspekte.

Das Gesamtverfahren dieser Arbeit (Abbildung 3.2) ist ein sequenzieller Prozess, der, anders als die konventionelle Fahrzeugkonzeptentwicklung (Abbildung 2.2) durch den Soll-/Ist-Vergleich, keine Optimierungsschleife hat. Diese klassische Optimierung des einzelnen Fahrzeugkonzeptes über seine aktuellen und seine geforderten kundenwertigen Eigenschaften kann aufbauend auf diese Arbeit betrachtet werden. Im Zuge dieser Erweiterung des Prozesses sollte eine Optimierungsschleife der Fahrzeugflotte, die sich aus der Menge aller Fahrzeugkonzepte ergibt, über die aktuellen Flotteneigenschaften mit den initial geforderten

Nutzerbedürfnissen evaluiert werden. Abbildung 7.1 zeigt den Aufbau des Prozesses mit der Integration dieser beiden Optimierungsschleifen:

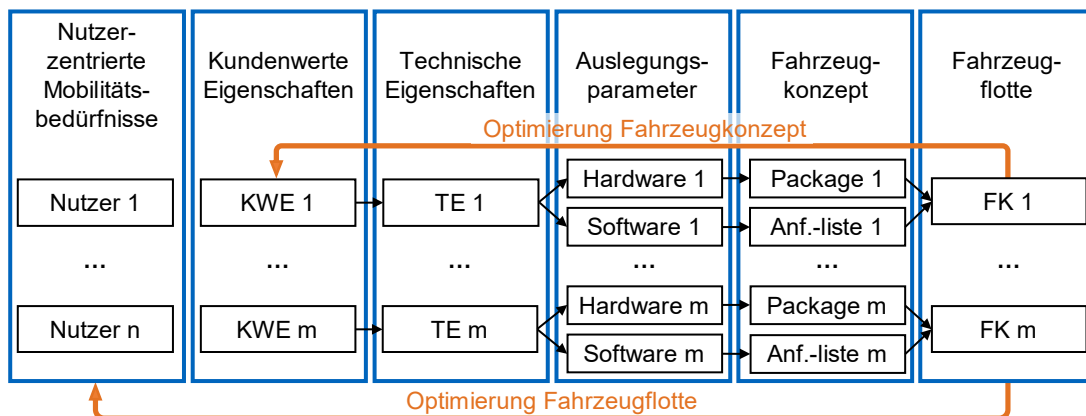


Abbildung 7.1: Ausblick zur Fahrzeugkonzeptentwicklung für autonome, geteilte und elektrische Mobilität

Darüber hinaus ist jeder vorgestellte Prozessschritt in seiner Detailtiefe nicht für die Industrie ausgearbeitet. Diese Arbeit entwickelt den beschriebenen Prozess, um nachfolgenden Arbeiten zu ermöglichen, die einzelnen Prozessschritte auszuarbeiten bzw. Bestandteile der Prozessschritte zu betrachten. Diese zukünftigen Forschungsaspekte sind in den Kapiteln 4.1.5, 4.2.5, 4.3.5 und 4.4.5 zum jeweiligen Prozessschritt diskutiert.

Im Hinblick auf weitere zukünftige Forschung ist diese Dissertation dahingehend zu lesen, dass der Neuigkeitswert in der Erarbeitung des Fahrzeugkonzeptentwicklungsprozesses für autonome, geteilte und elektrische Mobilität liegt und die spezifische Ausarbeitung in Form von akademischer Detaillierung oder der Anwendung in der Industrie noch aussteht.





# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Einordnung der Arbeit.....	3
Abbildung 1.2:	Aufbau der Arbeit.....	5
Abbildung 2.1:	Automobiler Produktentstehungsprozess nach [22, 26, S. 1276, 27, S. 9].....	7
Abbildung 2.2:	Fahrzeugkonzeptentwicklungsprozess nach [31, 32].....	8
Abbildung 2.3:	Fahrzeugtypen in geteilter Mobilitätsumgebung .....	11
Abbildung 2.4:	Neue/ geänderte kundenwerte Eigenschaften von Elektrofahrzeugen nach [77, S. 36].....	12
Abbildung 3.1:	Axiomatic Design nach [116].....	20
Abbildung 3.2:	Gesamtvorgehen nach [110] .....	21
Abbildung 4.1:	Nutzerszenario Familie nach [127].....	24
Abbildung 4.2:	Vorgehen zur Ableitung von kundenwerten Eigenschaften aus nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnissen nach [125] .....	25
Abbildung 4.3:	Ablauf genetischer Algorithmen nach [160, S. 37-43] .....	27
Abbildung 4.4:	Fuzzylogik nach [171, S. 79] .....	27
Abbildung 4.5:	Derivate des Nutzerszenarios Familie bei einem Nutzererfüllungsgrad von 80 %.....	30
Abbildung 4.6:	Zuordnung der Derivate zu den Nutzern in den Sekundärtätigkeiten: (a) Derivate, die die Mutter zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse nutzt, und (b) Nutzer, die Derivat 2 nutzen .....	31
Abbildung 4.7:	Ausprägungen der kundenwerten Eigenschaften des FK 2 .....	32
Abbildung 4.8:	Vergleich der Expertenantworten mit den Systemantworten mittels IQR .....	34
Abbildung 4.9:	Vorgehen zur Ableitung von technischen Eigenschaften aus kundenwerten Eigenschaften .....	38
Abbildung 4.10:	Korrelationsfunktionen nach (a) KANO [213], (b) WIEDEMANN [77, S. 58-59] und (c) DEUBEL [45, S. 49-58].....	39
Abbildung 4.11:	Erstellung der datenbasierten Korrelationsfunktionen (Quellen der Logos [209, 210, 216]) .....	40
Abbildung 4.12:	Erstellung der grenzwertbasierten Korrelationsfunktion .....	41
Abbildung 4.13:	Bildung der datenbasierten Korrelationsfunktionen am Beispiel der Ableitung der TE „Höchstgeschwindigkeit“ aus der KWE „Längsdynamik“: (a)	

	Gaußverteilung der Neuzulassungen aus dem Jahr 2020; (b) kumulierte Gaußverteilung als Korrelationsfunktion .....	43
Abbildung 4.14:	Auswahl der datenbasierten Korrelationsfunktionen: (a) Schwerpunkthöhe in mm, (b) effektive Kopffreiheit H61 in mm, (c) Reichweite (WLTP) in km und (d) Raddurchmesser in mm .....	43
Abbildung 4.15:	Auswahl der grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen: (a) Türbreite pro Sitzplatz in mm und (b) Crashlänge in mm .....	45
Abbildung 4.16:	Plausibilisierung der datenbasierten Korrelationsfunktionen .....	48
Abbildung 4.17:	Auswahl der Plausibilisierung der datenbasierten Korrelationsfunktionen: (a) Schwerpunkthöhe in mm, (b) effektive Kopffreiheit H61 in mm, (c) Reichweite (WLTP) in km und (d) Raddurchmesser in mm .....	48
Abbildung 4.18:	Auswahl der Plausibilisierung der grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen: (a) Lichte Höhe in mm und (b) Türbreite pro Sitzplatz in mm .....	50
Abbildung 4.19:	Vorgehen zur Ableitung von Auslegungsparametern aus technischen Eigenschaften .....	52
Abbildung 4.20:	Berechnung diskreter Auslegungsparameter .....	53
Abbildung 4.21:	Berechnung stetiger Auslegungsparameter .....	53
Abbildung 4.22:	Diskrete Berechnung der Anzahl der Sitzreihen .....	54
Abbildung 4.23:	Stetige Berechnung zur Abschätzung der hinteren und seitlichen freien Crashlänge nach [233]; Daten der unteren und oberen Grenzwerte [210] ...	55
Abbildung 4.24:	Vorgehen zur Ableitung von Fahrzeugkonzepten aus Auslegungsparametern .....	60
Abbildung 4.25:	Vorgehen von NICOLETTI zur Modellierung der Hardware und des Packages von BEV nach [25, S. 23] .....	61
Abbildung 4.26:	Vorgehen von KÖNIG zur Modellierung der Hardware und des Packages von AV nach [24, S. 35] .....	62
Abbildung 4.27:	Empirische Regression am Beispiel des Statorvolumens über der maximalen Leistung der elektrischen Maschine nach [269, S. 45] .....	64
Abbildung 4.28:	Grenzflächenbasiertes Package nach KÖNIG [24, S. 42, 58] .....	65
Abbildung 4.29:	Darstellung des Packages von FK 2 (erstellt mit [272], übernommen von [260]) .....	66
Abbildung 4.30:	Validierung am Beispiel der Leermasse des Fahrzeugs nach [25, S. 66] .....	69
Abbildung 4.31:	Validierung des Packages nach KÖNIG: (a) VW ID.3 [24, S. 61] und (b) Zoox [24, S. 63] .....	70
Abbildung 5.1:	Nutzer Vater und die ihm zugeordneten Derivate .....	74
Abbildung 5.2:	Nutzer Mutter und die ihr zugeordneten Derivate .....	74
Abbildung 5.3:	Nutzer Jugendlicher und die ihm zugeordneten Derivate .....	75
Abbildung 5.4:	Nutzer Kind und die ihm zugeordneten Derivate .....	75

---

Abbildung 5.5:	Darstellung des Package von FK 1 (erstellt mit VASEM [272], übernommen von AuVeCoDe [260]).....	76
Abbildung 5.6:	Darstellung des Package von FK 3 (erstellt mit VASEM [272], übernommen von AuVeCoDe [260]).....	78
Abbildung 5.7:	Darstellung des Package von FK 4 (erstellt mit VASEM [272], übernommen von AuVeCoDe [260]).....	79
Abbildung 5.8:	Darstellung des Package von FK 5 (erstellt mit VASEM [272], übernommen von AuVeCoDe [260]).....	80
Abbildung 5.9:	Anzahl der Derivate abhängig des Nutzererfüllungsgrades am Beispiel der drei Nutzerszenarien.....	82
Abbildung 6.1:	Szenarioanalyse nach VON REIBNITZ [278, S. 27] .....	85
Abbildung 7.1:	Ausblick zur Fahrzeugkonzeptentwicklung für autonome, geteilte und elektrische Mobilität .....	89
Abbildung B.1:	Nutzerszenario Familie nach [127].....	xxxv
Abbildung B.2:	Nutzerszenario Alltag nach [127] .....	xxxv
Abbildung B.3:	Nutzerszenario Pendler nach [127] .....	xxxvi
Abbildung G.1:	Plausibilisierung der grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen .....	liii



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Automatisierungsstufen nach SAE J3016 [11].....	10
Tabelle 2.2:	Bewertung der Literatur im Kontext dieser Arbeit .....	17
Tabelle 3.1:	Vergleich der Entwicklungsmethoden nach [110].....	20
Tabelle 4.1:	Validierungsergebnisse der Transformation des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes in kundenwerte Eigenschaften nach Fahrzeugtyp .....	35
Tabelle 4.2:	Schwerpunkthöhenmessung und Vergleich mit der Schwerpunkthöhenregression nach Vorarbeit [195, S. 29] .....	44
Tabelle 4.3:	Ausprägung der technischen Eigenschaften von FK 2 und die vorausgehenden Ausprägungen der kundenwerten Eigenschaften .....	45
Tabelle 4.4:	Parameterwert je Sekundärtätigkeit zur Berechnung der Auslegungsparameter Innenraumtopologie und Sitzlehnenwinkel.....	56
Tabelle 4.5:	Auslegungsparameter des FK 2 am Beispiel der Innenraumparameter der zweiten Sitzreihe.....	57
Tabelle 4.6:	Anforderungsliste des FK 2 .....	68
Tabelle 5.1:	Anforderungsliste des FK 1 .....	77
Tabelle 5.2:	Anforderungsliste des FK 3 .....	78
Tabelle 5.3:	Anforderungsliste des FK 4 .....	79
Tabelle 5.4:	Anforderungsliste des FK 5 .....	81
Tabelle 6.1:	Stärken und Schwächen des Gesamtvorgehens und der Gesamtergebnisse .....	86
Tabelle A.1	Portfolio der nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnisse.....	xxxiii
Tabelle C.1	Portfolio des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes.....	xxxvii
Tabelle D.1	Portfolio der kundenwerten Eigenschaften .....	xxxix
Tabelle E.1	Portfolio der technischen Eigenschaften.....	xliii
Tabelle F.1	Korrelationsfunktionen KWE zu TE .....	xlvii
Tabelle F.2:	Quellen und Analogien der grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen .....	xlix
Tabelle G.1	Plausibilisierung der datenbasierten Korrelationsfunktionen von KWE zu TE li	
Tabelle H.1	Schlüsseltopologien und Schlüsselkomponententechnologien .....	lv
Tabelle H.2	Innenraum.....	lv
Tabelle H.3	Komponenten.....	lvi



# Literaturverzeichnis

- [1] A. I. Engebrigtsen, „Key figure of mobility: the nomad“, *Social Anthropology*, Jg. 25, Nr. 1, S. 42–54, 2017, doi: 10.1111/1469-8676.12379.
- [2] R. Follmer und D. Gruschwitz, *Mobilität in Deutschland: MiD Kurzreport*. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/infas\\_Mobilitaet\\_in\\_Deutschland\\_2017\\_Kurzreport.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/infas_Mobilitaet_in_Deutschland_2017_Kurzreport.pdf) (Zugriff am: 20. Mai 2022).
- [3] Europäisches Parlament, *CO2-Emissionen von Autos: Zahlen und Fakten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik> (Zugriff am: 20. Mai 2022).
- [4] J. S. Dangschat und A. Segert, „Nachhaltige Alltagsmobilität — soziale Ungleichheiten und Milieus“, *ÖZS*, Jg. 36, Nr. 2, S. 55–73, 2011, doi: 10.1007/s11614-011-0033-z.
- [5] C. Ehlers, „Mobility of the Future - Connected, Autonomous, Shared, Electric“, *30th International AVL Conference "Engine & Environment"*, Graz, Österreich, S. 175–177, 2018.
- [6] K. Heineke und P. Kampshoff, *The trends transforming mobility's future*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-trends-transforming-mobilitys-future> (Zugriff am: 31. Mai 2021).
- [7] L. Eliot, *Fireworks About ACES As Key Acronym For The Future Of Mobility And Self-Driving Cars*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.forbes.com/sites/lanceeliot/2019/07/04/fireworks-about-aces-as-key-acronym-for-the-future-of-mobility-and-self-driving-cars/?sh=61e639b5654e> (Zugriff am: 21. Februar 2022).
- [8] G. Muratovski, „Autonomous driving, connected mobility and smart cities: A conversation with Dr Clemens Dannheim, CEO of .objective Software“, *Journal of Design, Business & Society*, Jg. 4, Nr. 1, S. 7–11, 2018, doi: 10.1386/dbs.4.1.7\_7.
- [9] E. Uhlemann, „Time for Autonomous Vehicles to Connect [Connected Vehicles]“, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Jg. 13, Nr. 3, S. 10–13, 2018, doi: 10.1109/MVT.2018.2848342.
- [10] U. D. Grebe *et al.*, „Challenges for Future Automotive Mobility“ in *Powertrain, Systems Engineering for Automotive Powertrain Development*, H. Hick, K. Küpper und H. Sorger, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 3–30, doi: 10.1007/978-3-319-99629-5\_1.
- [11] *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, SAE J3016, Society of Automotive Engineers, 2018.
- [12] K. Heineke, R. Heuss, P. Kampshoff, A. Kelkar und M. Kellner, *The road to affordable autonomous mobility*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-road-to-affordable-autonomous-mobility> (Zugriff am: 14. Januar 2022).
- [13] D. A. Hensher, C. Q. Ho, C. Mulley, J. D. Nelson, G. Smith und Y. Z. Wong, *Understanding mobility as a service (MaaS): Past, present and future*. Amsterdam: Elsevier, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128200445>

- [14] P. Szymanski, B. Ciuffo, G. Fontaras, G. Martini und F. Pekar, „The future of road transport in Europe. Environmental implications of automated, connected and low-carbon mobility“, *Combustion Engines*, Jg. 186, Nr. 3, S. 3–10, 2021, doi: 10.19206/CE-141605.
- [15] M. Lienkamp, W. Schmid, S. Wolff, F. Homm und M. Hessel, *STATUS ELEKTROMOBILITÄT 2020: DAS ENDSPIEL NACH DER CORONA-KRISE*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/341670568\\_Status\\_Elektromobilitat\\_2020\\_Das\\_Endspiel\\_nach\\_der\\_Corona-Krise](https://www.researchgate.net/publication/341670568_Status_Elektromobilitat_2020_Das_Endspiel_nach_der_Corona-Krise) (Zugriff am: 21. Januar 2022).
- [16] Daimler AG, *CASE - Intuitive Mobilität*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.daimler.com/innovation/case.html> (Zugriff am: 21. Januar 2022).
- [17] Mercedes-Benz AG, *Der F 015 Luxury in Motion*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.com/de/innovation/autonomous/forschungsfahrzeug-f-015-luxury-in-motion/> (Zugriff am: 21. Januar 2022).
- [18] Volkswagen AG, *Studie Sedric*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/studie-sedric-3552> (Zugriff am: 21. Januar 2022).
- [19] zoox, Inc., *Vehicle: Built for riders, not for drives*. [Online]. Verfügbar unter: <https://zoox.com/vehicle/> (Zugriff am: 21. Februar 2022).
- [20] T. Woopen *et al.*, „UNICARagil - Disruptive modulare Architektur für agile, automatisierte Fahrzeugkonzepte“ (en), *27th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, Aachen, Germany*, 2018, doi: 10.18154/RWTH-2018-229909.
- [21] A. Rau, L. Tian, M. Jain, M. Xie, T. Liu und Y. Zhou, „Dynamic Autonomous Road Transit (DART) For Use-case Capacity More Than Bus“, *Transportation Research Procedia*, Jg. 41, S. 812–823, 2019, doi: 10.1016/j.trpro.2019.09.131.
- [22] M. Lienkamp, „Fahrzeugkonzepte: Entwicklung & Simulation“. Vorlesungsskript, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [23] A. Koch, „Energieeffizientes Fahren und Antriebskonzept-Optimierung elektrischer Fahrzeuge“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2022, in Bearbeitung.
- [24] A. König, „Methodik zur Auslegung von autonomen Fahrzeugkonzepten“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2022, in Bearbeitung.
- [25] L. Nicoletti, „Parametric Modeling of Battery Electric Vehicles in the Early Development Phase“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2022.
- [26] H.-H. Braess *et al.*, „Produktentstehungsprozess“ in *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, S. Pischinger und U. Seiffert, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 1257–1369, doi: 10.1007/978-3-658-09528-4\_11.
- [27] J. Weber, *Automotive Development Processes: Processes for Successful Customer Oriented Vehicle Development*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10313478>
- [28] A. Achleitner *et al.*, „Formen und neue Konzepte“ in *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, S. Pischinger und U. Seiffert, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 131–251, doi: 10.1007/978-3-658-09528-4\_4.
- [29] J. Anderson und J. Narus, „Business marketing: Understand what customers value“, *Harvard Business Review*, 76(6), S. 53–65, 1998.
- [30] S. Helm, B. Günter und A. Eggert, Hg., *Kundenwert: Grundlagen - Innovative Konzepte - Praktische Umsetzungen*, 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.



- [31] L. Nicoletti *et al.*, „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, 2020, S. 1–15, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9243115.
- [32] F. Schockenhoff, L. Nicoletti, M. Bayerlein, S. Krapf und M. Lienkamp, *Customer-Oriented Concept Assessment*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/345242497\\_Customer-Oriented\\_Concept\\_Assessment](https://www.researchgate.net/publication/345242497_Customer-Oriented_Concept_Assessment) (Zugriff am: 11. November 2021).
- [33] U. Lindemann, *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*, 3. Aufl. Berlin: Springer, 2009.
- [34] L. Nicoletti, F. Schockenhoff und M. Bayerlein, *COCA Tool - Customer-Oriented Concept Assessment Tool*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/Customer-Oriented-Concept-Assessment-COCA-Tool> (Zugriff am: 10. Oktober 2022).
- [35] 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.
- [36] B. Heiing und H. J. Brandl, *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*, 1. Aufl. Würzburg: Vogel, 2002.
- [37] J. Aigner, „Zur zuverlässigen Beurteilung von Fahrzeugen“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Jg. 84, Nr. 9, S. 447–450, 1982.
- [38] H.-J. Rudolph, T. Soppa, C. Dahlems und J. Meurle, „Fahrzeugkonzept“ in *Audi Q3*, H.-J. Rudolph, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 16–23, doi: 10.1007/978-3-658-00853-6\_3.
- [39] H.-J. Rudolph, T. Soppa, C. Dahlems und J. Meurle, „FAHRZEUGKONZEPT“, *ATZ Extra*, Jg. 16, Nr. 7, S. 18–23, 2011, doi: 10.1365/s35778-011-0619-x.
- [40] J. Meurle, S. Rigel und A. Muigg, „Fahrzeugeigenschaften- Erwartungshaltung des Kunden und technische Umsetzbarkeit“. Graz, 2009.
- [41] A. Ziemann, *Zielsystemmanagement für die Produktentstehung von PKW*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2006. Norderstedt: Books on demand, 2007.
- [42] J. Sauro, *Customer analytics for dummies: Manage the total customer experience ; collect, measure, and interpret customer data ; use data to build strong customer relationships ; transition to a data-driven customer experience*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.
- [43] A. Cooper, *The inmates are running the asylum: Why high-tech products drive us crazy and how to restore the sanity*, 6. Aufl. Indianapolis, Ind.: Sams, 2006.
- [44] K. Baumann, „Personas as a user-centred design method for mobility-related services“, *IDJ*, Jg. 18, Nr. 2, S. 157–167, 2010, doi: 10.1075/idj.18.2.07bau.
- [45] T. Deubel, „Anforderungs-, kosten- und wertgetriebene Steuerung des Produktentwicklungsprozesses“. Dissertation, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2007.
- [46] C. Angerer, „Antriebskonzept-Optimierung für batterieelektrische Allradfahrzeuge“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.
- [47] M. Felgenhauer, „Automated Development of Modular Systems for the Vehicle Front of Passenger Cars“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.

- [48] S. Fuchs, „Verfahren zur parameterbasierten Gewichtsabschätzung neuer Fahrzeugkonzepte“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2014.
- [49] J. Hahn, *Eigenschaftsbasierte Fahrzeugkonzeption: Eine Methodik in der Frühen Konzeptphase*. Dissertation. Wiesbaden: Springer, 2017.
- [50] A. Bazzi, A. O. Berthet, C. Campolo, B. M. Masini, A. Molinaro und A. Zanella, „On the Design of Sidelink for Cellular V2X: A Literature Review and Outlook for Future“, *IEEE Access*, Jg. 9, S. 97953–97980, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3094161.
- [51] M. Lauridsen, L. C. Gimenez, I. Rodriguez, T. B. Sorensen und P. Mogensen, „From LTE to 5G for Connected Mobility“, *IEEE Commun. Mag.*, Jg. 55, Nr. 3, S. 156–162, 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600778CM.
- [52] J. Hanzl, P. Gross, L. Bartuška und J. Pečman, „Simulation of Autonomous Mobility of Connected Vehicles in the Context of Real Conditions – a Case Study“, *LOGI – Scientific Journal on Transport and Logistics*, Jg. 12, Nr. 1, S. 226–237, 2021, doi: 10.2478/logi-2021-0021.
- [53] P. Liu und W. D. Fan, „Exploring the impact of connected and autonomous vehicles on mobility and environment at signalized intersections through vehicle-to-infrastructure (V2I) and infrastructure-to-vehicle (I2V) communications“, *Transportation Planning and Technology*, Jg. 44, Nr. 2, S. 129–138, 2021, doi: 10.1080/03081060.2020.1868088.
- [54] J. Feiler, S. Hoffmann und D. F. Diermeyer, „Concept of a Control Center for an Automated Vehicle Fleet“ in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rhodes, Greece, 2020, S. 1–6, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294411.
- [55] M. Dürr, „Dromos – An Autonomous Urban Mesh Transport Solution for Medium to High Capacity Transport for Cities“ in *2019 Conference on Future Automotive Technology (Co-FAT)*, München, 2019.
- [56] 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.
- [57] J. Wu, H. Liao und J.-W. Wang, „Analysis of consumer attitudes towards autonomous, connected, and electric vehicles: A survey in China“, *Research in Transportation Economics*, Jg. 80, S. 100828, 2020.
- [58] 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.
- [59] S. Modi, A. Spulber und J. Jin, „Impact of Automated, Connected Electric, and Shared (ACES Vehicles on Design, Materials Manufacturing, and Business Models)“, *Center for Automotive Research, Ann Arbor, USA*, 2018.
- [60] A. König, F. Schockenhoff, A. Koch und M. Lienkamp, „Concept Design Optimization of Autonomous and Electric Vehicles“ in *2019 8th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE)*, Dublin, Ireland, 2019, S. 44–49, doi: 10.1109/ICPSE49633.2019.9041175.
- [61] D. Sperling, E. van der Meer und S. Pike, „Vehicle Automation: Our Best Shot at a Transportation Do-Over?“ in *Three Revolutions: Steering Automated, Shared, and Electric Vehicles to a Better Future*, D. Sperling, Hg., Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics, 2018, S. 77–108.
- [62] F. Schockenhoff, H. Nehse und M. Lienkamp, „Maneuver-Based Objectification of User Comfort Affecting Aspects of Driving Style of Autonomous Vehicle Concepts“, *Applied Sciences*, Jg. 10, Nr. 11, S. 3946, 2020, doi: 10.3390/app10113946.

- [63] D. Schröder und F. Gotzler, „Comprehensive spatial and cost assessment of urban transport options in Munich“, *Journal of Urban Mobility*, Jg. 1, S. 100007, 2021, doi: 10.1016/j.urbmob.2021.100007.
- [64] N. 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> (Zugriff am: 30. März 2021).
- [65] V. Kolarov, M. Pützscher und K. Stark, „Analyse von Risiken selbstfahrender Fahrzeuge aus klimapolitischer Sicht“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Jg. 123, 05-06, S. 56–59, 2021.
- [66] S. Shaheen, „Shared Mobility: The Potential of Ridehailing and Pooling“ in *Three Revolutions: Steering Automated, Shared, and Electric Vehicles to a Better Future*, D. Sperling, Hg., Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics, 2018, S. 55–76.
- [67] London EV Company Ltd., *TX Electric Taxi*. [Online]. Verfügbar unter: <https://levc.com/tx-taxi/overview/> (Zugriff am: 31. Januar 2022).
- [68] Europäische Kommission, *Nach Paris: Bewertung der Folgen des Pariser Übereinkommens - Begleitunterlage zu dem Vorschlag für einen Beschluss des Rates über die Unterzeichnung des im Rahmen des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen geschlossenen Pariser Übereinkommens im Namen der Europäischen Union: KOM(2016) 110*. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52016DC0110> (Zugriff am: 27. Januar 2022).
- [69] Europäische Kommission, *Die internationale Klimapolitik nach Kopenhagen: Jetzt handeln, um dem globalen Klimaschutz neue Impulse zu geben: KOM(2010) 86*. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52010DC0086> (Zugriff am: 27. Januar 2022).
- [70] D. Sperling, „Electric Vehicles: Approaching the Tipping Point“ in *Three Revolutions: Steering Automated, Shared, and Electric Vehicles to a Better Future*, D. Sperling, Hg., Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics, 2018, S. 21–76.
- [71] A. Karle, *Elektromobilität: Grundlagen und Praxis*. München: Carl Hanser Verlag, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446444171>
- [72] L. Nicoletti, S. Mayer, M. Brönnner, 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.
- [73] L. Nicoletti, F. Ostermann, M. Heinrich, A. Stauber, X. Lin und M. Lienkamp, „Topology analysis of electric vehicles, with a focus on the traction battery“, *Forsch Ingenieurwes*, Jg. 85, Nr. 2, S. 457–467, 2021, doi: 10.1007/s10010-020-00422-1.
- [74] R. Kasper und M. Schünemann, „Elektrische Fahrtriebe Topologien Und Wirkungsgrad“, *MTZ Motortech Z*, Jg. 73, Nr. 10, S. 802–807, 2012, doi: 10.1007/s35146-012-0484-1.
- [75] T. Nemeth, A. Bubert, J. N. Becker, R. W. de Doncker und D. U. Sauer, „A Simulation Platform for Optimization of Electric Vehicles With Modular Drivetrain Topologies“, *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, Jg. 4, Nr. 4, S. 888–900, 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2869371.
- [76] 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.

- [77] E. Wiedemann, „Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2013.
- [78] M. Bereszewski, Hg., *Forschungsprojekt VISIO.M.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [79] M. Soltes, S. Koberstaedt, M. Lienkamp, S. Rauchbart und F. Frenkler, „aCar - a Electric Vehicle Concept for Sub-Saharan Africa“ in *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Cape Town, 2018, S. 301–306, doi: 10.1109/PowerAfrica.2018.8521044.
- [80] S. Bender *et al.*, „Concept of an Electric Taxi for Tropical Megacities“, *Conference on Future Automotive Technology (CoFAT)*, 2014.
- [81] A. Prinz, „Struktur und Ablaufmodell für das parametrische Entwerfen von Fahrzeugkonzepten“. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2010.
- [82] V. Bhise und A. Pillai, „A parametric Model for automotive Packaging and ergonomic Design“, *Proceedings of the 2006 International Conference on Computer Graphics & Virtual Reality, CGVR 2006, Las Vegas, Nevada, USA*, 2006.
- [83] V. Bhise, G. Kridli, H. Mamoola, S. Devaraj, A. Pillai und R. Shulze, „Development of a Parametric Model for Advanced Vehicle Design“ (eng), *SAE Technical Paper Series 2004*, 2004.
- [84] E. Wiedemann, J. Meurle und M. Lienkamp, „Optimization of Electric Vehicle Concepts Based on Customer-Relevant Characteristics“, *SAE 2012 World Congress and Exhibition*, 2012, doi: 10.4271/2012-01-0815.
- [85] J. Fuchs und M. Lienkamp, „Technologie und Architektur für Elektrifizierte Fahrzeuge“, *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 115, Nr. 3, S. 164–170, 2013, doi: 10.1007/s35148-013-0050-2.
- [86] J. Fuchs, T. Riemenschneider, L. Pitrof und M. Lienkamp, „Technical design and methodical evaluation of electrified vehicle architectures“, *13th International Stuttgart Symposium Automotive and Engine Technology*, Stuttgart, S. 239–257, 2013.
- [87] J. Fuchs, „Analyse der Wechselwirkungen und Entwicklungspotentiale in der Auslegung elektrifizierter Fahrzeugkonzepte“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2014.
- [88] S. Matz und M. Lienkamp, „Optimisation of vehicle concepts in a multimodal environment with regard to user benefit“, *Conference on Future Automotive Technology (CoFAT)*, 2013.
- [89] S. Matz, „Nutzerorientierte Fahrzeugkonzeptoptimierung in einer multimodalen Verkehrsumgebung“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2015.
- [90] M. Šoltés, D. Kappler, S. Koberstaedt und M. Lienkamp, „Flexible, User- and Product-Centered Framework for Developing Frugal Products Based on a Case Study of a Vehicle for Sub-Saharan Africa“ in *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Tampa, Florida, USA, 2018, doi: 10.1115/IMECE2017-70149.
- [91] M. Soltes, D. Kappler, S. Koberstaedt und M. Lienkamp, „A case study of a framework for user-centered hardware development based on the aCar electric vehicle project“ in *2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, 2018, S. 1–8, doi: 10.1109/EVER.2018.8362409.
- [92] M. Soltes, „Methode für die Entwicklung eines frugalen Elektrofahrzeuges für Subsahara-Afrika“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.

- [93] H. Plattner, C. Meinel und U. Weinberg, *Design Thinking*. Munich: mi-Wirtschaftsbuch, 2011.
- [94] H. Takeuchi und I. Nonaka, „The New New Product Development Game“, *Harvard Business Review*, Nr. 64, S. 137–146, 1986.
- [95] K. Kuchenbuch, T. Vietor und J. Stieg, „Optimierungsalgorithmen für den Entwurf von Elektrofahrzeugen“, *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 113, 7-8, S. 548–551, 2011, doi: 10.1365/s35148-011-0128-7.
- [96] K. Kuchenbuch, F. Nehuis, C. Stechert und T. Vietor, „Analysis of Goal Conflicts in the Vehicle Layout with Respect to Different Vehicle Environments“, *21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, S. 1455–1468, 2012.
- [97] K. Kuchenbuch, „Die Fahrzeugarchitektur als Stellhebel zum Entwurf effizienter Elektrofahrzeuge“, *Symposium Faszination Karosserie und Fahrzeugkonzepte, Wolfsburg*, 2012.
- [98] K. Kuchenbuch, „Methodik zur Identifikation und zum Entwurf packageoptimierter Elektrofahrzeuge“. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2012.
- [99] 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.
- [100] T. Tzivanopoulos, J. Stieg, P. Krasteva und T. Vietor, „Analysis of new freedoms in future vehicle interiors“ in *Proceedings, 14. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentchnik*, M. Bargende, H.-C. Reuss und J. Wiedemann, Hg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 669–682, doi: 10.1007/978-3-658-05130-3\_103.
- [101] S. Schickram, M. Weber und M. Lienkamp, „Electromobility potential index“ in *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER 2013)*, Monte Carlo, 2013, S. 1–7, doi: 10.1109/EVER.2013.6521616.
- [102] S. Schickram, „Derivation and Evaluation of Electric Vehicle Concepts for World Cities“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2017.
- [103] S. Schickram, D. Gleyzes und M. Lienkamp, „Evaluation of the Electromobility Potential Index and results for 46 major cities“ in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, Barcelona, Spain, 2013, S. 1–9, doi: 10.1109/EVS.2013.6914851.
- [104] S. Schickram, Z. Till und M. Lienkamp, „Auslegung von Elektrischen Fahrzeugkonzepten für Megacities in Asien“, *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 115, Nr. 2, S. 126–130, 2013, doi: 10.1007/s35148-013-0034-2.
- [105] G. Sethuraman, „Vehicle Component Configuration Design and Packaging in Virtual Environment for Autonomous Electric Buses“. Dissertation, Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo, Japan, 2020.
- [106] G. Sethuraman *et al.*, „Development of an Overall Vehicle Sizing and Packaging Tool for Autonomous Electric Buses in the Early Concept Phase“, *SAE Int. J. Commer. Veh.*, Jg. 13, Nr. 1, 2020, doi: 10.4271/02-13-01-0002.
- [107] G. Sethuraman, P. R. Tran, A. Ongel, M. Lienkamp und P. Raksincharoensak, „Development of a parametric packaging and sizing tool for autonomous electric bus system“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Jg. 235, Nr. 6, S. 1713–1733, 2021, doi: 10.1177/0954407020972268.
- [108] A. Pathak, S. Scheuermann, A. Ongel und M. Lienkamp, „Conceptual Design Optimization of Autonomous Electric Buses in Public Transportation“, *WEVJ*, Jg. 12, Nr. 1, S. 30, 2021, doi: 10.3390/wevj12010030.

- [109] A. Pathak, G. Sethuraman, A. Ongel und M. Lienkamp, „Impacts of electrification & automation of public bus transportation on sustainability—A case study in Singapore“, *Forsch Ingenieurwes*, 2020, doi: 10.1007/s10010-020-00408-z.
- [110] 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.
- [111] M. Ernster, „Konzeptentwicklung autonomer Fahrzeuge in der Literatur“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.
- [112] M. Zähringer, „Nutzerzentriertes holistisches Framework zur Konzeption autonomer Fahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.
- [113] F. W. Breyfogle, *Implementing six sigma: Smarter solutions using statistical methods*, 2. Aufl. Hoboken, NJ: Wiley, 2003. [Online]. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10304567>
- [114] B. Smith, „Lean and Six Sigma - A one-Two Punch“, *QUALITY PROGRESS*, Jg. 36, Nr. 4, S. 37–41, 2003.
- [115] K. Yang, B. El-Haik und B. El-Haik, *Design for Six Sigma*. New York: McGraw-Hill Publishing, 2003.
- [116] N. P. Suh, *Axiomatic design: Advances and applications*. New York, NY: Oxford Univ. Press, 2001.
- [117] N. P. Suh, *The principles of design*. New York: Oxford Univ. Pr, 1990.
- [118] N. P. Suh, A. C. Bell und D. C. Gossard, „On an Axiomatic Approach to Manufacturing and Manufacturing Systems“, *Journal of Engineering for Industry*, Jg. 100, Nr. 2, S. 127–130, 1978, doi: 10.1115/1.3439399.
- [119] A. M. Farid und N. P. Suh, Hg., *Axiomatic design in large systems: Complex products, buildings and manufacturing systems*. Cham, Switzerland: Springer, 2016.
- [120] *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, VDI 2206, VDI, 2004.
- [121] B. W. Boehm, „Guidelines for Verifying and Validating Software Requirements and Design Specifications“ in *Euro IFIP 79*, P. A. Samet, Hg., North Holland, 1979, S. 711–719.
- [122] C. Weber, „Modelling Products and Product Development Based on Characteristics and Properties“ in *An Anthology of Theories and Models of Design*, A. Chakrabarti und L. T. M. Blessing, Hg., London: Springer London, 2014, S. 327–352, doi: 10.1007/978-1-4471-6338-1\_16.
- [123] C. Weber, „Looking at “DFX” and “Product Maturity” from the Perspective of a New Approach of Modelling Product and Product Development Processes“ in *The future of product development: Proceedings of the 17th CIRP Design Conference*, F.-L. Krause, Hg., Berlin, New York: Springer, 2007, S. 85–104.
- [124] C. Weber, „Produkte und Produktentwicklungsprozesse abbilden mit der Hilfe von Merkmalen und Eigenschaften - eine kritische Zwischenbilanz“ in *Design for X: Beiträge zum 23. DfX-Symposium Oktober 2012*, D. Krause, Hg., Hamburg, Hamburg: Techn. Univ. Hamburg-Harburg Univ.-Bibl; TuTech Verl., 2012, S. 25–62.
- [125] F. Schockenhoff, M. Zähringer, M. Brönner und M. Lienkamp, „Combining a Genetic Algorithm and a Fuzzy System to Optimize User Centricity in Autonomous Vehicle Concept Development“, *Systems*, Jg. 9, Nr. 2, S. 25, 2021, doi: 10.3390/systems9020025.
- [126] C.-P. Grunenwald, „Impact of Future Customer Structures on Concept Properties of Autonomous Vehicles“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.

- [127] Serra do Nascimento, Ana Clara, „Strategische Analyse von Szenarien zur Bewertung autonomer Fahrzeugkonzepte“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [128] M. Ponnath, „Identifikation der kundenwertigen Eigenschaften autonomer Fahrzeugkonzepte“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [129] F. Müller, „Neubewertung der Eigenschaften autonomer Fahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [130] L. Kopp, „Specification and Analysis of Properties for the Interior of an Autonomous Vehicle“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [131] C. Barthelme, „Customer-Relevant Properties for Internal Human-Machine Interfaces inside an Autonomous Taxi“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [132] M. Winterhoff, C. Kahner, C. Ulrich, P. Sayer und E. Wenzel, „Zukunft der Mobilität 2020: Die Automobilindustrie im Umbruch?“, Arthur D. Little, 2009. [Online]. Verfügbar unter: [https://aloe-iao.dfki.uni-kl.de/AloeMultimediaServlet/content?contentId=IY3Kauj&sessionId=AloeAnonymousSession\\_311967159829597072-1516755917346](https://aloe-iao.dfki.uni-kl.de/AloeMultimediaServlet/content?contentId=IY3Kauj&sessionId=AloeAnonymousSession_311967159829597072-1516755917346). Zugriff am: 31. Mai 2021.
- [133] M. Calmbach, M. Tautscher, J. Hecht und S. Borgstedt, *SINUS-Milieus*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sinus-institut.de/sinus-milieus> (Zugriff am: 22. Oktober 2021).
- [134] T. Schiller, K. Rothmann und K. Götz, *Autonomous driving in Germany - how to convince customers*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/consumer-industrial-products/Autonomous-driving-in-Germany\\_PoV.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/consumer-industrial-products/Autonomous-driving-in-Germany_PoV.pdf) (Zugriff am: 31. Mai 2021).
- [135] M. Winkler et al., *The autonomous car: A consumer perspective*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.capgemini.com/de-de/wp-content/uploads/sites/5/2019/05/Report\\_Autonomous\\_Cars.pdf](https://www.capgemini.com/de-de/wp-content/uploads/sites/5/2019/05/Report_Autonomous_Cars.pdf) (Zugriff am: 19. November 2021).
- [136] M.-B. Peters, *THE PULSE OF AUTONOMOUS DRIVING: An international user typology and an emotional landscape of autonomous driving*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.audi.com/content/dam/gbp2/company/research/audi-beyond/2019/pulse-of-autonomous-driving/and-audi-study-autonomous-driving.pdf> (Zugriff am: 19. November 2021).
- [137] G. Doll, E. Ebel, K. Heineke, M. Kellner und C. Wiemuth, *Private autonomous vehicles: The other side of the robo-taxi story*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/private-autonomous-vehicles-the-other-side-of-the-robo-taxi-story#> (Zugriff am: 1. Dezember 2021).
- [138] J. Dungs et al., *The value of time: Potential for user-centered services offered by autonomous driving*. [Online]. Verfügbar unter: [https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-3937647.pdf](https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3937647.pdf) (Zugriff am: 19. November 2021).
- [139] S. Stegmüller, M. Werner, M. Kern, B. Birzle-Harder, K. Götz und M. Stein, *Akzeptanzstudie "ROBOCAB": Autonome Mobilitätskonzepte aus Sicht der Nutzer*. [Online]. Verfügbar unter: [https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-5318976.pdf](https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5318976.pdf) (Zugriff am: 19. November 2021).

- [140] S. Ottler und R. Resch, *Akzeptanz des Autonomen Fahrens in Deutschland und Erwartungen an das Testfeld in Friedrichshafen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ravensburg.dhbw.de/dhbw-ravensburg/aktuelles/detail/2019/5/die-akzeptanz-fuer-autonomes-fahren-waechst> (Zugriff am: 19. November 2021).
- [141] T. Becker, F. Herrmann, D. Duwe, S. Stegmüller, F. Röckle und N. Unger, *Enabling the value of time.: Implications for the interior design of autonomous vehicles*. [Online]. Verfügbar unter: [https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-4972314.pdf](https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4972314.pdf) (Zugriff am: 19. November 2021).
- [142] N. Herzberger, M. Schwalm, M. Reske, T. Woopen und L. Eckstein, „Mobilitätskonzepte der Zukunft - Ergebnisse einer Befragung von 619 Personen in Deutschland im Rahmen des Projekts UNICARagil“, 2019.
- [143] F. K. Prinz, N. Herzberger, M. Schwalm, M. Reske, T. Woopen und L. Eckstein, „Mobilitätskonzepte der Zukunft II: Ergebnisse einer Befragung von 619 Personen in Deutschland im Rahmen des Projekts UNICARagil“ in *2019 Conference on Future Automotive Technology (CoFAT)*, München, 2019.
- [144] Statistisches Bundesamt, *Bevölkerung im Alter von 15 Jahren und mehr nach allgemeinen und beruflichen Bildungsabschlüssen nach Jahren*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Bildungsstand/Tabellen/bildungsabschluss.html;jsessionid=ADDDDF0FCD4DAAC7C2CBCF14A3B60CB76.live711> (Zugriff am: 23. November 2021).
- [145] Statistisches Bundesamt, *Väter bei Geburt von Kindern im Jahr 2019 im Durchschnitt 34,6 Jahre alt*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/10/PD20\\_411\\_12.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/10/PD20_411_12.html) (Zugriff am: 23. November 2021).
- [146] Statistisches Bundesamt, *Berufspendler*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/Tabellen/pendler1.html> (Zugriff am: 23. November 2021).
- [147] Statistisches Bundesamt, Hg., „Bevölkerung und Erwerbstätigkeit: Fachserie 1 Reihe 1.3“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Publikationen/Downloads-Bevoelkerungsstand/bevoelkerungsfortschreibung-2010130197004.pdf;jsessionid=1909A8C5BECE607CB8D2A6A96581D7CF.live712?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Publikationen/Downloads-Bevoelkerungsstand/bevoelkerungsfortschreibung-2010130197004.pdf;jsessionid=1909A8C5BECE607CB8D2A6A96581D7CF.live712?__blob=publicationFile). Zugriff am: 23. November 2021.
- [148] Statistisches Bundesamt, *Familien mit minderjährigen Kindern in der Familie nach Lebensform und Kinderzahl*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Tabellen/2-5-familien.html> (Zugriff am: 23. November 2021).
- [149] F. Blaeschke und H.-W. Freitag, „Bildungsbeteiligung, Bildungsniveau und Bildungsbudget“ in *Datenreport 2021: Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*, Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung, 2021, S. 101–120.
- [150] M. Ehlert, „Weiterbildung“ in *Datenreport 2021: Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*, Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung, 2021, S. 121–127.
- [151] T. Hochgürtel und B. Sommer, „Lebensformen in der Bevölkerung und Kinder“ in *Datenreport 2021: Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*, Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung, 2021, S. 51–64.
- [152] F. Mischler, K. Schüßler, S. Schymura und S. Touil, „Verdienste“ in *Datenreport 2021: Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*, Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung, 2021, S. 165–175.



- [153] C. Wingerter, „Arbeitsmarkt“ in *Datenreport 2021: Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*, Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung, 2021, S. 149–164.
- [154] O. Carsten und M. H. Martens, „How can humans understand their automated cars? HMI principles, problems and solutions“, *Cogn Tech Work*, Jg. 21, Nr. 1, S. 3–20, 2019, doi: 10.1007/S10111-018-0484-0.
- [155] J.-C. Köstring, T. Möller, S. Middleton, A. Tschiesner und A. Padhi, *The new realities of premium mobility*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/the%20new%20realities%20of%20premium%20mobility/the-new-realities-of-premium-mobility-final.pdf> (Zugriff am: 31. Mai 2021).
- [156] T. Schrader, T. Stolte, I. Jatzkowski, R. Graubohm und M. Maurer, „An Approach for a Requirement Analysis for an Autonomous Family Vehicle“ in *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Paris, France, 2019, S. 1597–1603, doi: 10.1109/IVS.2019.8813882.
- [157] 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.
- [158] P. Koopman und M. Wagner, „Autonomous Vehicle Safety: An Interdisciplinary Challenge“, *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.*, Jg. 9, Nr. 1, S. 90–96, 2017, doi: 10.1109/MITS.2016.2583491.
- [159] C. A. Coello Coello, G. B. Lamont und D. A. van Veldhuizen, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, 2. Aufl. New York, NY: Springer, 2007.
- [160] V. Nissen, *Einführung in evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution*. Braunschweig: Vieweg, 1997.
- [161] M. Brönner, S. Wolff, J. Jovanovic, K. Keuthen und M. Lienkamp, „Production Strategy Development: Simulation of Dependencies Using Recurrent Fuzzy Systems“, *Systems*, Jg. 8, Nr. 1, S. 1, 2020, doi: 10.3390/systems8010001.
- [162] M. Brönner, „Decision-Support for Production Strategies for Developing Economies“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [163] D. M. Castro und F. Silv Parreiras, „A review on multi-criteria decision-making for energy efficiency in automotive engineering“, *ACI*, Jg. 17, Nr. 1, S. 53–78, 2021, doi: 10.1016/j.aci.2018.04.004.
- [164] A. Mardani, A. Jusoh und E. K. Zavadskas, „Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications – Two decades review from 1994 to 2014“, *Expert Systems with Applications*, Jg. 42, Nr. 8, S. 4126–4148, 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2015.01.003.
- [165] M. Velasquez und P. T. Hester, „An analysis of multi-criteria decision making methods“, *International Journal of Operations Research*, Jg. 10, Nr. 2, S. 56–66, 2013.
- [166] A. Ishizaka und P. Nemery, *Multi-criteria decision analysis: Methods and software*. Chichester: Wiley, 2013.
- [167] M. Lerma Garro, „Identifikation von Mobilitätsanforderungen und Darstellung ihrer qualitativen Zusammenhänge in der Konzeptentwicklung von autonomen Fahrzeugen“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.

- [168] G. Montibeller und L. A. Franco, „Raising the bar: strategic multi-criteria decision analysis“, *Journal of the Operational Research Society*, Jg. 62, Nr. 5, S. 855–867, 2011, doi: 10.1057/jors.2009.178.
- [169] H.-J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory—and Its Applications*. Dordrecht: Springer, 2001.
- [170] H.-H. Bothe, *Fuzzy Logic: Einführung in Theorie und Anwendungen*, 2. Aufl. Berlin: Springer, 1995.
- [171] D. H. Traeger, *Einführung in die Fuzzy-Logik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1994.
- [172] *Verordnung (EU) 2018/858 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 und zur Aufhebung der Richtlinie 2007/46/EG (Text von Bedeutung für den EWR.): 2018/858*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32018R0858>
- [173] D. Schröder und M. Buss, *Intelligente Verfahren: Identifikation und Regelung nichtlinearer Systeme*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.
- [174] E. H. Mamdani, „Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant“, *Proc. Inst. Electr. Eng. UK*, Jg. 121, Nr. 12, S. 1585, 1974, doi: 10.1049/piee.1974.0328.
- [175] D. T. Pham und M. Castellani, „Action aggregation and defuzzification in Mamdani-type fuzzy systems“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Jg. 216, Nr. 7, S. 747–759, 2002, doi: 10.1243/09544060260128797.
- [176] K. H. Lee, *First course on fuzzy theory and applications*. Berlin: Springer, 2005.
- [177] H. Unbehauen, *Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme*, 15. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [178] MathWorks, Inc., *Fuzzy Inference Process*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html> (Zugriff am: 13. Februar 2022).
- [179] M. Michel, „Szenarienbasierte Expertenvalidierung eines Systems zur nutzerorientierten Entwicklung autonomer Fahrzeugkonzepte“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [180] M. Viehof und H. Winner, „Stand der Technik und der Wissenschaft: Modellvalidierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation“. Forschungsbericht, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2017.
- [181] M. Landry, J.-L. Malouin und M. Oral, „Model validation in operations research“, *European Journal of Operational Research*, Jg. 14, Nr. 3, S. 207–220, 1983, doi: 10.1016/0377-2217(83)90257-6.
- [182] J. Wyatt und D. Spiegelhalter, „Evaluating medical expert systems: what to test and how?“ (eng), *Medical informatics = Medecine et informatique*, Jg. 15, Nr. 3, S. 205–217, 1990, doi: 10.3109/14639239009025268.
- [183] R. M. O’Keefe und D. E. O’Leary, „Expert system verification and validation: a survey and tutorial“, *Artif Intell Rev*, Jg. 7, Nr. 1, S. 3–42, 1993, doi: 10.1007/BF00849196.
- [184] R. S. Sojda, „Empirical evaluation of decision support systems: Needs, definitions, potential methods, and an example pertaining to waterfowl management“, *Environmental Modelling & Software*, Jg. 22, Nr. 2, S. 269–277, 2007, doi: 10.1016/j.envsoft.2005.07.023.

- [185] C. Y. Suen, P. D. Grogono, R. Shinghal und F. Coallier, „Verifying, validating, and measuring the performance of expert systems“, *Expert Systems with Applications*, Jg. 1, Nr. 2, S. 93–102, 1990, doi: 10.1016/0957-4174(90)90019-Q.
- [186] U. G. Gupta, „Validation and verification of knowledge-based systems: A survey“, *Appl Intell*, Jg. 3, Nr. 4, S. 343–363, 1993, doi: 10.1007/BF00872136.
- [187] R. M. O’Keefe, O. Balci und E. P. Smith, „Validating Expert System Performance“, *IEEE Expert*, Jg. 2, Nr. 4, S. 81–90, 1987, doi: 10.1109/MEX.1987.5006538.
- [188] J. Bortz und C. Schuster, *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*, 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [189] U. Kuckartz, S. Rädiker, T. Ebert und J. Schehl, *Statistik: Eine verständliche Einführung*, 2. Aufl. Wiesbaden: Springer VS, 2013.
- [190] T. L. Saaty und D. Ergu, „When is a Decision-Making Method Trustworthy? Criteria for Evaluating Multi-Criteria Decision-Making Methods“, *Int. J. Info. Tech. Dec. Mak.*, Jg. 14, Nr. 06, S. 1171–1187, 2015, doi: 10.1142/S021962201550025X.
- [191] J. R. Lavoie und T. Daim, „Towards the assessment of technology transfer capabilities: An action research-enhanced HDM model“, *Technology in Society*, Jg. 60, 2020, doi: 10.1016/j.techsoc.2019.101217.
- [192] J. Estep, „Development of a Technology Transfer Score for Evaluating Research Proposals: Case Study of Demand Response Technologies in the Pacific Northwest“, 2000.
- [193] L. Chan, „Developing a Strategic Policy Choice Framework for Technological Innovation: Case of Chinese Pharmaceuticals“, 2000.
- [194] S. Wolff, J. Auernhammer, F. Schockenhoff, C. Angerer und M. Wittmann, „MOBILITY BOX: A DESIGN RESEARCH METHODOLOGY TO EXAMINE PEOPLE’S NEEDS IN RELATION TO AUTONOMOUS VEHICLE DESIGNS AND MOBILITY BUSINESS MODEL“, *Proc. Des. Soc.: Des. Conf.*, Jg. 1, S. 1185–1194, 2020, doi: 10.1017/dsd.2020.285.
- [195] L. Langer, „Ableitung konzeptbestimmender technischer Werte autonomer Fahrzeuge anhand einer Marktanalyse“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [196] M. Bayerlein, „Erarbeitung einer Methode zur Verknüpfung von kundenwerten Eigenschaften und technischen Daten in der Fahrzeugkonzeptentwicklung“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2018.
- [197] M. Raudszus, „Ableitung der funktionalen Anforderungen autonomer Fahrzeugkonzepte anhand ihrer Eigenschaften“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [198] J. Weber, „Ableitung fahrzeugkonzeptbestimmender Eigenschaften autonomer Fahrzeuge“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.
- [199] M. Kuppel, „Methoden zur Objektivierung der kundenwerten Eigenschaften autonomer Fahrzeugkonzepte“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [200] V. Henke, „Kundenwerte Eigenschaften bezüglich Sicherheit im autonomen Fahrzeug“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [201] X. Duan, „Implementierung von Fahrzyklen anhand Fahrstileigenschaften autonomer Fahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2022.

- [202] B. Färber, „Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern“ in *Autonomes Fahren*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 127–146, doi: 10.1007/978-3-662-45854-9\_7.
- [203] M. Clamann, M. Aubert und M. Cummings, „Evaluation of Vehicle-to-Pedestrian Communication Displays for Autonomous Vehicles“, *96th Annual Transportation Research Board Meeting in Washington D.C., USA*, 2017.
- [204] T. Lagström und V. M. Lundgren, „AVIP - Autonomous vehicles´ interaction with pedestrians: An investigation of pedestrian-driver communication and development of a vehicle external interface“. Masterarbeit, Department of Product- and Production Development, Division of Design & Human Factors, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, 2015.
- [205] A. Schieben, M. Wilbrink, C. Kettwich, R. Madigan, T. Louw und N. Merat, „Designing the interaction of automated vehicles with other traffic participants: design considerations based on human needs and expectations“, *Cogn Tech Work*, Jg. 21, Nr. 1, S. 69–85, 2019, doi: 10.1007/s10111-018-0521-z.
- [206] L. Sorokin, R. Chadowitz und N. Kauffmann, „A Change of Perspective“ in *CHI '19: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Glasgow Scotland Uk, 2019, S. 1–8, doi: 10.1145/3290607.3299044.
- [207] J. Zhang, E. Vinkhuyzen und M. Cefkin, „Evaluation of an Autonomous Vehicle External Communication System Concept: A Survey Study“ in *Advances in Intelligent Systems and Computing, Advances in Human Aspects of Transportation*, N. A. Stanton, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 650–661, doi: 10.1007/978-3-319-60441-1\_63.
- [208] M. Schorn, „Modelle zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens“ in *Fahrdynamik-Regelung*, R. Isermann, Hg., Wiesbaden: Vieweg, 2006, S. 27–46, doi: 10.1007/978-3-8348-9049-8\_2.
- [209] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V., *ADAC Autokatalog*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/> (Zugriff am: 16. Februar 2022).
- [210] a2mac1 EUL, *a2mac1: Automotive Benchmarking*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.a2mac1.com>.
- [211] Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG, *auto motor und sport*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/> (Zugriff am: 18. Februar 2022).
- [212] Axel Springer SE, *Auto Bild*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.autobild.de/> (Zugriff am: 18. Februar 2022).
- [213] N. Kano, N. Seraku, F. Takahashi und S. Tsuji, „Attractive Quality and Must-Be Quality“, *Journal of The Japanese Society for Quality Control*, Jg. 14, S. 147–156, 1984.
- [214] E. Sauerwein, *Das Kano-Modell der Kundenzufriedenheit: Reliabilität und Validität einer Methode zur Klassifizierung von Produkteigenschaften*. Zugl.: Innsbruck, Univ., Diss., 1998. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl.; Gabler, 2000.
- [215] C. Berger, R. E. Blauth und D. Boger, „Kano's Methods for Understanding Customer-defined Quality“, *Center for Quality of Management Journal*, Jg. 2, Nr. 4, 1993.
- [216] Kraftfahrt-Bundesamt, *Neuzulassungen nach Herstellern und Handelsnamen (FZ 4)*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz4\\_n\\_uebersicht](https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz4_n_uebersicht) (Zugriff am: 10. März 2022).
- [217] *Surface Vehicle recommended Practice: Motor Vehicle Dimensions*, SAE 1100, Society of Automotive Engineers, 2009.

- [218] Kraftfahrt-Bundesamt, *Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Herstellern und Handelsnamen, Jahr 2020 (FZ 4)*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ4/fz4\\_2020.xlsx;jsessionid=E2527D29D1FE9E2BA2C35B8D1911C170.live21323?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ4/fz4_2020.xlsx;jsessionid=E2527D29D1FE9E2BA2C35B8D1911C170.live21323?__blob=publicationFile&v=3) (Zugriff am: 11. März 2022).
- [219] N. Wassiliadis *et al.*, „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*, 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2022.100167.
- [220] N. Rosenberger *et al.*, „Quantifying the state of the art of electric powertrains in battery electric vehicles: Range, efficiency and lifetime from component to system level of the Tesla Model 3“, *eTransportation*, 2023.
- [221] *Drive Quality Evaluation for Chassis Dynamometer Testing*, SAE J2951, Society of Automotive Engineers, 2014.
- [222] U. Fürbeth, „Schwerpunktlage von Kraftfahrzeugen“, *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (VKU)*, Nr. 3, S. 96–102, 2016.
- [223] B. Schmidt, „Modellaufbau und Validierung“ in *Fachberichte Simulation*, Bd. 6, *Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe: Methoden, Werkzeuge, Anwendungen*, J. Biethahn und B. Schmidt, Hg., Berlin: Springer, 1987, S. 52–60.
- [224] O. Balci, „Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study“, *Ann Oper Res*, Jg. 53, Nr. 1, S. 121–173, 1994, doi: 10.1007/BF02136828.
- [225] M. Rabe, S. Spieckermann und S. Wenzel, *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*, 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. [Online]. Verfügbar unter: [http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?pid=2841628&custom\\_att\\_2=simple\\_viewer](http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?pid=2841628&custom_att_2=simple_viewer)
- [226] G. Sartorius, „Distanz- und Ähnlichkeitsmaße“ in *Erfassen, Verarbeiten und Zuordnen multivariater Messgrößen*, G. Sartorius, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 111–133, doi: 10.1007/978-3-658-23576-5\_8.
- [227] R. McGill, J. W. Tukey und W. A. Larsen, „Variations of Box Plots“, *The American Statistician*, Jg. 32, Nr. 1, S. 12–16, 1978, doi: 10.1080/00031305.1978.10479236.
- [228] *Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements*, ISO 2631-1:1997, International Organization for Standardization, 1997.
- [229] California Department of Motor Vehicles, *Disengagement Reports*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dmv.ca.gov/portal/vehicle-industry-services/autonomous-vehicles/disengagement-reports/> (Zugriff am: 23. Februar 2022).
- [230] S. Eifler, „Experiment“ in *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*, N. Baur und J. Blasius, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 195–209, doi: 10.1007/978-3-531-18939-0\_11.
- [231] H. Nehse, „Fahrdynamische kundenwerte Eigenschaften autonomer Fahrzeugkonzepte“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [232] A. König *et al.*, „CONCEPT DEVELOPMENT PROCESS FOR DOORS OF AUTONOMOUS VEHICLES“, *Proc. Des. Soc.*, Jg. 1, S. 701–710, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.70.
- [233] M. Raudszus, „Nutzerorientierte Untersuchung konzeptbestimmender Eigenschaften autonomer Fahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2022.

- [234] G. Maier und P. Weiss, *Modelle diskreter Entscheidungen: Theorie und Anwendung in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften*. Wien: Springer, 1990.
- [235] R. W. Hall, „Discrete models/continuous models“, *Omega*, Jg. 14, Nr. 3, S. 213–220, 1986, doi: 10.1016/0305-0483(86)90040-X.
- [236] P. I. Barton und C. C. Pantelides, „Modeling of combined discrete/continuous processes“, *AIChE J.*, Jg. 40, Nr. 6, S. 966–979, 1994, doi: 10.1002/aic.690400608.
- [237] 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. 21, 2021, doi: 10.3390/wevj12010021.
- [238] Ö. Turgut, „An Interior Proposal for a Future Shared Autonomous Car within Urban Cities“. Masterarbeit, Industrial Design Engineering, Technische Universität Delft, Delft, 2018.
- [239] J. Y. Kwon und Y. Da Ju, „Spatial Components Guidelines in a Face-to-Face Seating Arrangement for Flexible Layout of Autonomous Vehicles“, *Electronics*, Jg. 10, Nr. 10, S. 1178, 2021, doi: 10.3390/electronics10101178.
- [240] S. Hiemstra-van Mastrigt, „Comfortable Passenger Seats: Recommendations for Design and Research“. Dissertation, Technische Universität Delft, Delft, 2015.
- [241] S. Parida, S. Mallavarapu, S. Abanteriba, M. Franz und W. Gruener, „Seating Postures for Autonomous Driving Secondary Activities“ in *Smart Innovation, Systems and Technologies, Innovation in Medicine and Healthcare Systems, and Multimedia*, Y.-W. Chen, A. Zimmermann, R. J. Howlett und L. C. Jain, Hg., Singapore: Springer Singapore, 2019, S. 423–434, doi: 10.1007/978-981-13-8566-7\_39.
- [242] M. J. Stanglmeier, F. K. Paternoster, S. Paternoster, R. J. Bichler, P.-O. Wagner und A. Schwirtz, „Automated driving: A biomechanical approach for sleeping positions“ (eng), *Applied ergonomics*, Jg. 86, S. 103103, 2020, doi: 10.1016/j.apergo.2020.103103.
- [243] H. Bubb, R. E. Grünen und W. Remlinger, „Anthropometrische Fahrzeuggestaltung“ in *Automobilergonomie*, H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen und M. Vollrath, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 345–470, doi: 10.1007/978-3-8348-2297-0\_7.
- [244] E. H. C. Woo, P. White und C. W. K. Lai, „Ergonomics standards and guidelines for computer workstation design and the impact on users' health - a review“ (eng), *Ergonomics*, Jg. 59, Nr. 3, S. 464–475, 2016, doi: 10.1080/00140139.2015.1076528.
- [245] 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.
- [246] R. Tutzauer, „Softwareintegration bei der Strukturierung und Konzeption eines autonomen Fahrzeuges“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [247] L. Pfeiffer, „Modulare Fahrzykluserstellung anhand Fahrstileigenschaften autonomer Fahrzeuge“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.
- [248] L. Nicoletti, W. Schmid und M. Lienkamp, „Databased Architecture Modeling for Battery Electric Vehicles“ in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2020, S. 1–9, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9242995.

- [249] 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, 2020, S. 1–9, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9242981.
- [250] 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.
- [251] L. Nicoletti, P. Köhler, A. König, M. Heinrich und M. Lienkamp, „PARAMETRIC MODELING 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.
- [252] 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.
- [253] M. Felgenhauer, L. Nicoletti, F. Schockenhoff, C. Angerer und M. Lienkamp, „Empiric Weight Model for the Early Phase of Vehicle Architecture Design“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–8, doi: 10.1109/EVER.2019.8813530.
- [254] 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.
- [255] J. P. Trovao, „New Concepts in Automotive Electronics [Automotive Electronics]“, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Jg. 16, Nr. 2, S. 113–123, 2021, doi: 10.1109/MVT.2021.3065790.
- [256] A. Koch, T. Bürchner, T. Herrmann und M. Lienkamp, „Eco-Driving for Different Electric Powertrain Topologies Considering Motor Efficiency“, *WEVJ*, Jg. 12, Nr. 1, S. 6, 2021, doi: 10.3390/wevj12010006.
- [257] A. Koch, O. Teichert, S. Kalt, A. Ongel und M. Lienkamp, „Powertrain Optimization for Electric Buses under Optimal Energy-Efficient Driving“, *Energies*, Jg. 13, Nr. 23, S. 6451, 2020, doi: 10.3390/en13236451.
- [258] A. Koch, L. Nicoletti, T. Herrmann und M. Lienkamp, „Implementation and Analyses of an Eco-Driving Algorithm for Different Battery Electric Powertrain Topologies Based on a Split Loss Integration Approach“, *Energies*, Jg. 15, Nr. 15, S. 5396, 2022, doi: 10.3390/en15155396.
- [259] X. Duan und F. Schockenhoff, *AV Driving Cycles*. [Online]. Verfügbar unter: [https://github.com/TUMFTM/AV\\_Driving\\_Cycles](https://github.com/TUMFTM/AV_Driving_Cycles) (Zugriff am: 10. Oktober 2022).
- [260] A. König, *AuVeCoDe - Autonomous Vehicle Concept Development*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/AuVeCoDe> (Zugriff am: 10. Oktober 2022).
- [261] 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: 6. Mai 2022).
- [262] A. Koch, *Eco\_Driving\_Toolbox\_for\_BEVs*. [Online]. Verfügbar unter: [https://github.com/TUMFTM/Eco\\_Driving\\_Toolbox\\_for\\_BEVs](https://github.com/TUMFTM/Eco_Driving_Toolbox_for_BEVs) (Zugriff am: 10. Oktober 2022).
- [263] 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.

- [264] W. Dib, A. Chasse, P. Moulin, A. Sciarretta und G. Corde, „Optimal energy management for an electric vehicle in eco-driving applications“, *Control Engineering Practice*, Jg. 29, S. 299–307, 2014, doi: 10.1016/j.conengprac.2014.01.005.
- [265] 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.
- [266] G. Sethuraman, S. S. Reddy Ragavareddy, A. Ongel, M. Lienkamp und P. Raksincharoensak, „Impact Assessment of Autonomous Electric Vehicles in Public Transportation System“ in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference - ITSC*, Auckland, New Zealand, 2019, S. 213–219, doi: 10.1109/ITSC.2019.8917256.
- [267] A. Vahidi und A. Sciarretta, „Energy saving potentials of connected and automated vehicles“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 95, S. 822–843, 2018, doi: 10.1016/j.trc.2018.09.001.
- [268] F. Kronthaler, *Statistik angewandt: Datenanalyse ist (k)eine Kunst Excel Edition*, 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1566010>
- [269] P. Köhler, „Semi-physikalische Modellierung von Antriebsstrangkomponenten für Elektrofahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [270] Magna Powertrain, Engineering Center Steyr, *KULI Software*. [Online]. Verfügbar unter: <https://kuli.magna.com/> (Zugriff am: 11. Mai 2022).
- [271] 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.
- [272] F. Schockenhoff, M. Zähringer, M. Raudszus und D. Fischer, *VASEM: Vehicle concept development for Autonomous, Shared and Electric Mobility*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/VASEM> (Zugriff am: 10. Oktober 2022).
- [273] T. Pesce, „Ein Werkzeug zur Spezifikation von effizienten Antriebstopologien für Elektrofahrzeuge“. Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2014.
- [274] *Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung: 70/200/EWG*, 1970. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31970L0220&from=DE>
- [275] D. Fischer, „Entwicklung einer Benutzeroberfläche zur Konzeption autonomer Fahrzeuge“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [276] S. Altenburg, H.-P. Kienzler und A. auf der Maur, „Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte: Auswirkungen auf Bestand und Sicherheit“, Prognos AG, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.adac.de/-/media/pdf/motorwelt/prognos\\_automatisierungsfunktionen.pdf?la=de-de&hash=4FE03D2842A22A8F900AE176AFCA6887](https://www.adac.de/-/media/pdf/motorwelt/prognos_automatisierungsfunktionen.pdf?la=de-de&hash=4FE03D2842A22A8F900AE176AFCA6887). Zugriff am: 17. Mai 2022.
- [277] S. Hörll, F. Becker, T. Dubernet und K. W. Axhausen, „Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung“, ETH Zürich, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/1401-1500/ab1433.pdf>. Zugriff am: 17. Mai 2022.



- [278] U. Reibnitz, *Szenario-Technik: Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung*, 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1992.
- [279] M. Luccarelli, D. T. Matt, P. R. Spena und M. Lienkamp, *Purpose Design for Electric Cars: Parameters Defining Exterior Vehicle Proportions*. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1226669/1226669.pdf> (Zugriff am: 14. März 2022).
- [280] G. Lu, B. Cheng, Q. Lin und Y. Wang, „Quantitative indicator of homeostatic risk perception in car following“, *Safety Science*, Jg. 50, Nr. 9, S. 1898–1905, 2012, doi: 10.1016/j.ssci.2012.05.007.
- [281] OECD, Hg., *Ageing and Transport: Mobility Needs and Safety Issues*. OECD, 2001.
- [282] *Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte*, DIN 33402-2, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2020.
- [283] S. Vafaei und M. Henny, *Noise Isolation/Cancellation Of Headphones*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rtings.com/headphones/tests/isolation/noise-isolation-cancellation-passive-active> (Zugriff am: 11. März 2022).
- [284] P. Zeller, „Luftschall“ in *ATZ/MTZ-Fachbuch Ser, Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*, P. Zeller, Hg., 2 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2012, S. 116–167, doi: 10.1007/978-3-8348-8657-6\_6.
- [285] J. Wanderer, *Review: Austrian Airlines Economy Class Kurzstrecke*. [Online]. Verfügbar unter: <https://reisetopia.de/reviews/austrian-airlines-economy-class-kurzstrecke/> (Zugriff am: 13. März 2022).
- [286] E. Miller, *Emirates A380 First Class Review – Dubai to Los Angeles*. [Online]. Verfügbar unter: <https://upgradedpoints.com/travel/airlines/emirates-first-class-a380-review/> (Zugriff am: 13. März 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)

- [62] **F. Schockenhoff**, H. Nehse und M. Lienkamp, „Maneuver-Based Objectification of User Comfort Affecting Aspects of Driving Style of Autonomous Vehicle Concepts“, Applied Sciences, Jg. 10, Nr. 11, S. 3946, 2020, doi: 10.3390/app10113946.
- [72] L. Nicoletti, S. Mayer, M. Brönnner, **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.
- [76] 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.
- [125] **F. Schockenhoff**, M. Zähringer, M. Brönnner und M. Lienkamp, „Combining a Genetic Algorithm and a Fuzzy System to Optimize User Centricity in Autonomous Vehicle Concept Development“, Systems, Jg. 9, Nr. 2, S. 25, 2021, doi: 10.3390/systems9020025.
- [245] 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.
- [250] 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.

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

- [31] L. Nicoletti, M. Brönnner, 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, 2020, S. 1–15, doi: 10.1109/EVER48776.2020.9243115.
- [35] **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.

- [60] A. König, **F. Schockenhoff**, A. Koch und M. Lienkamp, „Concept Design Optimization of Autonomous and Electric Vehicles“ in 2019 8th International Conference on Power Science and Engineering (ICPSE), Dublin, Ireland, 2019, S. 44–49, doi: 10.1109/ICPSE49633.2019.9041175.
- [110] **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.
- [157] 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.
- [194] S. Wolff, J. Auernhammer, **F. Schockenhoff**, C. Angerer und M. Wittmann, „MOBILITY BOX: A DESIGN RESEARCH METHODOLOGY TO EXAMINE PEOPLE'S NEEDS IN RELATION TO AUTONOMOUS VEHICLE DESIGNS AND MOBILITY BUSINESS MODEL“, Proc. Des. Soc.: Des. Conf., Jg. 1, S. 1185–1194, 2020, doi: 10.1017/dsd.2020.285.
- [232] 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.
- [253] M. Felgenhauer, L. Nicoletti, **F. Schockenhoff**, C. Angerer und M. Lienkamp, „Empiric Weight Model for the Early Phase of Vehicle Architecture Design“ in 2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–8, doi: 10.1109/EVER.2019.8813530.

## Patente

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

- [32] **F. Schockenhoff**, L. Nicoletti, M. Bayerlein, S. Krapf und M. Lienkamp, Customer-Oriented Concept Assessment. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/345242497\\_Customer-Oriented\\_Concept\\_Assessment](https://www.researchgate.net/publication/345242497_Customer-Oriented_Concept_Assessment) (Zugriff am: 11. November 2021).

### 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

- [34] L. Nicoletti, **F. Schockenhoff** und M. Bayerlein, *COCA Tool - Customer-Oriented Concept Assessment Tool*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/Customer-Oriented-Concept-Assessment-COCA-Tool> (Zugriff am: 10. Oktober 2022).
- [259] X. Duan und **F. Schockenhoff**, *AV Driving Cycles*. [Online]. Verfügbar unter: [https://github.com/TUMFTM/AV\\_Driving\\_Cycles](https://github.com/TUMFTM/AV_Driving_Cycles) (Zugriff am: 10. Oktober 2022).
- [272] **F. Schockenhoff**, M. Zähringer, M. Raudszus und D. Fischer, *VASEM: Vehicle concept development for Autonomous, Shared and Electric Mobility*. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/TUMFTM/VASEM> (Zugriff am: 10. Oktober 2022).

## Betreute Studienarbeiten

- [111] M. Ernster, „Konzeptentwicklung autonomer Fahrzeuge in der Literatur“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.
- [112] M. Zähringer, „Nutzerzentriertes holistisches Framework zur Konzeption autonomer Fahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.
- [126] C.-P. Grunenwald, „Impact of Future Customer Structures on Concept Properties of Autonomous Vehicles“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [127] Serra do Nascimento, Ana Clara, „Strategische Analyse von Szenarien zur Bewertung autonomer Fahrzeugkonzepte“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [128] M. Ponnath, „Identifikation der kundenwertigen Eigenschaften autonomer Fahrzeugkonzepte“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [129] F. Müller, „Neubewertung der Eigenschaften autonomer Fahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [130] L. Kopp, „Specification and Analysis of Properties for the Interior of an Autonomous Vehicle“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [131] C. Barthelme, „Customer-Relevant Properties for Internal Human-Machine Interfaces inside an Autonomous Taxi“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [167] M. Lerma Garro, „Identifikation von Mobilitätsanforderungen und Darstellung ihrer qualitativen Zusammenhänge in der Konzeptentwicklung von autonomen Fahrzeugen“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.

- [179] M. Michel, „Szenarienbasierte Expertenvalidierung eines Systems zur nutzerorientierten Entwicklung autonomer Fahrzeugkonzepte“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [195] L. Langer, „Ableitung konzeptbestimmender technischer Werte autonomer Fahrzeuge anhand einer Marktanalyse“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [196] M. Bayerlein, „Erarbeitung einer Methode zur Verknüpfung von kundenwerten Eigenschaften und technischen Daten in der Fahrzeugkonzeptentwicklung“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2018.
- [197] M. Raudszus, „Ableitung der funktionalen Anforderungen autonomer Fahrzeugkonzepte anhand ihrer Eigenschaften“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [198] J. Weber, „Ableitung fahrzeugkonzeptbestimmender Eigenschaften autonomer Fahrzeuge“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.
- [199] M. Kuppel, „Methoden zur Objektivierung der kundenwerten Eigenschaften autonomer Fahrzeugkonzepte“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [200] V. Henke, „Kundenwerte Eigenschaften bezüglich Sicherheit im autonomen Fahrzeug“. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [201] X. Duan, „Implementierung von Fahrzyklen anhand Fahrstileigenschaften autonomer Fahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2022.
- [231] H. Nehse, „Fahrdynamische kundenwerte Eigenschaften autonomer Fahrzeugkonzepte“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2019.
- [233] M. Raudszus, „Nutzerorientierte Untersuchung konzeptbestimmender Eigenschaften autonomer Fahrzeuge“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2022.
- [246] R. Tutzauer, „Softwareintegration bei der Strukturierung und Konzeption eines autonomen Fahrzeuges“. Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.
- [247] L. Pfeiffer, „Modulare Fahrzykluserstellung anhand Fahrstileigenschaften autonomer Fahrzeuge“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2020.
- [275] D. Fischer, „Entwicklung einer Benutzeroberfläche zur Konzeption autonomer Fahrzeuge“. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München (TUM), München, 2021.

# Anhang

Anhang A	Portfolio der nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnisse.....	xxxiii
Anhang B	Nutzerszenarien.....	xxxv
Anhang C	Portfolio des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes.....	xxxvii
Anhang D	Portfolio der KWE .....	xxxix
Anhang E	Portfolio der TE .....	xliii
Anhang F	Korrelationsfunktionen von KWE zu TE .....	xlvii
Anhang G	Plausibilisierung der Korrelationsfunktionen von KWE zu TE .....	li
Anhang H	Portfolio der Auslegungsparameter .....	lv





# Anhang A Portfolio der nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnisse

Die nachfolgende Tabelle definiert die im Kontext dieser Arbeit verwendeten Variablen der nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnisse in alphabetischer Reihenfolge.

Tabelle A.1 Portfolio der nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnisse

nutzerzentrierten Mobilitätsbedürfnisse	Beschreibung
Arbeiten	Arbeiten ist eine Sekundärtätigkeit, bei der die Insassen beruflicher/ studentischer/ schulischer Aufgaben nachgehen können. Der Innenraum hat einen vergleichbaren Nutzen, wie ein Büroraum in einem Gebäude.
Autobahnfahrten	Der Anteil der Mobilitätszeit, die auf Autobahnen verbracht wird.
Beladung	Die Beladung, die neben den anderen Sekundärtätigkeit während der Fahrt als Gepäck mitgeführt oder die in Form eines Warentransportes bewegt werden soll. Bei ersterem ist der benötigte Innenraum demnach mit einem heutigen Kofferraum und bei zweiterem mit einem konventionellen Transporter vergleichbar.
Bereitschaft für MaaS	Die Bereitschaft des Nutzers für Mobiliy-as-a-Service (MaaS). Eine große Bereitschaft spricht für Ridesharing-Shuttle, eine mittlere Bereitschaft für Carsharing-Taxis und eine geringe Bereitschaft für Privatfahrzeuge.
Entspannen	Entspannen ist eine Sekundärtätigkeit, bei der die Insassen keiner anspruchsvollen Aufgaben nachkommen, sondern sich dem Entspannen widmen. Der Innenraum hat einen vergleichbaren Nutzen, wie das Wohnzimmer in einem Gebäude.
Generelles Mobilitätsbedürfnis	Das generelle Mobilitätsverhalten der Nutzer beinhaltet die Nutzungszeit von Mobilität.
Investitionsbereitschaft	Die verhältnismäßige Bereitschaft des Nutzers einen gewissen Geldbetrag für das Mobilitätsbedürfnis auszugeben.
Passagiere für Arbeiten	Die Gesamtzahl der Passagiere, die bei der Sekundärtätigkeit Arbeiten mit im Fahrzeugen sein sollen/ können.
Passagiere für Entspannen	Die Gesamtzahl der Passagiere, die bei der Sekundärtätigkeit Entspannen mit im Fahrzeugen sein sollen/ können.
Passagiere für Schlafen	Die Gesamtzahl der Passagiere, die bei der Sekundärtätigkeit Schlafen mit im Fahrzeugen sein sollen/ können.
Passagiere für Selbstfahren	Die Gesamtzahl der Passagiere, die bei der Sekundärtätigkeit Selbstfahren mit im Fahrzeugen sein sollen/ können.

nutzerzentrierten Mo- bilitätsbedürfnisse	Beschreibung
Passagiere für Selbstfahren	Die Gesamtzahl der Passagiere, die bei der Sekundärtätigkeit Selbstfahren mit im Fahrzeugen sein sollen/ können.
Schlafen	Schlafen ist eine Sekundärtätigkeit, bei der die Insassen sich ausruhen oder schlafen können. Der Innenraum hat einen vergleichbaren Nutzen, wie das Schlafzimmer in einem Gebäude.
(menschliches) Selbstfahren	Selbstfahren ist eine Sekundärtätigkeit, bei der ein Insasse als Fahrer des Fahrzeugs fungieren kann. Der Innenraum hat einen vergleichbaren Nutzen, wie bei heutigen konventionellen Fahrzeugen.
Sicherheitsbedürfnis	Der Grad der Anforderungen des Mobilitätsnutzers bezüglich der subjektiven/ gefühlten Sicherheit der Fahrt. Dies inkludiert Sicherheit gegenüber potenziellen Überfällen oder Angriffen (physisch oder digital).
Städtische Fahrten	Der Anteil der Mobilitätszeit, die städtisch verbracht wird.
Überlandfahrten	Der Anteil der Mobilitätszeit, die auf Überlandstraßen verbracht wird.

# Anhang B Nutzerszenarien

## Familie

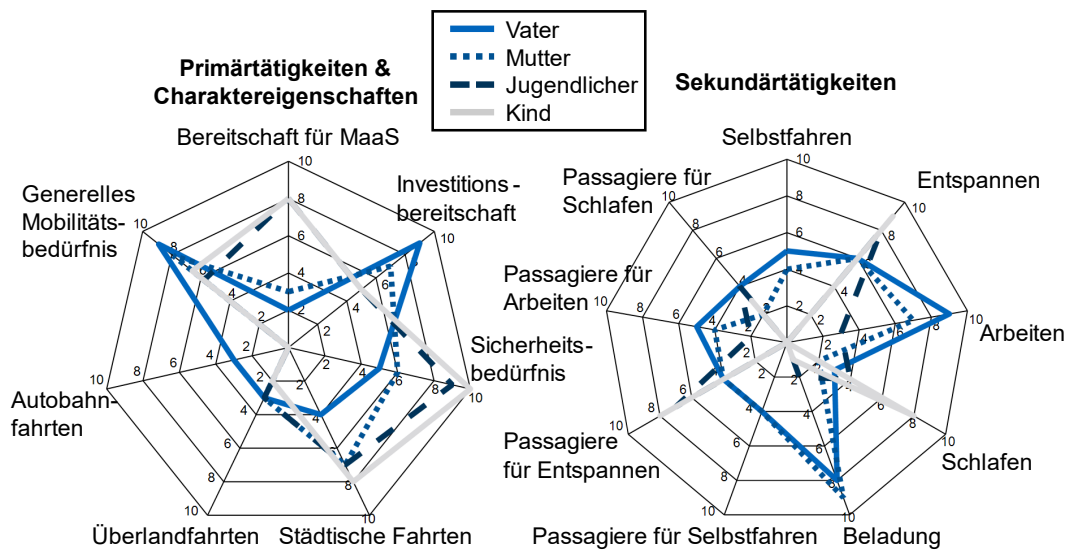


Abbildung B.1: Nutzerszenario Familie nach [127]

## Alltag

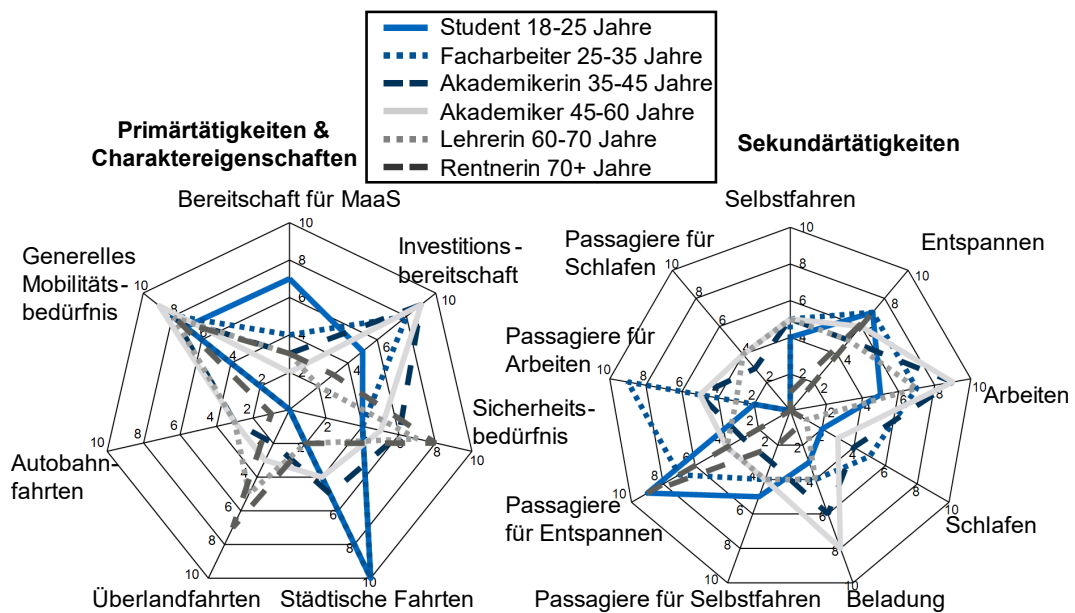


Abbildung B.2: Nutzerszenario Alltag nach [127]

# Pendler

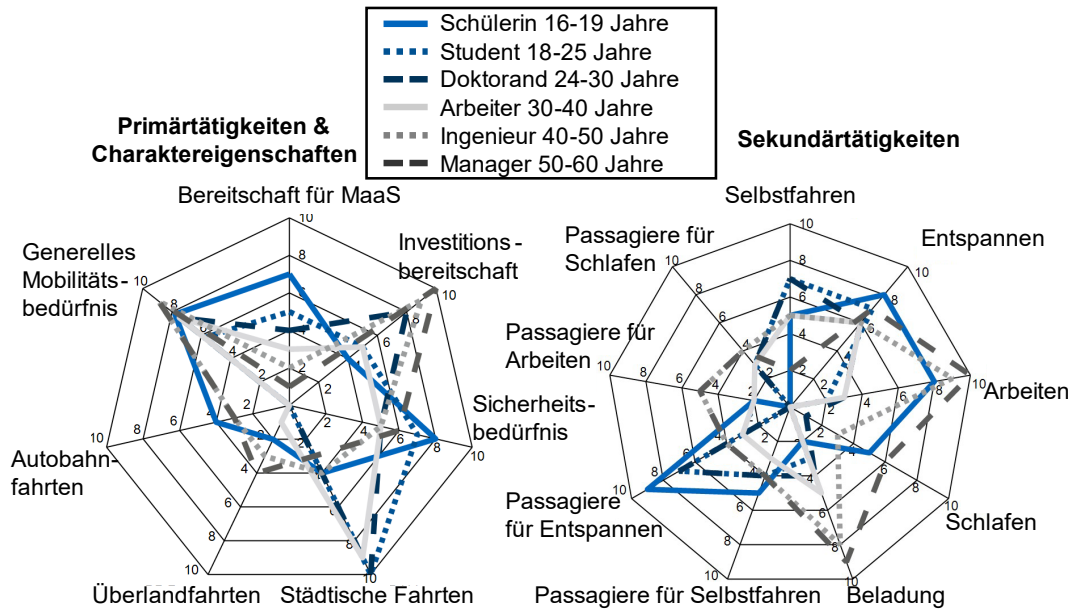


Abbildung B.3: Nutzerszenario Pendler nach [127]

# Anhang C Portfolio des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes

Die nachfolgende Tabelle definiert die im Kontext dieser Arbeit verwendeten Variablen des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes in alphabetischer Reihenfolge.

Tabelle C.1 Portfolio des fahrzeuggebundenen Mobilitätsangebotes

fahrzeuggebundenes Mobilitätsangebot	Beschreibung
Arbeiten	Arbeiten ist eine Sekundärtätigkeit, bei der die Insassen beruflicher/ studentischer/ schulischer Aufgaben nachgehen können. Der Innenraum hat einen vergleichbaren Nutzen, wie ein Büroraum in einem Gebäude. Ein Derivat ist auf spezifische Sekundärtätigkeiten ausgelegt, die das Derivat definieren, wie es heutzutage die Karosseriebauform macht. Dies kann bedeuten, dass es zu 100 % eine Sekundärtätigkeit oder zu Anteilen verschiedenen Sekundärtätigkeiten ermöglicht.
Autobahnfahrten	Der Anteil der Fahrzeit, die auf Autobahnen verbracht wird.
Beladung	Beladung ist ein Sonderfall als Sekundärtätigkeit. Bis zu einer Ausprägung von 50 % gilt sie nicht als Sekundärtätigkeit, weil Gepäck bei den anderen Sekundärtätigkeiten Platz findet. Ab einem höheren Wert dient das Fahrzeug hauptsächlich dem Transport von Beladung, weshalb die Beladung als Sekundärtätigkeit gesehen werden muss. Der Innenraum ist demnach mit einem heutigen konventionellen Transporter vergleichbar. Ein Derivat ist auf spezifische Sekundärtätigkeiten ausgelegt, die das Derivat definieren, wie es heutzutage die Karosseriebauform macht. Dies kann bedeuten, dass es zu 100 % eine Sekundärtätigkeit oder zu Anteilen verschiedenen Sekundärtätigkeiten ermöglicht.
Entspannen	Entspannen ist eine Sekundärtätigkeit, bei der die Insassen keiner anspruchsvollen Aufgaben nachkommen, sondern sich dem Entspannen widmen. Der Innenraum hat einen vergleichbaren Nutzen, wie das Wohnzimmer in einem Gebäude. Ein Derivat ist auf spezifische Sekundärtätigkeiten ausgelegt, die das Derivat definieren, wie es heutzutage die Karosseriebauform macht. Dies kann bedeuten, dass es zu 100 % eine Sekundärtätigkeit oder zu Anteilen verschiedenen Sekundärtätigkeiten ermöglicht.
Fahrzeugtyp	Der Fahrzeugtyp definiert die Nutzungsverhältnisse des Fahrzeugs. Ein Privatfahrzeug gehört einer Privatperson, die das Fahrzeug für ihre privaten Mobilitätsbedürfnisse nutzt. Ein Taxi ist ein Carsharingfahrzeug, das nicht im Besitz des Nutzers ist und von diesem für die spezifische Fahrt gebucht wird. Im Gegensatz zum Produkt Fahrzeug, wird die Fahrt aber nicht mit Fremden Personen geteilt. Ein Shuttle ist ein Ridesharing Fahrzeug, das für die spezifische Fahrt gebucht wird. Nicht nur das Produkt Fahrzeug, sondern auch diese Fahrt wird mit Fremden Personen geteilt.

fahrzeuggebundenes Mobilitätsangebot	Beschreibung
Generelles Mobilitätsbedürfnis	Das generelle Mobilitätsverhalten der Nutzer beinhaltet die Nutzungszeit des Fahrzeugs.
Investitionsbereit- schaft	Die verhältnismäßige Bereitschaft des Nutzers einen gewissen Geldbetrag für das Fahrzeug oder die Dienstleistung auszugeben.
Mitfahrer	Die gewünschte Anzahl an Personen, die sich während der Fahrt im Fahrzeug befinden und die entsprechenden Sekundärtätigkeiten ausführen können.
Schlafen	Schlafen ist eine Sekundärtätigkeit, bei der die Insassen sich ausruhen oder schlafen können. Der Innenraum hat einen vergleichbaren Nutzen, wie das Schlafzimmer in einem Gebäude. Ein Derivat ist auf spezifische Sekundärtätigkeiten ausgelegt, die das Derivat definieren, wie es heutzutage die Karosseriebauform macht. Dies kann bedeuten, dass es zu 100 % eine Sekundärtätigkeit oder zu Anteilen verschiedenen Sekundärtätigkeiten ermöglicht.
(menschliches) Selbstfahren	Selbstfahren ist eine Sekundärtätigkeit, bei der ein Insasse als Fahrer des Fahrzeugs fungieren kann. Der Innenraum hat einen vergleichbaren Nutzen, wie bei heutigen konventionellen Fahrzeugen. Ein Derivat ist auf spezifische Sekundärtätigkeiten ausgelegt, die das Derivat definieren, wie es heutzutage die Karosseriebauform macht. Dies kann bedeuten, dass es zu 100 % eine Sekundärtätigkeit oder zu Anteilen verschiedenen Sekundärtätigkeiten ermöglicht.
Sicherheitsbedürfnis	Der Grad der Anforderungen des Fahrzeugnutzers bezüglich der subjektiven/gefühlten Sicherheit der Fahrt an sich und des Fahrzeugs. Dies inkludiert Sicherheit gegenüber potenziellen Überfällen oder Angriffen (physisch oder digital).
Städtische Fahrten	Der Anteil der Fahrzeit, die städtisch verbracht wird.
Überlandfahrten	Der Anteil der Fahrzeit, die auf Überlandstraßen verbracht wird.

# Anhang D Portfolio der KWE

Die nachfolgende Tabelle definiert die im Kontext dieser Arbeit verwendeten KWE in alphabetischer Reihenfolge.

Tabelle D.1 Portfolio der kundenwerteten Eigenschaften

KWE	Beschreibung
Aktive Sicherheit	Beinhaltet alle Maßnahmen zur Vermeidung eines Unfalls. Je höher die Ausprägung der aktiven Sicherheit, desto höher die Zuverlässigkeit und der potenzielle Anwendungsbereich (z.B. für höhere Geschwindigkeiten).
Akustik im Innenraum	Entsteht durch Nebenaggregate oder andere Lärmquellen. Kann durch passive Dämmung des Fahrzeugs und aktive Geräuschunterdrückung beeinflusst werden.
Beinfreiheit	Definiert den Raum für Bewegungen der Beine.
Bewegungsradius	Fahrstrecke, die das Fahrzeug ohne Ladevorgang zurückgelegt kann.
Boardingkomfort	Misst den Komfort beim Betreten und Verlassen des Fahrzeugs. Hoher Boardingkomfort kann z.B. durch Anordnung der Türen und aus ergonomischer Sicht angenehme Höhenmaße erreicht werden.
Boardingzeit	Die Boardingzeit wird besonders durch die Anzahl der Türen beeinflusst. So ist die Boardingzeit bei einem Stadtbus (viele Türen) kürzer als bei einem Flugzeug (verhältnismäßig wenig Türen).
Built-In Infotainment	Sämtliche vorhandene Hardware und Software (Apps), die zu Informations- und Unterhaltungszwecken genutzt werden kann.
Erkennung Fahrzeuginnenraum	Überwachung des Innenraums zur Erkennung von medizinischen Notfällen und Fehlverhalten von Insassen bis hin zum Stehenlassen von Koffern durch das Fahrzeug, um Maßnahmen einzuleiten.
Exterieur-Design	Erscheinungsbild und Form des Fahrzeugs. Kann nur von außen wahrgenommen werden.
Externe Kommunikation	Fahrzeug kommuniziert mit anderen Verkehrsteilnehmern wie z.B. Fußgängern und trägt zur eigenen Sicherheit und der der anderen Verkehrsteilnehmer bei. Alle technisch möglichen Arten der Umsetzung denkbar.
Fahrstil	Die Verantwortung über den Fahrstil liegt beim System. Je nach Fahrzeug, Nutzen, Passagieren usw. sind unterschiedliche Fahrstile erwünscht. Im Rahmen dieser Befragung werden Fahrstile mit folgenden Schwerpunkten betrachtet: Komfort, subjektive Sicherheit, Reisezeitpotential und geringer Fahrverbrauch.

KWE	Beschreibung
Fahrverbrauch (Fahrstil)	Siehe auch Definition für „Fahrstil“. Der Fahrstil des autonomen Fahrzeugkonzeptes kann auf verbrauchsarmes Fahren ausgelegt sein.
Gepäckmenge	Die Menge an möglichen Gütern/ Gepäck, die ein Fahrzeug transportieren kann. Es muss sich jedoch nicht zwingend um einen klassischen Kofferraum handeln. Ein autonomes Fahrzeug könnte beispielsweise ausschließlich für den Gepäcktransport entwickelt werden.
Infotainment Individualisierung	Individualisierbarkeit des vorhandenen Infotainmentangebots.
Komfort (Fahrstil)	Siehe auch Definition für „Fahrstil“. Der Fahrstil des autonomen Fahrzeugderivats kann auf eine komfortable Fahrt ausgelegt sein.
Kopffreiheit	Raum zwischen Hüftpunkt und der Innenverkleidung des Fahrzeugs in vertikaler Richtung. ist definiert, wie groß Insassen sein können und wie viel Platz zwischen deren Kopf und der Innenraumverkleidung verbleibt.
Längsdynamik	Kräfte in Fahrzeuglängsrichtung zum Überwinden von Fahrtwiderständen. Diese haben unter anderem Auswirkungen auf Beschleunigung und Geschwindigkeitspotential.
Ökologie	Der ökologische Fußabdruck des Produktes „Fahrzeugkonzept“ umfasst alle umweltschädlichen Emissionen, die im in Herstellung und Verwertung entstehen, sowie den Verbrauch natürlicher Ressourcen. Der Betrieb des Fahrzeugs ist im Fahrverbrauch berücksichtigt, sodass insgesamt der gesamte Lebenszyklus abgedeckt ist.
Ökonomie	Ökonomie bezieht sich auf Anschaffungskosten und laufende Kosten. Der Betrieb ist durch den Fahrverbrauch abgedeckt.
Passive Sicherheit	Beinhaltet alle Maßnahmen zur Linderung der Auswirkungen eines Unfalls.
Qualität der Automation	Die Qualität der Automation bezieht sich auf die automatisierte Fahrfunktion und deren Güte. Insbesondere die Anzahl an unnötigen Stopps der Automation (false positives) ist ein Gütekriterium, weil es aus gesetzlichen Anforderungen heraus, Fahrszenarien, die zu Unfällen führen könnten (false negatives), gegen Null gehen müssen.
Querdynamik	Kräfte und Beschleunigungen in Querrichtung, um Richtungsänderungen des Fahrzeugs zu bewirken.
Reisezeitpotential (Fahrstil)	Siehe auch Definition für „Fahrstil“. Der Fahrstil des autonomen Fahrzeugderivats kann auf eine möglichst schnelle Fahrt mit kurzer Fahrdauer ausgelegt sein.
Schlechtwegefähigkeit	Die Schlechtwegefähigkeit ist die Fähigkeit des Fahrzeugkonzeptes sich auf unterschiedlichem, schlechter werdendem Untergrund fortbewegen zu können.
Schulterfreiheit	Raum zwischen der Schulter und der seitlichen Begrenzung des Fahrzeuginnenraums.



---

KWE	Beschreibung
Subjektive Sicherheit (Fahrstil)	Siehe auch Definition für „Fahrstil“. Der Fahrstil des autonomen Fahrzeugderivats kann auf maximale Sicherheit während der Fahrt ausgelegt sein.
Vertikaldynamik	Die Vertikaldynamik bezieht sich auf Beschleunigungen in vertikaler Richtung des Innenraumes, die einen großen Einfluss auf den Fahrkomfort der Insassen haben.
Wendefähigkeit	Eine hohe Ausprägung der Wendefähigkeit ermöglicht das Wenden des Fahrzeugkonzeptes auf möglichst geringer Fläche.



# Anhang E Portfolio der TE

Die nachfolgende Tabelle ordnet den TE die KWE, aus der sie hervorgeht, zu und definiert die TE. Die Tabelle ist alphabetisch nach den KWE geordnet:

Tabelle E.1 Portfolio der technischen Eigenschaften

KWE	TE	Beschreibung
Aktive Sicherheit	Beschleunigungszeit für Elastizität 60 - 100 km/h	Die Fahrdynamische Fähigkeit einem Unfall durch Beschleunigung zu entgehen, die durch die benötigte Zeit für die Beschleunigung von 60 - 100 km/h gemessen wird
Akustik im Innenraum	Schalldruckpegel bei 100 km/h	Gemittelter Schalldruckpegel bei einer Fahrt mit 100 km/h mit der Möglichkeit der aktiven Geräuscherdrückungstechnologie für den Innenraum
Beinfreiheit	Beinfreiheit L53	Innenraummaß L53 nach SAE J1100 [217]
Bewegungsradius	Reichweite (WLTP)	Die maximale Distanz, die ein Fahrzeug mit einem vollen Energiespeicher im WLTP zurücklegen kann
Boardingkomfort	Lichte Höhe H11	Innenraummaß H11 nach SAE J1100 [217]
	Tritthöhe H130	Innenraummaß H130 nach SAE J1100 [217]
Boardingzeit	Türbreite pro Sitzplatz	Gesamtboardingzeit für alle Passagiere hängt von der kumulierten Breite aller Türen des Fahrzeugs und der maximalen Anzahl an Passagieren ab.
Built-In Infotainment	Bildschirmfläche/Sitzplatz	Die pro Sitzplatz zur Verfügung stehende Bildschirmfläche. Diese kann durch private oder Gruppenbildschirme bereitgestellt werden.
Erkennung Fahrzeuginnenraum	-	Mit dem heutigen Forschungsstand ist keine TE eindeutig für diese KWE geeignet. Es bedarf disziplinspezifische Forschung, um dies in Zukunft zu ermöglichen.
Exterieur-Design	Raddurchmesser	Der Durchmesser der Räder ist maßgeblich für das Exterieur-Design [279]
Externe Kommunikation	-	Mit dem heutigen Forschungsstand ist keine TE eindeutig für diese KWE geeignet. Es bedarf disziplinspezifische Forschung, um dies in Zukunft zu ermöglichen.
Fahrkomfort (Fahrstil)	Max. Beschleunigung	Das quadratische Mittel des Längsbeschleunigungswerte nach ISO 2631-1:1997 [228]
	Max. Ruck	Das quadratische Mittel des Längsruckwerte nach ISO 2631-1:1997 [228]

KWE	TE	Beschreibung
Fahrverbrauch (Fahrstil)	Verbrauch	Der Verbrauch des Fahrzeugs in kWh/100 km
Gepäckmenge	Stauvolumen Personenfahrzeuge	Das Stauvolumen, das ein Fahrzeug, das für den Personentransport konzipiert ist, mitnehmen kann.
	Stauvolumen Gütertransport	Das Stauvolumen, das ein Fahrzeug, das für den Gütertransport konzipiert ist, mitnehmen kann.
Infotainment Individualisierung	-	Mit dem heutigen Forschungsstand ist keine TE eindeutig für diese KWE geeignet. Es bedarf disziplinspezifische Forschung, um dies in Zukunft zu ermöglichen.
Kopffreiheit	Effektive Kopffreiheit H61	Innenraummaß H61 nach SAE J1100 [217]
Längsdynamik	Höchstgeschwindigkeit	Die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs
	Beschleunigungszeit 0 - 100 km/h	Die Zeit in Sekunden, die das Fahrzeug benötigt, um von 0 km/h auf 100 km/h zu beschleunigen
Ökologie	Emissionen der Batterieherstellung	Die Emissionen in der Herstellung hängen maßgeblich von der Batterie ab, weshalb deren Herstellungsemissionen die Ökologie prägen. Die Emissionen im Betrieb sind im Verbrauch abgebildet.
Ökonomie	Anschaffungskosten	Die Anschaffungskosten des Fahrzeugs unter Berücksichtigung der Kosten der Sensorik
Passive Sicherheit	Crashlänge Front-Pedal	Die vordere Crashlänge von der Front bis zum Pedal (Insassen) der konventionellen Fahrzeuge
Personen (Fahrzeuggebundenes Mobilitätsangebot)	Anzahl Sitzplätze	Sitzplätze nach M1-Zulassung in Verordnung (EU) 2018/858 [172]
Qualität der Automation	Krit. Fahrereignisse pro 100.000 km	Die Anzahl der kritischen Fahrereignisse pro 100.000 km
Querdynamik	Schwerpunkthöhe	Die Höhe des Schwerpunktes beeinflusst die Querdynamik des Fahrzeugs maßgeblich.
Reisezeitpotential (Fahrstil)	Schnelligkeit	Das Verhältnis der gefahrenen Durchschnittsgeschwindigkeit zur zugelassenen Höchstgeschwindigkeit. Je kleiner der Wert desto schneller ist der Fahrstil.
Schlechtwegefähigkeit	Bodenfreiheit	Exterieurmaß H156 nach SAE J1100 [217]
Schulterfreiheit	Schulterfreiheit W3/Sitzplatz	Innenraummaß W3 nach SAE J1100 [217] normiert auf die Sitzplätze je Sitzreihe

---

KWE	TE	Beschreibung
Subjektive Sicherheit (Fahrstil)	homöostatische Risikowahrnehmung	homöostatische Risikowahrnehmung nach [280], der die eigene Geschwindigkeit und Beschleunigung, die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Vorderfahrzeugs sowie den Abstand zum Vorderfahrzeug beinhaltet.
Vertikaldynamik	Aufbaubeschleunigung	Aufbaubeschleunigung nach ISO 2631-1:1997 [228]
Wendefähigkeit	Wendekreis	Der minimale Kreis, den das Fahrzeug fahren kann



# Anhang F Korrelationsfunktionen von KWE zu TE

Datenbasierte Korrelation:

$$d(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\pm(x - \mu)}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right] (OG - UG) + UG \quad (\text{F.1})$$

Grenzwertbasierte Korrelation:

$$g(x) = \frac{OG - UG}{1 + e^{-k(x-x_0)}} + UG \quad (\text{F.2})$$

Lineare Korrelation:

$$l(x) = A x + B \quad (\text{F.3})$$

Tabelle F.1 Korrelationsfunktionen KWE zu TE

TE	Funktion	OG	UG	$\mu/x_0/A$	$\sigma/k/B$	$\pm$
<b>Fahrdynamik</b>						
Höchstgeschwindigkeit	$d(x)$	10	4	202,64	29,061	+
Beschleunigungszeit 0- 100 km/h	$d(x)$	10	4	8,6579	2,4572	-
Schwerpunkthöhe	$d(x)$	10	4	649,35	57,610	-
Aufbaubeschleunigung	$g(x)$	10	4	0,8061	-8,3022	-
Wendekreis	$d(x)$	10	4	10,4371	1,1596	-
<b>Ergonomie</b>						
Tritthöhe	$g(x)$	10	4	464,084	-0,0186	-
Lichte Höhe	$g(x)$	10	4	1207,3	0,0058	+
Türbreite/Sitzplätze	$g(x)$	10	4	576,19	0,0071	+
Beinfreiheit L53	$d(x)$	10	4	684,12	183,20	+
Schulterfreiheit W3/Sitzplatz	$d(x)$	10	4	511,54	66,400	+
Effektive Kopffreiheit H61	$d(x)$	10	4	984,83	30,395	+
Schallpegel bei 100 km/h	$g(x)$	10	4	62,83	-0,1971	-

TE	Funktion	OG	UG	$\mu/x_0/ A$	$\sigma/k/ B$	$\pm$
<b>Sicherheit</b>						
Crashlänge	$g(x)$	10	4	630,67	0,0105	+
Krit. Fahrereignisse pro 100.000 km	$g(x)$	10	4	32,246	-0,1316	-
Beschleunigungszeit für Elastizität 60-100 km/h	$d(x)$	10	4	4,7962	1,4933	-
<b>Alltagstauglichkeit</b>						
Bodenfreiheit	$d(x)$	10	4	157,07	33,050	+
Stauvolumen Personenfahrzeuge	$d(x)$	10	4	450,38	142,46	+
Stauvolumen Gütertransport	$g(x)$	10	4	5709	0,000851	+
Reichweite (WLTP)	$d(x)$	10	4	365,54	121,56	+
Anschaffungskosten	$d(x)$	10	4	38820	19142	-
Emissionen der Batterieherstellung	$d(x)$	10	4	5,1433	2,1628	-
Anzahl Sitzplätze	$g(x)$	10	4	3,264	0,7109	+
<b>Fahrstil</b>						
Max. Ruck	$d(x)$	10	4	0,8438	0,3890	-
Max. Beschleunigung	$d(x)$	10	4	0,3365	0,2160	-
homöostatische Risikowahrnehmung	$d(x)$	10	4	0,8617	0,1148	+
Schnelligkeit	$l(x)$	-	-	-30	67	-
Verbrauch	$d(x)$	10	4	17,172	2,7314	-
<b>Luxus</b>						
Bildschirmfläche/Sitzplatz	$g(x)$	10	4	569,59	0,0028	+
Raddurchmesser	$d(x)$	10	4	660,51	42,258	+

Für die Herleitung und weitere Informationen sei auf [195, 197, 201] verwiesen.



Die Daten für die grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen entstammen den in der nachfolgenden Tabelle angegebenen Quellen:

Tabelle F.2: Quellen und Analogien der grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen

TE	Analogie	Quelle
Aufbaubeschleunigung	-	ISO 2631-1:1997 [228]
Tritthöhe	-	A2mac1 [210]
Lichte Höhe	-	OEDC [281, S. 70] und DIN 33402-2:2020 [282]
Türrbreiten/Sitzplatz	-	A2mac1 [210]
Schalldruckpegel bei 100 km/h	Konventionelle Fahrzeuge und aktiver Geräuschunterdrückungstechnik	AMS [211] und [283, 284, S. 163-166]
Crashlänge Front-Pedal	-	A2mac1 [210]
kritische Fahrereignisse	Erprobung autonome Fahrfunktion (mind. 20.000 km)	Disengagement Reports 2021 [229]
Stauvolumen Gütertransport	Nutzfahrzeuge	ADAC [209]
Anzahl Sitzplätze	Zulassung M1	Verordnung (EU) 2018/858 [172]
Bildschirmfläche/Sitzplatz	Economy Kurzstrecke und First Class Langstrecke	Reviews [285, 286]



# Anhang G Plausibilisierung der Korrelationsfunktionen von KWE zu TE

## Datenbasierte Korrelationsfunktionen

Max. Abweichung der TE:

$$\Delta TE = \left| \frac{y_{limit} - y_{data}}{y_{data}} \right| \quad (G.1)$$

Max. Abweichung der KWE:

$$\Delta KWE = \left| \frac{x_{limit} - x_{data}}{x_{data}} \right| \quad (G.2)$$

Abweichung der Steigung im Wendepunkt:

$$\Delta S = \left| \frac{s_{limit} - s_{data}}{s_{data}} \right| \quad (G.3)$$

Tabelle G.1 Plausibilisierung der datenbasierten Korrelationsfunktionen von KWE zu TE

KWE	TE	$\Delta TE$	$\Delta KWE$	$\Delta S$
<b>Fahrdynamik</b>				
Längsdynamik	Höchstgeschwindigkeit	4,3%	7,9%	0,5%
Längsdynamik	Beschleunigungszeit 0 - 100 km/h	19,0%	28,7%	6,0%
Querdynamik	Schwerpunkthöhe	6,3%	22,4%	36,4%
Wendefähigkeit	Wendekreis	20,2%	61,5%	79,6%
<b>Ergonomie</b>				
Beinfreiheit	Beinfreiheit L53	20,2%	30,6%	37,7%
Schulterfreiheit	Schulterfreiheit W3/Sitzplatz	6,6%	9,6%	16,8%
Kopffreiheit	Effektive Kopffreiheit H61	2,7%	33,3%	9,1%

KWE	TE	$\Delta TE$	$\Delta KWE$	$\Delta S$
<b>Sicherheit</b>				
Aktive Sicherheit	Beschleunigungszeit für Elastizität 60 - 100 km/h	11,0%	14,9%	1,0%
<b>Alltagstauglichkeit</b>				
Schlechtwegefähigkeit	Bodenfreiheit	21,7%	28,5%	3,5%
Gepäckmenge	Stauvolumen Pkw	15,0%	20,0%	16,0%
Bewegungsradius	Reichweite (WLTP)	46,3%	35,3%	0,2%
Ökonomie	Anschaffungskosten	103,0%	92,3%	31,4%
Ökologie	Emissionen der Batterieherstellung	31,9%	40,0%	1,0%
<b>Fahrstil</b>				
Fahrkomfort (Fahrstil)	Max. Ruck	106,1%	45,9%	37,8%
Fahrkomfort (Fahrstil)	Max. Beschleunigung	198,7%	39,1%	57,5%
Fahrverbrauch (Fahrstil)	Verbrauch	40,9%	93,5%	27,0%
<b>Luxus</b>				
Exterieur-Design	Raddurchmesser	1,3%	4,6%	18,9%

Die Korrelationsfunktion zwischen der KWE „subjektive Sicherheit des Fahrstils“ und der TE „homöostatische Risikowahrnehmung“ ist aus der Literatur [280] entnommen. Lu et al. [280] führen eine statistische Analyse der Fahrdaten durch, weshalb diese Korrelation durch deren Vorgehen als plausibel angenommen werden kann.

## Grenzwertbasierte Korrelationsfunktionen

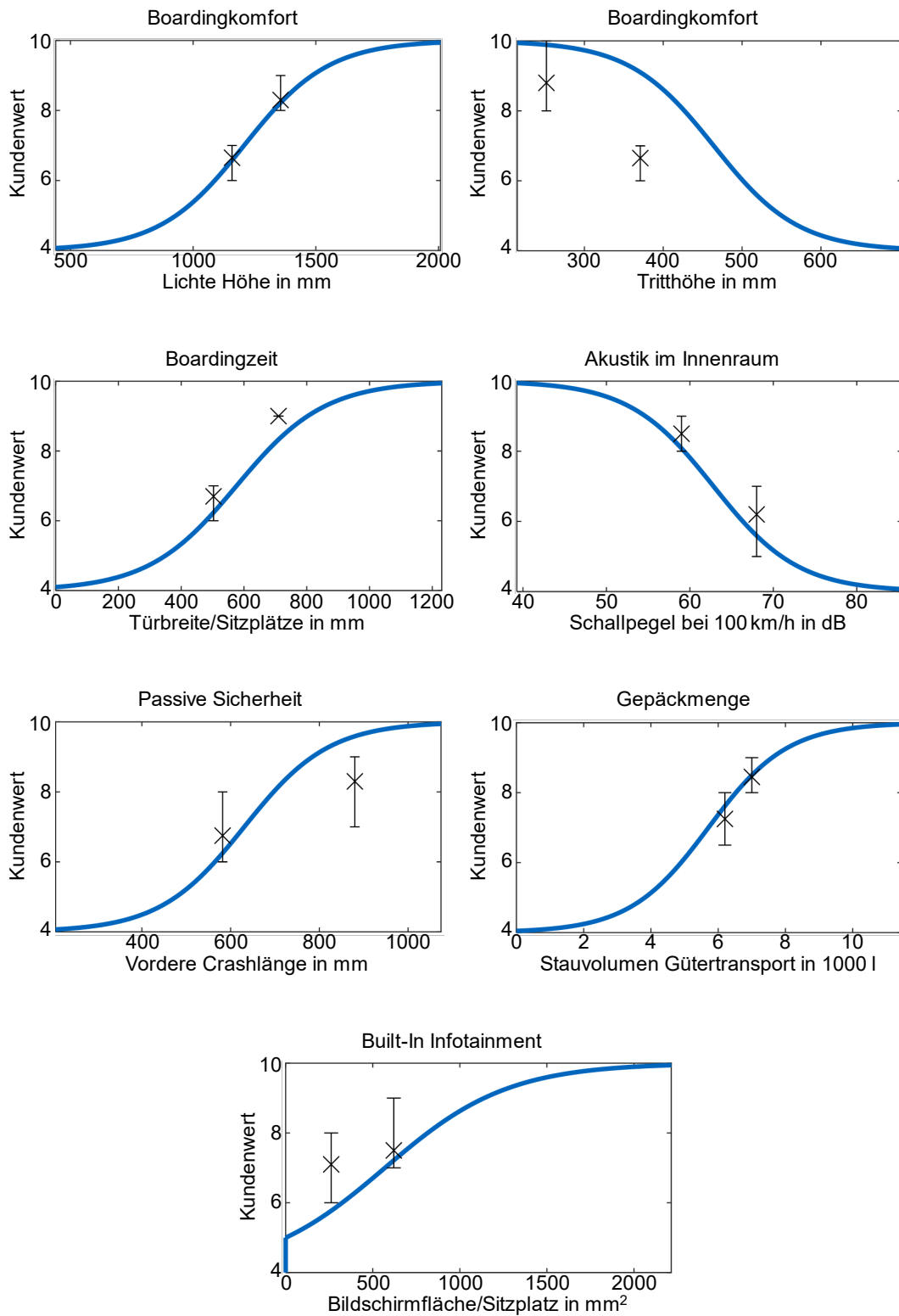


Abbildung G.1: Plausibilisierung der grenzwertbasierten Korrelationsfunktionen



# Anhang H Portfolio der Auslegungsparameter

Die nachfolgenden Tabellen stellen die verwendeten Auslegungsparameter vor. Sie gliedern sich dabei in Schlüsseltopologien und Schlüsselkomponententechnologien, Innenraum sowie Komponenten und berufen sich zu einem Großteil auf KÖNIGS Portfolio [24, S. xxxiii-xxxv]. Zur näheren Erklärung sei auf KÖNIG verwiesen.

Tabelle H.1 Schlüsseltopologien und Schlüsselkomponententechnologien

Auslegungsparameter	
Innenraumtopologie	Achsentyp
Antriebsstrangtopologie	Batteriezelltyp
elektrische Maschinentyp	

Tabelle H.2 Innenraum

Allgemeine Auslegungsparameter	
Anzahl der Sitzreihen	Sitze dritte Sitzreihe
Sitze erste Sitzreihe	Beinüberlappung der Sitzreihen
Sitze zweite Sitzreihe	

Auslegungsparameter je Sitzreihe	
Oberkörperlänge	Zusätzliche Beinfreiheit
Maximaler Sitzlehnenwinkel	Breite der Rückenlehne
Minimaler Sitzlehnenwinkel	Einzelarmlehne Breite
Freiraum Kopf zur Decke	Doppelarmlehne Breite
Sitztiefe	Freiraum zwischen den Sitzen
Sitzverstellung x-Richtung	Freiraum zur Wand
Sitzhöhe	Dicke der Rückenlehne
Sitzverstellung z-Richtung	Dicke des Sitzes
Fußlänge	Länge der Rückenlehne

Tabelle H.3 Komponenten  
Auslegungsparameter zur Komponentenauswahl

Anzahl mech. LIDAR-Sensoren	Material Kofferraum
Anzahl MEMS-LIDAR-Sensoren	Material Türen
Anzahl Ultraschallsensoren	Material Klappen
Anzahl Radarsensoren	Material Aufbau
Anzahl Surround-View-Kameras	Material Kotflügel
Anzahl Frontkameras	Anzahl der Türen
Lenksystem	Vorderer Kofferraumtyp
Bremssystem	Hinterer Kofferraumtyp
Batterie mit Kühlplatte	Zusätzliche Sonderausstattungen

Auslegungsparameter zur Komponentenspezifikation

Geschätzte Endmontagedauer	Seitliche freie Crashlänge
Prozentualer Anteil Aluminium BIW	Hintere freie Crashlänge
Prozentuale Ersparnis Eco-Driving	Anzahl Airbags
Verhältnis Kofferraum vorne/hinten	Winkel elektrische Maschine
Lenkverteilung vorne/hinten	Drehmomentenverhältnis vorne
Reifendurchmesser	Achsenwinkel (xy)
Distanz Radhaus zu Stoßdämpfer vorne	Achsenwinkel (xz)
Distanz Radhaus zu Stoßdämpfer hinten	Anzahl der Getriebestufen
Distanz Innenraum zu Vorderwagen	Getriebetyp
Distanz Innenraum zu Hinterwagen	Getriebeübersetzung 1
Frontscheibenwinkel	Getriebeübersetzung 2
Heckscheibenwinkel	