

Lisa Braun

**Modellbasierte Design-Space-Exploration
nicht-funktionaler Auslegungskriterien des
Fahrzeugenergiebordnetzes**



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Modellbasierte Design-Space-Exploration nicht-funktionaler Auslegungskriterien des Fahrzeugenergiebordnetzes

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTOR-INGENIEURS
von der KIT-Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
DISSERTATION

von

Lisa Braun (M.Sc.)

geb. in Vaihingen an der Enz

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Februar 2018
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Eric Sax
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss

*Another turning point
A fork stuck in the road
Time grabs you by the wrist
Directs you where to go*

*So make the best of this test
And don't ask why
It's not a question
But a lesson learned in time*

*It's something unpredictable
But in the end it's right
I hope you had the time of your life*

Green Day - Good Riddance

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als externer Doktorand bei der Siemens Corporate Technology in München in Kooperation mit dem Institut für Technik der Informationsverarbeitung am Karlsruher Institut für Technologie.

Zunächst möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Eric Sax für die Betreuung meiner Arbeit als Doktorvater danken. Ihr wertvolles Feedback, das mir entgegengebrachte Vertrauen und insbesondere Ihr Appell zur Verbindlichkeit von Terminen haben viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Professor Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens. Des Weiteren danke ich Herrn Professor Dr. rer. nat. Olaf Dössel für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Michael danke, dass du mich die letzten Jahre bei Siemens so motiviert betreut hast. Ich weiß, dass ich mit meinem Kopf in den Wolken und meiner Unfähigkeit „endlich konkreter zu werden“ deine Geduld öfters auf die Probe gestellt habe. Aber dank dir habe ich den Fokus nicht verloren, mich stetig verbessert und die Arbeit am Ende auch fertig gestellt. Für die Ermutigung diese Arbeit zu beginnen, da eine Promotion „genau das richtige für mich wäre“, möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Gernot Spiegelberg danken. Weiterhin danke ich Herrn Professor Dr. rer. nat. Frank Gauterin für die Ermöglichung der Kooperation mit Siemens CT.

Meinen ehemaligen RACE-Kollegen möchte ich für die tolle Zeit im Büro, die vielen spannenden Diskussionen und Arbeiten rund um das RACE-Projekt sowie die erhörten Hilferufe – gebt mir Projektarbeit ich brauch Abstand zur Promotion – danken. Karl-Josef, Marcus, Cornel und Michael, danke, dass ihr mit mir den Grundstein für dieses Thema gelegt habt und mir die Möglichkeit gegeben habt, im RACE-Umfeld zu promovieren.

Weiterhin möchte ich mich bei den Kollegen am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, am Forschungszentrum für Informatik und am Institut für Technik der Informationsverarbeitung dafür bedanken, dass ihr mich während meinen monatlichen Karlsruhe-Aufenthalten immer herzlich aufgenommen habt und

mir mit Tipps, Ratschlägen und Kaffee-Diskussionen tatkräftig zur Seite standet. Dank euch haben mir die letzten vier Jahre sehr viel Spaß gemacht.

Meiner Familie möchte ich für ihre Unterstützung und Geduld während der letzten Jahre danken. Ich weiß, ich war nicht immer einfach, insbesondere in der Endphase der Promotion – und Mama schreiben ist wirklich Arbeit, auch wenn man sich mehrere Stunden Blickduelle mit dem leeren Bildschirm liefert und am Ende kapituliert. Benny, danke, dass du mich die letzten Jahre abgelenkt, zum Urlaub überredet oder zum Arbeiten gezwungen hast – je nachdem was ich gerade am ehesten gebraucht habe, um diese Arbeit mit Erfolg abschließen zu können.

Den Lurchis, meinen Mädels und den Handballern möchte ich ebenfalls für Ablenkung, Mutzusprechung und ähnliche erfolgreiche Unterstützungsmaßnahmen danken.

Schließlich möchte ich im speziellen Caro, Conny, Emilia, Eva, Felix, Jasmin, Jens, Kaddi, Kurt, Leonie, Marina, Matt, Nina, Paul, Philipp, Sabine, Simon, Steffen, Stip, Tuyet und Willi dafür danken, alle übriggebliebenen Rechtschreibfehler entdeckt zu haben.

Karlsruhe den 15.02.2018

Lisa Braun

Abstract

With the help of a model-based design space exploration (DSE), this work simultaneously analyzes the impact of multiple degrees of freedom in onboard electrical system design on power consumption and total cost of ownership (TCO), while taking voltage stability into account. Instead of simply optimizing individual aspects of the vehicle electrical system, a system optimum is sought. The freedoms considered are the topology of the electrical 12 V system, as well as the number, capacity, and position of the integrated batteries. Both the selection of freedoms in the design and the extension of the evaluation criteria weight and unit costs to energy consumption and TCO are based on the results of an expert interview. Additionally, a change in the information and communication technology in the vehicle towards a platform with system-wide separation of function and hardware is presupposed in order to meet the growing interconnectedness, the data volume, and new requirements, such as extensibility. The advantage of the generic DSE is the ability to adapt the models flexibly in order to investigate not only the aforementioned levels of freedoms, but also different vehicle models, drive variants, consumer configurations, environmental conditions, or boundary conditions of the design.

The results of the DSE demonstrate that redesigning the established star topology to a bus topology with two batteries, despite the increase in weight and unit cost, significantly reduces energy consumption and thus the operating costs of an internal combustion vehicle; therefore, making the redesign economically viable. In addition, the resulting fail-operational design increases the safety of the energy supply network by means of two independent energy sources. Due to the absence of emission penalties and taxes in Germany as well as the higher efficiency of the powertrain, the material costs in the electric vehicle have a greater influence on the TCO. The redesign therefore leads only at a high mileage or a consistently high load of the auxiliary consumers to a significant cost reduction over the previous design.

Kurzfassung

Diese Arbeit analysiert mit Hilfe einer modellbasierten Design Space Exploration (DSE) gleichzeitig den Einfluss mehrerer Freiheiten des Energieversorgungsnetzes auf die Bewertungskriterien Energieverbrauch und Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) unter Berücksichtigung der Spannungsstabilität als Randbedingung. Statt nur einzelne Aspekte des Energieversorgungsnetzes zu optimieren wird so ein Systemoptimum gesucht. Die betrachteten Freiheiten sind die Topologie des Energieversorgungsnetzes sowie die Anzahl, Kapazität und Position der integrierten Batterien.

Sowohl die Auswahl der Freiheiten im Entwurf als auch die Erweiterung der Bewertungskriterien Gewicht und Stückkosten hin zu Energieverbrauch und TCO beruhen dabei auf den Ergebnissen eines Experteninterviews. Außerdem wird eine Änderung der Informations- und Kommunikationstechnik im Fahrzeug hin zu einer Plattform mit systemweiter Trennung von Funktion und Hardware, um der wachsenden Vernetzung, Datenmenge und neuen Anforderungen wie Erweiterbarkeit gerecht zu werden, als Randbedingung der Entwürfe vorausgesetzt. Der Vorteil der generischen DSE ist die Möglichkeit, die Modelle flexibel anpassen zu können, um neben den genannten Freiheiten auch verschiedene Fahrzeugmodelle, Antriebsvarianten, Verbraucherkonfigurationen, Umgebungsbedingungen oder Randbedingungen des Entwurfs zu untersuchen.

Die Ergebnisse der DSE demonstrieren, dass eine Umgestaltung der etablierten Stern- hin zu einer Bustopologie mit zwei Batterien trotz der Zunahme des Gewichts und der Stückkosten den Energieverbrauch und damit die Betriebskosten eines Verbrennungsfahrzeugs deutlich senkt und deshalb die TCO betrachtet wirtschaftlich sinnvoll ist. Zusätzlich dazu erhöht die damit erreichte fail-operational Auslegung mittels zweier unabhängiger Energiequellen die Sicherheit des Energieversorgungsnetzes. Aufgrund der fehlenden Emissionsstrafen und Steuern sowie der höheren Effizienz des Antriebsstranges haben die Materialkosten im Elektrofahrzeug einen höheren Einfluss auf die TCO, weshalb eine Umgestaltung nur für hohe Laufleistungen oder eine durchweg hohe Last der Nebenverbraucher in einer deutlichen Kostenreduktion resultiert.

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation	1
1.1. Thesen und abgeleitete Forschungsfragen	5
1.2. Zielsetzung	7
1.3. Gliederung	7
2. E/E-Architektur im Fahrzeug	9
2.1. Informations- und Kommunikationstechnik	9
2.1.1. Status quo	9
2.1.2. Trends in der Informations- und Kommunikationstechnik	12
2.2. Energieversorgungsnetz	16
2.2.1. Status quo	16
2.2.2. Trends in der Energieversorgung	21
2.3. Kabelbaum	26
2.3.1. Status Quo	26
2.3.2. Trends im Kabelbaumentwurf	27
2.4. Modellbasierte E/E-Architecturentwicklung	27
2.4.1. Status Quo	28
2.4.2. Trends in der Entwicklung	31
3. Bewertungskriterien von E/E-Architekturen	35
3.1. Experteninterview zur Ermittlung von Stakeholder Requests . .	35
3.2. Diskussion wichtiger Stakeholder Requests	36
3.2.1. Anforderungen an die IKT	38
3.2.2. Anforderungen an die Energieversorgung	39
3.3. Synthese wichtiger Auslegungskriterien	40
3.3.1. Kosten	41
3.3.2. CO ₂ -Emissionen	44
3.3.3. Qualität	46
3.3.4. Varianten	47
3.3.5. Bauraumvolumen	48
3.3.6. Funktionale Sicherheit (Safety)	48
3.3.7. Spannungsstabilität	50
3.4. Spannungsfeld zwischen Trends und Anforderungen	50

4. Semi-formale Beschreibung erweiterbarer E/E-Architekturen	53
4.1. Diskussion existierender Modellierungsansätze	54
4.2. Methodik Domain Driven Design	55
4.3. Domänenmodell einer funktions-unabhängigen E/E-Architektur	58
5. Design Space Exploration Energieversorgungsnetz	63
5.1. Lösung eines multikriteriellen Optimierungsproblems	64
5.2. Definition von Key-Performance-Indicators zur Bewertung des Energieversorgungsnetzes	66
5.2.1. Spannungsstabilität	67
5.2.2. Energieverbrauch Gesamtfahrzeug	70
5.2.3. Gesamtbetriebskosten	72
5.3. Freiheiten und Randbedingungen im Entwurf des Energiever- sorgungsnetzes	74
5.3.1. Qualitative Diskussion von Freiheitsgraden im Design von Plattform-Ansätzen	75
5.3.2. Energiesenken als Randbedingung der Auslegung	78
5.3.3. Freiheiten der Energiequellen und Energiespeicher	79
5.3.4. Freiheiten der Energieverteilung	80
5.3.5. Zusammenfassung der Parametervariation der DSE	82
6. Modellbasierte Analyse des Energieversorgungsnetzes	85
6.1. Aufbau einer Simulationsumgebung	86
6.1.1. Umgebungsmodell deutscher Pendler	88
6.1.2. Lasten Modell	90
6.1.3. Lithium-Ionen Batterie Modell	91
6.1.4. Generator Modell	94
6.1.5. DC/DC-Wandler Modell	95
6.1.6. Kabelbaum Modell	96
6.2. Generierung der Entwürfe durch die DSE	96
6.3. Vorgehen zum Vergleich von Entwürfen	100
7. Ergebnisse der vorgestellten Design Space Exploration	103
7.1. Parameterabhängigkeit Spannungsstabilität	104
7.2. Parameterabhängigkeit Energieverbrauch	106
7.3. Parameterabhängigkeit Gesamtbetriebskosten	109
7.4. Paretofronten der KPI	113
7.4.1. Abhängigkeiten einzelner Optimierungsgrößen	117
7.5. Veränderung der Ergebnisse durch fahrzeugspezifische Eigen- schaften	119

8. Diskussion der Ergebnisse	123
8.1. Abgeleitete mögliche optimale Entwürfe	123
8.2. Einfluss der gewählten Randbedingungen	125
8.2.1. Einfluss des generierten Lastgangs	125
8.2.2. Einfluss variabler Umgebungsbedingungen	126
8.2.3. Einfluss Fahrzyklus	129
8.2.4. Einfluss Kabelauslegung	130
8.2.5. Einfluss Sicherungskomponenten	132
8.3. Einfluss einzelner Optimierungsgrößen	133
8.3.1. Einfluss der Spannungsstabilität	133
8.3.2. Einfluss des Energieverbrauchs	134
8.3.3. Einfluss der Betriebskosten	136
8.4. Fazit	140
9. Zusammenfassung und Ausblick	143
9.1. Zusammenfassung	143
9.2. Ausblick	146
9.2.1. Mögliche Erweiterung	146
9.2.2. Mögliche Verfeinerung	147
Anhang	149
A. Glossar	151
B. Experteninterview	157
B.1. Leitfaden	157
B.2. Zusammensetzung Experten	158
B.3. Datenanalyse	159
B.4. Ergebnisse: Anforderungen	161
C. Elektrische Verbraucherdaten	163
D. Randbedingungen für die Modellierung	169
D.1. Fahrzeugdaten	169
D.2. Auswahl an Senken	171
D.3. Positionierung Senken im Fahrzeug	175
D.4. Weitere Lastgänge Winterszenario	177
D.5. Auswahl Energieverteilung	178
D.6. Vergleich genormter Fahrzyklen zur Emissionsmessung	180

E. Weitere Ergebnisse der Design-Space-Exploration	183
E.1. Spannungsstabilität	183
E.2. Energieverbrauch	186
E.3. Kosten	189
E.4. Weitere Paretofronten und Parameterkombinationen	197
F. Betrachtung der Randbedingungen der Simulation	203
F.1. Weitere Umgebungsabhängigkeiten	203
Abkürzungsverzeichnis	207
Literaturverzeichnis	217

1. Motivation

„More change to come in the next 5 to 10 years than in the last 50 years.“
Mary Barra, CEO General Motors, 2010

In den letzten 30 Jahren haben sich Fahrzeuge von schlichten Fortbewegungsmitteln zu komplexen, fahrenden Computern entwickelt. Bereits heute ist die Elektrik und Elektronik (E/E)-Architektur eine der aufwändigsten und teuersten Systeme eines Fahrzeugs [Reg+11]. Sie verursacht 40% des Entwicklungsaufwands eines Oberklassefahrzeugs und 70% eines Hybridfahrzeugs [Fra+08]. Dabei gehen aktuell 90% aller Produktinnovationen sowie 30% der Wertschöpfung eines Fahrzeugs auf E/E zurück [EL12]. Für das Jahr 2020 wird erwartet, dass dieser Wert sogar auf 50% steigt [OM15].

Grund hierfür ist insbesondere die rasante Entwicklung und weite Verbreitung von Fahrerassistenzsystemen (Driver Assistance System, DAS) seit Bussysteme die einfache Vernetzung von Steuergeräten (Electronic Control Unit, ECU) ermöglichen, vergleiche Abbildung 1.1. Die Zahl integrierter (Elektronik-) Funktionen des VW Golf 7 (2013) liegt mit 236 um 65% über der des VW Golf 5 (2003) [Ort14]. Abbildung 1.2 zeigt den damit verbundenen beeindruckenden Anstieg der ins Fahrzeug integrierten Steuergeräte und der wachsenden funktionalen Abhängigkeiten in Form der übertragenen Datenmenge. Während ein Audi A8 im Jahr 1993 nur über 5 Steuergeräte verfügte, sind heute im AUDI Q7 (2015) über 160 Steuergeräte verbaut [Pre15], die alle in den begrenzten Bauraum eines Fahrzeugs integriert werden müssen.

Parallel zur Elektronik ist die Zahl elektrischer Verbraucher deutlich gestiegen. In einem Mercedes Modell 170V reichten 40 Leitungen und 60 Kontakte zur Energieversorgung aus [Ern14]. Heute enthält eine S-Klasse 488 Leitungssatz-Module mit insgesamt 2843 Leitungen und 1102 Steckern [Jur14].

Die Entwicklung der ins Fahrzeug integrierten DAS verlief von einfachen, auf die Eigendynamik bezogenen, (propriozeptiven) Sensor-Systemen, wie ABS, über Informations- und Komfortsysteme mit Sensoren zur Außenwahrnehmung (exterozeptiv), wie den Parkassistent mit Radar, hin zu fortgeschrittenen Fahrerassistenzsystemen (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS), z.B. Adaptive Cruise Control, mit komplexen Sensornetzwerken [Ben+14].

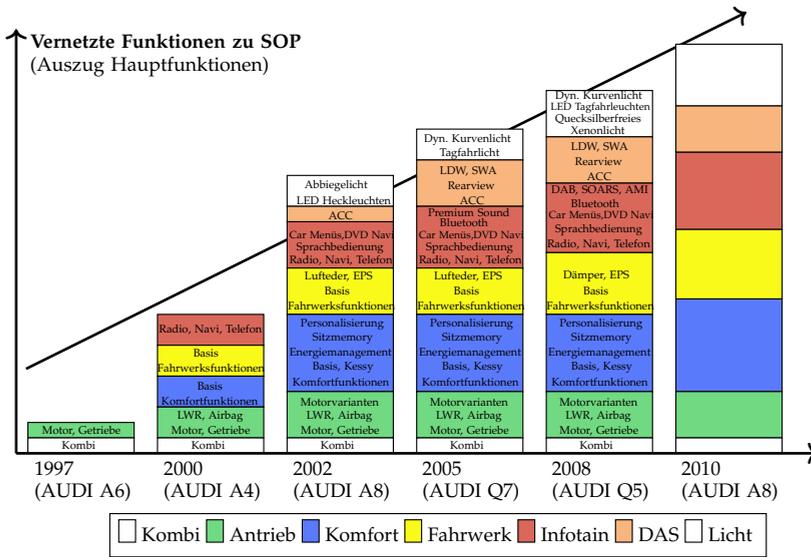


Abbildung 1.1.: Zunahme an vernetzten Funktionen der E/E-Architektur am Beispiel verschiedener AUDI Fahrzeuggreihen [EL08]

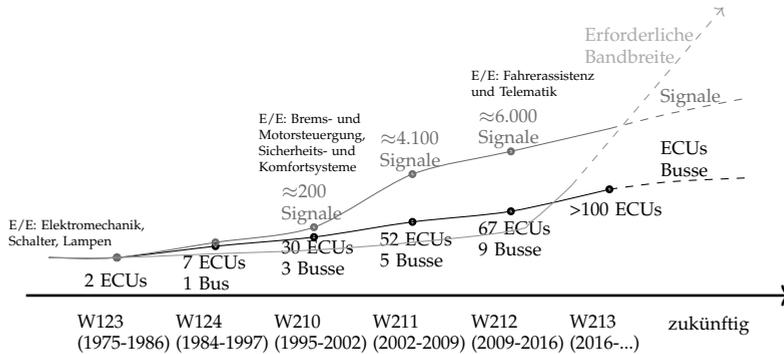


Abbildung 1.2.: Entwicklung der Anzahl von Steuergeräten, Signalen und benötigter Bandbreite am Beispiel der Mercedes E-Klasse Modelle [ST12]

Vollautomatisiertes beziehungsweise autonomes Fahren¹ ohne menschlichen Eingriff scheint in naher Zukunft möglich [Rö15b]. Seit dem Projektstart 2009 bis Oktober 2016 wurden im „Google Self-Driving Car Project“ insgesamt 3.589.280km mit 58 Fahrzeugen autonom zurückgelegt [Goo16].

„The car is the ultimate mobile device.“
Jeff Williams, Chief Operating Officer Apple, 2015

Eine zentrale Herausforderung durch die schiere Zahl neuer E/E-Funktionen und deren wachsender Intelligenz ist die Einhaltung hoher Qualitätsstandards und die Umsetzung des Standards ISO 26262 zur funktionalen Sicherheit² [ISO15], um nicht akzeptable Risiken für Personen durch Fehlfunktionen von E/E-Systemen auszuschließen. Echtzeit und Spannungsstabilität sind weitere wichtige Voraussetzungen zur Integration sicherheitskritischer Funktionen. Bei autonomen Fahrzeugen steigen diese Anforderungen weiter, da die Rückfallebene des Fahrers entfällt.

Die Kombination mit weiteren Herausforderungen, die Einhaltung von Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Grenzwerten, die Koordination verteilter Entwicklungsteams einer globalen Zulieferkette oder die Beherrschung einer wachsenden Produktvielfalt, lässt den Aufwand und die Zahl paralleler Fahrzeugprojekte stetig steigen [Pre15].

Gleichzeitig wächst der Kostendruck bei kürzeren Entwicklungszyklen aufgrund der durch die Consumer Electronic geprägten Kundenerwartungen hinsichtlich der Schnelligkeit von Innovationszyklen und der Erweiterbarkeit um digitale Funktionen. Der Produktentstehungsprozess neuer Smartphone-Modelle liegt bei etwa einem Jahr. Innerhalb weniger Wochen werden über Aktualisierungen des Betriebssystems Fehler behoben und neue Funktionen bereitgestellt. Außerdem sind Smartphones lebenslang um neue Software-Applikationen (Apps) erweiterbar, wobei alleine Apple über etwa 630.000 unabhängige Anwendungsentwickler verfügt [Moh+15]. Dies macht es für die Automobilindustrie mit einem durchschnittlichen Lebenszyklus von ungefähr sechs Jahren schwierig, ähnliche oder bessere Funktionen im IT- und

¹Diese Arbeit orientiert sich an den in [SAE16] definierten Begrifflichkeiten zur Beschreibung des Automatisierungsgrads eines Fahrzeugs. Die Ebenen null, keine Automatisierung, bis zwei, teilweise Automatisierung, erfordert vom Fahrer die Überwachung der Umgebung und Kontrolle über das System. In Ebene drei (bedingt automatisiert) und vier (hochautomatisiert) übernimmt das Fahrzeug in definierten Fahrmodi die Fahraufgabe, wobei in Ebene vier der Fahrer als Rückfallebene entfällt. Im vollautomatisierten Fahren auf Ebene 5 entfällt der Fahrer vollständig. ADAS bewegen sich auf Ebene zwei und drei [Rö15b].

²Funktionale Sicherheit bezieht sich ausschließlich auf das Fehlen unvertretbarer Risiken bei einem Fehlverhalten von E/E-Systemen insbesondere durch zufällige Hardwarefehler oder systematischen Fehlern in der Auslegung [ISO15], [ZVE12]

Telematik-Bereich bereitzustellen. Während die Nachfrage nach digital vernetzten Fahrzeugen wächst, gibt die IT-Industrie die technischen Standards vor [JM15], [Moh+15].

Schließlich ändert sich das Mobilitätsverhalten im urbanen Raum [Sch+12]. In Deutschland waren 2016 über 1,2 Millionen Nutzer für Car-Sharing registriert, etwa 126 Nutzer pro Fahrzeug im free-floating Bereich [Car16]. Apps, wie SMILE oder Google Now [Aud+14], ermöglichen die Kombination verschiedener Verkehrsmittel, wobei autonome Fahrzeuge ideale Roboter-Taxis darstellen würden [Ver15]. Ein solches Geschäftsmodell führt zu einer Reduktion des Absatzmarktes bei gleichzeitig höherer Auslastung der Fahrzeuge im Vergleich zu heutigen Privatfahrzeugen.

Die Ambivalenz der E/E-Entwicklung liegt darin, diese Herausforderungen, trotz beschränkter Entwicklungszeiten und -budgets, mit hohem Innovationsgrad zu meistern. Zusätzlich ist der Funktionsumfang, die heutige Basis der Entwicklung, bei einer im Betrieb erweiterbaren E/E-Architektur zur Zeit der Entwicklung nicht wohldefiniert. Die Auslegung wird deshalb signifikant von neuen, funktionsübergreifenden, nicht funktionalen Eigenschaften geprägt. Ein Beispiel wäre die Anforderung einer ausfallsicheren (fail-operational) Gestaltung zur Realisierung des autonomen Fahrens. Dabei ist die Komplexität im System und der Entwicklung bereits durch die beschriebene Vielzahl an E/E-Komponenten und vernetzten Funktionen kombiniert mit einer hohen Variantenvielfalt sehr groß. Der Entwicklungsgrundsatz, die bestehende E/E-Architektur eines Vorgängermodells um etwaige neue Funktionen zu erweitern, um Zeit und Kosten zu sparen, stößt an seine Grenzen [BGS16]. Ein zentraler Ansatzpunkt, die aufkommenden Anforderungen zu meistern, liegt in der Entwicklung andersartiger E/E-Architekturen, die dem Wandel durch Elektrifizierung und Digitalisierung Rechnung tragen.

Referenz [Kü+14] spricht von der Notwendigkeit eines neuen Architekturansatzes, der eine dynamische Funktionsverteilung (Deployment) zur Laufzeit ermöglicht. Laut [For12] könnte eine Laufzeitumgebung³ ausführende Steuergeräte und Kommunikationsbusse virtualisieren, wie digitale Nachrichten in den 1990er Jahren die direkte physische Verkabelung. Eine solche Trennung von Software und Hardware ermöglicht die Integration von Funktionen als wiederverwendbare Softwarebausteine anstatt aufwändig zu vernetzten Steuergeräten. Vorteile einer solchen Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)-Architektur wären eine signifikante Vereinfachung der Entwicklung und eine Reduktion des Integrations- und Validierungsaufwands [Kü+14].

³Softwareschicht eines komplexen Softwaresystems. Sie separiert Anwendungen von den ausführenden Dienstprogrammen wie Treiber.

Beide Referenzen prägen in diesem Zusammenhang den Begriff einer Dienst- statt einer funktions-orientierten-Architektur (Client-Server-Prinzip), welche aufgrund der Nähe zur IT im weiteren Verlauf dieser Arbeit IKT-Plattform genannt wird. Sie umschreibt Steuergeräte, ihre Software und Kommunikation.

Während sich damit die zweite grundlegende Umgestaltung der E/E-Architektur nach Einführung der Bussysteme anbahnt [For12], ist die Energieversorgung bisher mit einer zentralen Energieerzeugung und Absicherung mit hierarchischer Baumstruktur in ihren Grundzügen gleichgeblieben. Eine Umgestaltung einzelner Funktionen und Komponenten, wie z.B. eine zusätzliche 48 V Spannungsebene [Dör+12] oder der Einsatz von Halbleitern statt Relais oder Schmelzsicherungen [Dre15], [Jai15], [GKR13] werden geplant. Allerdings könnte nach [EH14] eine parallele Veränderung der IKT und des Energieversorgungsnetzes die Erfüllung der sich durch neue Funktionen ändernden Anforderungen sogar vereinfachen. Dies wird mit Hilfe der Methode Bionik erstellten möglichen Ausprägungen zukünftiger E/E-Architekturen autonomer Fahrzeuge gezeigt. Einige Ansätze werden andiskutiert, wie das Platzieren dezentraler Speicher oder das Erzeugen geschickter Redundanzen mittels Signalübertragung über das Energienetz in Notsituationen.

1.1. Thesen und abgeleitete Forschungsfragen

Der Entwurf der E/E-Architektur bietet eine Vielzahl möglicher Freiheitsgrade, angefangen bei der Auswahl der zu integrierenden Funktionen, über deren Partitionierung auf Steuergeräten, deren Positionierung im Fahrzeug bis hin zur Auswahl und Auslegung von Komponenten und der Topologie ihrer Vernetzung. Überraschend ist, dass viele dieser Freiheitsgrade beim Entwurf heutiger E/E-Architekturen scheinbar nicht berücksichtigt werden. Insbesondere die Energieversorgung ist in ihren Grundzügen unverändert.

Dies führt zu der Frage, ob die Kombination dieser Freiheitsgrade bereits untersucht und als nicht lohnenswert erachtet oder aus anderen Gründen nicht berücksichtigt wurde? Setzt man voraus, dass sich die IKT zur Lösung der aufgezeigten Probleme wie beschrieben ändert, liegt weiterhin die Frage nahe, ob dies Rückwirkungen auf den möglichen Entwurfsraum des Energieversorgungsnetzes hat. Mögliche Auswirkungen einer Trennung von Hardware und Software auf die Ausprägung der Energieversorgung wurden bisher nicht diskutiert.

Die zu beantwortenden Forschungsfragen sind folglich

- Welche Freiheiten im Entwurf des Energieversorgungsnetzes können genutzt werden und welche Auswirkungen hat die vorausgesetzte Änderung der IKT?
- Welche zentralen Kriterien zur Bewertung eines Energieversorgungsnetzes sind zukünftig entscheidend?
- Wie begünstigt eine Veränderung der Energieversorgung unter Ausnutzung der gefundenen Freiheiten die Erfüllung der Auslegungskriterien?

Freiheiten in der Auslegung des Energieversorgungsnetzes sind unter anderem die Spannungslage, die Topologie, sowie die Auswahl der Position, Technologie und Multiplizität von Quellen, Verteilnetz und Senken. Alleine die Einführung einer 48 V-Spannungsebene soll es ermöglichen, neue innovative Hochleistungsverbraucher stabil zu versorgen und den Energieverbrauch signifikant, nach [BKD15] um bis zu 21%, zu senken. Bereits eine erwartete Verbrauchssenkung um 0,3-0,7% rechtfertigt die Integration eines Kondensators als zusätzlichen Energiespeicher im 12 V-Netz [Chr09]. Der Ersatz von Schmelzsicherungen durch Halbleiter erlaubt neue Topologien, reduziert das Gewicht und sorgt für eine höhere Netzstabilität [SF+14].

Zentrale Kriterien zur Bewertung eines Entwurfs sind heute die Kosten, das Gewicht und die Effizienz der Energieversorgung. Randbedingungen sind eine stabile Versorgungsspannung und zunehmend auch die Berücksichtigung der funktionalen Sicherheit. Autonome Fahrzeuge müssen zukünftig über eine ausfallsichere Energieversorgung verfügen. Aufgrund der strengeren Emissionsziele steigt der Druck, die Verluste und das Gewicht zu senken. Schließlich interessiert einen Flottenbetreiber nicht der direkte Einkaufspreis seiner Car-Sharing-Fahrzeuge, sondern deren Gesamtbetriebskosten (Total-Cost-of-Ownership, TCO) für die Festlegung des Preises pro Kilometer Fahrleistung. Gleichzeitig steigen bei einer hohen Fahrzeugauslastung der Anteil und folglich auch die Bedeutung der Betriebskosten. Klar ist, dass der mit einer möglichen Veränderung verbundene Aufwand nur für entscheidende Vorteile in Kauf genommen wird.

Basierend auf diesen Beobachtungen kann folgende These aufgestellt werden: Eine Veränderung der Topologie kombiniert mit Halbleitern und verteilten Energiespeichern erlaubt signifikante Verbesserungen zentraler zukünftiger Auslegungskriterien wie Spannungsstabilität, Energieverbrauch oder Betriebskosten.

Im Folgenden werden die Forschungsfragen untersucht, um die hier aufgestellte These zu überprüfen und eine eindeutige Aussage liefern zu können.

1.2. Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist Freiheiten in der Architekturentwicklung des Energieversorgungssystems bei einer Veränderung der IKT zu finden und vielversprechende Variationen herauszuarbeiten, um das Potential einer parallelen Veränderung beider Aspekte der E/E-Architektur, der IKT und Energieversorgung, aufzuzeigen. Aus der Betrachtung mehrerer Auslegungsparameter ergibt sich ein multikriterielles Optimierungsproblem.

Die Bewertung unterschiedlicher Entwürfe erfordert die Definition zentraler Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators, KPIs) zur Messung kritischer Erfolgsfaktoren. Deshalb werden wichtige KPIs zur Bewertung zukünftiger Architekturen herausgearbeitet. Als Grundlage werden reale Anforderungen beteiligter Interessengruppen (Stakeholder Requests) als Ergebnis eines Experteninterviews mit Vertretern aus Industrie und Forschung herangezogen. Dabei haben sich die Reduktion von Kosten, Gewicht und CO₂-Emissionen als zentrale Forderungen herauskristallisiert. Die Spannungsstabilität steht mit der wachsenden Zahl an Verbrauchern und höherer Volatilität im Lastgang ebenfalls im Fokus. Weiterhin wird eine fail-operational Auslegung als zukünftige Randbedingung für sicherheitsrelevante Verbraucher im Entwurf gesehen.

Zur Überprüfung der aufgestellten Thesen, wird mittels Design Space Exploration ein ausgewählter Satz verschiedener Entwürfe des Energieversorgungsnetzes bezüglich der gefundenen zentralen KPIs untersucht und bewertet. Um sowohl statische als auch dynamische Optimierungsgrößen, beispielsweise Leitungslänge und Verluste, berücksichtigen zu können, erfolgt die Bewertung der Architekturentwürfe mittels Modellierung. Dies ermöglicht es den Betrieb der Lasten zu simulieren. Das hierfür generierte Betriebsmodell beinhaltet sowohl Umgebungsdaten, Lichtverhältnisse, Temperaturen oder Wetter, also auch Nutzerdaten über einen genormten Fahrzyklus.

1.3. Gliederung

Im Anschluss an die Motivation folgt die Situationsanalyse, in welcher Kapitel 2 zunächst auf den Stand der Technik der einzelnen Bereiche der E/E-Architektur, der IKT in Kapitel 2.1, des Energieversorgungsnetzes in Kapitel 2.2 und den beide Bereiche betreffenden Leitungssatz in Kapitel 2.3, eingeht. Die zugehörige modellbasierte Entwicklung erklärt Kapitel 2.4. Weiterhin werden Trends und Herausforderungen, die sie zukünftig prägen werden, auf-

gezeigt. Danach analysiert Kapitel 3 auf einem durchgeführten Experteninterview beruhende, mögliche Bewertungskriterien von E/E-Architekturen. Während Kapitel 3.1 einen kurzen Überblick über das Interview gibt, geht Kapitel 3.2 auf die damit ermittelten Stakeholder Requests ein. Mit deren Hilfe wird im Anschluss in Kapitel 3.3 eine als wichtig erachtete Auswahl an Anforderungen definiert. Schließlich rundet Kapitel 3.4 die Situationsanalyse mit der Darstellung des Spannungsfeldes zwischen den zuvor dargelegten Trends und den ermittelten Bewertungskriterien ab.

Als Grundlage zur Definition der Freiheiten im Entwurf zukünftiger Energieversorgungsnetze legt zunächst Kapitel 4 ein entwickeltes Domänenmodell zur semi-formalen Beschreibung einer erweiterbaren E/E-Architektur dar. Hierfür diskutiert Kapitel 4.1 existierende Modellansätze und ihre Vor- und Nachteile bei der Beschreibung einer erweiterbaren E/E-Architektur. Danach umreißt Kapitel 4.2 die Methode des Domain Driven Designs und erklärt die definierte Syntax des Modells. Am Ende zeigt Kapitel 4.3 das entwickelte Domänenmodell.

Die Beschreibung der Design Space Exploration (DSE) in Kapitel 5 beginnt mit der Diskussion von Lösungsmöglichkeiten eines multikriteriellen Optimierungsproblems in Kapitel 5.1. Anschließend definiert Kapitel 5.2 die zur Bewertung der Entwürfe der DSE benötigten KPI und begründet ihre Auswahl. Kapitel 5.3 geht schließlich auf die betrachteten Freiheiten und Randbedingungen bei der Generierung der Energieversorgungsnetzentwürfe ein. Danach erläutert Kapitel 6 die modellbasierte Analyse der DSE. Während Kapitel 6.1 die Simulationsumgebung und die einzelnen hinterlegten Modelle erklärt, zeigt Kapitel 6.2 die, mit Hilfe einer überlagerten Matlabsteuerung, automatisierte Generierung der Entwürfe. Zum Schluss umreißt Kapitel 6.3 den realisierten Vergleich der erzeugten Ergebnisse mit Hilfe der KPIs.

Die Ergebnisse der DSE in Kapitel 7 beschreiben anfangs in den Kapiteln 7.1 bis 7.3 die Abhängigkeit der KPIs Spannungsstabilität, Energieverbrauch und TCO von den variierten Freiheiten im Entwurf eines Fahrzeugsegments. Im Anschluss veranschaulicht Kapitel 7.4 Zusammenhänge zwischen den KPIs untereinander, um optimale Entwürfe abzuleiten. Kapitel 7.5 stellt diese Ergebnisse denen der restlichen betrachteten Fahrzeugsegmente gegenüber.

Schließlich diskutiert Kapitel 8 das Potential der gewählten KPIs und deren Einfluss auf zukünftige Energieversorgungsnetze. Kapitel 8.1 vergleicht zunächst die ermittelten optimalen Entwürfe mit der aufgestellten These. Der Einfluss verschiedener Randbedingungen sowie einzelner Optimierungsgrößen der KPIs auf die Ergebnisse der DSE erläutern Kapitel 8.2 und 8.3. Ein Fazit der gewonnenen Erkenntnisse gibt Kapitel 8.4 wider. Am Ende findet sich eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick über mögliche zukünftige Erweiterungen in Kapitel 9.

2. E/E-Architektur im Fahrzeug

Eine E/E-Architektur ist ein verteiltes eingebettetes System, das räumlich getrennte Komponenten zur Realisierung kundenerlebbarer Funktionen (Automotive Functions) miteinander verbindet. Sie beschreibt die Struktur und das Zusammenspiel aller E/E-Systeme. Dies beinhaltet die funktionale, logische, Kommunikations- und energetische Vernetzung, ihre Schnittstellen und die Topologien [Jä12].

Dieses Kapitel beschreibt sowohl den Stand der Technik als auch Treiber für mögliche Veränderungen verschiedener Aspekte der E/E-Architektur. Kapitel 2.1 geht zunächst auf die Informations- und Kommunikationstechnik ein. Anschließend legen Kapitel 2.2 und 2.3 das Energieversorgungsnetz und den Leitungssatz dar. Am Ende erläutert Kapitel 2.4 den Entwicklungsprozess.

2.1. Informations- und Kommunikationstechnik

Die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) fasst die funktionale, logische und Kommunikations-Vernetzung zusammen. Sie umfasst alle Software-Komponenten, zugehörige Hardware, Steuergeräte, Sensoren und Aktoren, und die zur Datenübertragung eingesetzten Bussysteme.

2.1.1. Status quo

Die bestehende IKT-Architektur setzt sich aus verschiedenen Teilnetzen, den Domänen, zusammen. Diese Einteilung ermöglicht die Bündelung von Funktionen und Komponenten mit hohem Datenaustausch. In Abbildung 2.1 erfolgt die Verbindung der Teilnetze über ein zentrales Gateway (ZGW). Alternativ können mehrere dezentrale Gateways den Austausch von Signalen ermöglichen. Dies erlaubt die weitestgehend unabhängige Entwicklung von Teilsystemen und reduziert den Abstimmungsaufwand in der Entwicklung.

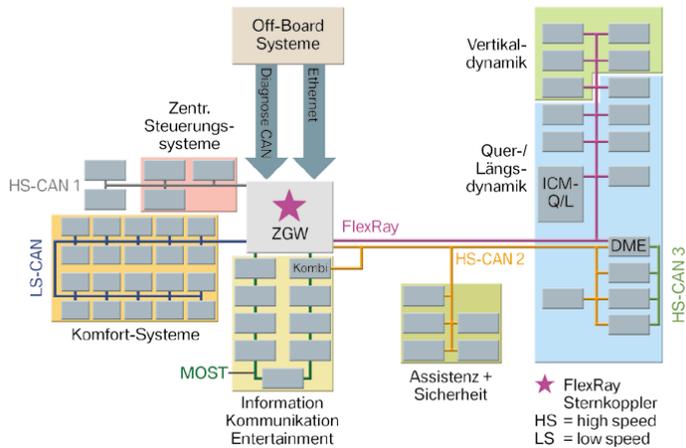


Abbildung 2.1.: Beispiel Kommunikationsnetz des BMW 7er F01 Modells von 2008 mit zentralem Gateway ohne LIN Subnetze [Kel+08]

Die Aufteilung kann sich von OEM zu OEM (Original Equipment Manufacturer, OEM) unterscheiden. Beispiele sind Antriebsstrang, Fahrwerk (Chassis), Komfort, Telematik und Infotainment [Rob14], [ST12].

Außerdem vereinen Domänen E/E-Systeme mit ähnlichen Anforderungen, anhand derer die in Tabelle 2.1 gezeigten Kommunikationsprotokolle für jedes Teilnetz ausgewählt werden. Darunter fallen Störsicherheit, Topologie, realisierbare Datenübertragungsrate, Echtzeitfähigkeit sowie die maximale Anzahl an Knoten [Rob14]. In den Domänen Telematik und Infotainment kommt aufgrund seiner hohen Bandbreite zumeist MOST zum Einsatz, in den Domänen Komfort, Chassis und Antriebsstrang das Controller Area Network (CAN) [ZS14], wobei sich bedingt durch ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis zwei Ausführungen mit unterschiedlichen Datenraten etabliert haben: der lowspeed CAN (CAN-B) und der highspeed CAN (CAN-C) [Rob14]. Das Local Interconnect Network (LIN) gilt als günstige Alternative zu CAN-B zur lokalen Vernetzung von Sensoren und Aktoren z.B. in der Tür [Rob14].

Neue E/E-Systeme wie X-by-Wire¹ erfordern hohe Datenübertragungsraten und eine deterministische, ausfallsichere Kommunikation. Die in Abbildung 2.1 gezeigte E/E-Architektur eines BMW 7er F01 aus dem Jahr 2008 zeigt den schrittweisen Übergang von CAN zum parallel eingesetzten FlexRay im Antriebsstrang [Kel+08]. Die zweikanalige Ausführung von FlexRay erlaubt ent-

¹Anwendungen, bei denen Systeme mit mechanischer Kraftübertragung durch elektronisch gesteuerte Systeme ersetzt werden. Beispielsweise entfällt bei Steer-by-Wire die Lenkstange. Sensoren im Lenkrad geben den Lenkbefehl an Aktoren auf der Achse weiter.

weder Redundanz zu nutzen oder die Datenrate auf 20 MBit/s zu verdoppeln [Bor14]. Alternativ können höhere Datenübertragungsraten durch CAN mit flexibler Datenrate (CAN FD) abgebildet werden. Im Gegensatz zur FlexRay Einführung erfordert dies keine Änderungen, da weiterhin der CAN Standard mit den zugehörigen Werkzeugketten zugrunde liegt [Bor14].

Neben den in Tabelle 2.1 gelisteten Protokollen und Technologien wurde das zur Vernetzung verteilter, fehlertoleranter Systeme mit harten Echtzeitanforderungen spezifizierte Time Triggered Protocol SAE Class C (TTP/C) im Automotive-Umfeld evaluiert. Doch trotz Datenraten von 25 MBit/s über 100-Base-Ethernet konnte sich TTP im Automobil aufgrund von Interessenskonflikten nicht durchsetzen [Bor14], insbesondere nicht nach Einführung von FlexRay und CAN FD. Es wird in der Luftfahrt eingesetzt [TTT05].

IP basiertes Ethernet wird im Fahrzeug zur Diagnose, vergleiche Abbildung 2.1, oder im Infotainmentbereich zum Austausch großer Datenmengen, wie Navigationskarten, verwendet. Heute sind mit dem IEEE 802.3 Standard für automotive Ethernet Übertragungsraten von 100 MBit/s möglich [Wit15]. Zukünftig sollen laut [Fel14] bis zu 1 GBit/s erreicht werden. Ethernet gilt als vielversprechende Alternative zu MOST oder sogar FlexRay, falls eine kostengünstige Echtzeitspezifikation umgesetzt werden kann [ZS14].

Bustyp	Übertragungsrate	Anwendung	Normen
LIN	$[\frac{kBit}{s}]$ 1...20	Sensor / Aktor-Steuerung	LIN Konsortium ISO 17987
CAN-B	$[\frac{kBit}{s}]$ 5...125	Komfort- und Karosseriebereich	ISO 11898-3
CAN-C	$[\frac{kBit}{s}]$ 125...1.000	Antriebsstrang (500 $\frac{kBit}{s}$), Kombi	ISO 11898-2, 5, 6
CAN FD	$[\frac{kBit}{s}]$ 47,6...500 Ziel 4 $\frac{MBit}{s}$	Antriebsstrang	ISO 11898-2
FlexRay	$[\frac{MBit}{s}]$ 10	Antriebsstrang, Sicherheitssysteme	FlexRay-Group ISO 17458
MOST	$[\frac{MBit}{s}]$ 25 / 50 / 150	Multimedia-Anwendungen	MOST Cooperation
Ethernet (BroadR-Reach)	$[\frac{MBit}{s}]$ 100	Diagnose, statt MOST? / statt FlexRay?	IEEE 802.3

Tabelle 2.1.: Im Fahrzeug eingesetzte Bussysteme [ZS14]

2.1.2. Trends in der Informations- und Kommunikationstechnik

Die Integration fortgeschrittener Fahrerassistenzsysteme (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS) erfordert, neben der Vernetzung bisher unabhängiger Domänen zur Realisierung, die Integration exterozeptiver Sensoren, Kameras, Radar oder Lidar, zur präzisen Umfelderkennung. Dies führt zu dem in Abbildung 1.2 gezeigten rapiden Wachstum der zu übertragenden Datenmenge. Kameras beispielsweise versenden statt einfacher Signale mit wenigen Bits Streaming-Daten [ST12], z.B. 70 MBit/s pro MJPEG-Video [Wit15]. Bis 2020 könnte sich die Datenmenge mehr als versechsfachen [Bol16]. Zur Beherrschung der Vernetzung einerseits und der hohen Datenströme andererseits gibt es bereits Ansätze zur Überarbeitung der etablierten IKT-Architektur.

Eine Möglichkeit ist die in [Wei+13] vorgestellte Kapselung aller DAS inklusive ihrer Umfelderkennung in einer neuen Domäne. Alternativ beschränkt sich [Sch11] auf die Bündelung aller zur Umfelderkennung benötigten Sensoren. Diese neue Domäne „iSense“ soll mittels Sensordatenfusion und der Nutzung redundanter Informationen verschiedener Sensoren die Auswertung von Fahr- und Verkehrssituationen qualitativ verbessern sowie den Ausfall einzelner Sensoren kompensieren [Sch11]. Die restlichen Domänen bleiben bestehen.

Neben der Übertragung müssen die Daten auch verarbeitet werden. Die erforderliche Rechenleistung steigt. Bereits heute enthält ein 7er BMW Baureihe G11 Software im Umfang von 5,6 GB. Alleine mehr als 2,4 Millionen Zeilen Code führt das Zentralsteuergerät aus [Bal16]. Ein weiteres Problem stellt die räumliche Verteilung (Packaging) der großen Zahl an Steuergeräten dar.

Domänenleiterschaltwerke für Funktionen mit hoher Rechenleistung und ein Datenbackbone² mit hoher Datenübertragungsrate anstelle von zentralen Gateways, wie in [Sch11] oder [Kla+15] gezeigt, sollen die Steuergerätezahl zukünftig eindämmen und den Datenaustausch garantieren.

Als Backbone ist der Einsatz von Ethernet wahrscheinlich [BAS16]. Den gesamten Funktionsumfang auf einigen wenigen, hochintegrierten sowie für automotiv zertifizierten Hochleistungsrechnern abzubilden sei in nächster Zukunft durch den hohen Energieverbrauch solcher Rechner jedoch nicht vorgesehen [BGS16].

²Aus dem englischen Rückgrat abgeleitete Bezeichnung für ein „System von Leitungen, die den Großteil der Daten innerhalb eines Computernetzwerks oder zwischen Computernetzwerken transportieren“ [Wis17].

Autonomes Fahren als größte Herausforderung

Vollautomatisiertes oder autonomes Fahren wird aktuell als eine der größten Herausforderung der Automobilbranche gesehen [BAS16], [BW15], mit großen Auswirkungen auf die Ausprägung der IKT [Rö15a], [For12]. Das benötigte exakte Umfeldmodell erfordert die 10- bis 100-fache Rechenleistung heutiger Systeme, einige 1000 DMIPS³ [Kla+15]. Die interne Vernetzung muss Datenraten von 1 Gbit/s und mehr und Latenzzeiten unter 1 ms ermöglichen [Kla+15].

Sicherheitsanforderungen steigen ebenfalls. Bereits die Vernetzung heutiger ADAS und X-by-Wire Systeme erschwert die Gewährleistung der Betriebssicherheit, da der Ausfall einer E/E-Komponente für das Gesamtsystem zunehmend kritisch ist. Die Anforderungen an die funktionale Sicherheit (FuSi / Safety) autonomer Fahrzeuge ist ungleich höher, da die Rückfallebene des Fahrers entfällt. Eine ausfallsichere, fail-operational Auslegung sicherheitsrelevanter Funktionen, wie etwa über Redundanzen, ist unerlässlich. Mit der durch die Vielzahl an Komponenten, Teilsystemen und Schnittstellen bestehenden Komplexität ist die FuSi nur mit hohem Aufwand darstellbar, weshalb eine Überarbeitung der IKT-Architektur naheliegt.

V2X - vom Einzelfahrzeug zur intelligenten Flotte

Vehicle-to-everywhere⁴ (V2X) Kommunikation hat das Potenzial, Sicherheit und Effizienz von Fahrzeugen weiter zu steigern. Beispiele zur Steigerung der Sicherheit sind die automatische Hinderniswarnung durch vorausfahrende Fahrzeuge [Sch+14] oder das ab 2018 europaweit in Neufahrzeugen verpflichtend eingeführte eCall-System [Eur15]. Letzteres verspricht schnelle Hilfe durch die automatische Verständigung des Rettungsdienstes im Falle eines Unfalls, während ersteres Unfälle vermeidet und durch geringere Stau- und Umweltbelastung die Verkehrseffizienz steigert.

Weitere Beispiele für die Steigerung der Effizienz sind eine bessere Verkehrsflusssteuerung mit Hilfe einer an den tatsächlichen Verkehr angepassten Infrastruktur oder eine Senkung des Verbrauchs des Fahrzeugs selbst durch eine adaptive Fahrweise. Die Vernetzung von Fahrzeugen ermöglicht es außerdem reale Felddaten zu sammeln, um über zugehörige Nutzerprofile Service

³Dhrystone MIPS (Million Instructions Per Second) bezieht sich auf ein standardisiertes Testverfahren, welches die mittlere Zeit bestimmt, die ein Prozessor für das Durchlaufen vieler Iterationen einer Schleife benötigt [ITW16].

⁴Die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander (Vehicle to Vehicle, V2V) und mit der Infrastruktur (Vehicle to Infrastructure, V2I)

und Wartung gezielt auf Kundenbedürfnisse zuschneiden zu können oder Nachbesserungsbedarf festzustellen [SWA14].

Die Vernetzung nach außen erfordert eine hohe Datensicherheit (Security) der Kommunikationsnetze. Beispielsweise könnte die Software-Architektur durch Zertifikate vor einer Korruption des Codes oder unbefugtem Zugriff geschützt werden [Rö15a]. Dies ist zur Erfüllung der FuSi unerlässlich, da Fehlverhalten in der Fahrfunktion zu einer schwerwiegenden Gefährdung der Fahrzeuginsassen und der Umwelt führen kann.

Flexible Updates ermöglichen Funktionen auf Abruf

Die schnelle Entwicklung im Consumer Electronic (CE)-Bereich prägt das heutige Produktverständnis und weckt Kundenwünsche bezüglich der Dauer von Innovationszyklen integrierter Fahrzeugfunktionen. Die Funktionen moderner Fahrzeuge sollen ähnlich einem Smartphone over-the-Air aktualisiert oder um neue Software-Applikationen (Apps) erweitert werden können [BAS16], [Kla+15].

Tesla Motors besitzt aktuell als einziger Fahrzeughersteller eine Software-Architektur, die über die gesamte Lebensdauer ihrer Fahrzeuge die Korrekturen softwarebasierter Fehler, Aktualisierungen und Erweiterungen mit neuen Apps über eine Funkverbindung zulässt [FV16], [Tes16b]. Statt aufwändiger Rückrufe in Werkstätten können erkannte Probleme und Sicherheitslücken schnell korrigiert werden [Bul14]. Selbst sicherheitsrelevante Funktionen sind über das Mobilfunknetz ausrollbar, wie die Aktualisierung des Autopiloten in etwa 70.000 Tesla Model S nach einem tödlichen Unfall zeigt [Bou09].

Weiterhin ermöglicht eine erweiterbare Architektur die Trennung des Verkaufs der Fahrzeuge selbst vom Verkauf neuer Apps, wie es durch die flottenweite Einführung des Autopiloten 2015 über ein 2.500 € teures Software-update demonstriert wurde [151].

AUTOSAR - Trennung von Applikation und Hardware

Die von der AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture) Initiative entwickelte, offene und standardisierte AUTOSAR-Layered-Software-Architecture abstrahiert die Hardware von Steuergeräten mit Hilfe verschiedener

Softwarekomponenten einer nicht-funktionalen Laufzeitumgebung, der Basissoftware (BSW). Die Trennung von Apps und ausführender Hardware ermöglicht, neben der Wiederverwendung wettbewerbsentscheidender Apps über mehrere Fahrzeuggenerationen und Modelle hinweg, auch die einfache und flexible Aktualisierung oder Erweiterung von Apps [Spr13]. Dies erhöht die Qualität bei gleichzeitiger Reduktion der Entwicklungskosten dieser Apps und zeigt damit bereits einen möglichen Weg zur Gestaltung zukünftiger IKT-Architekturen auf.

Diskussion von Ansätzen zukünftiger IKT-Architekturen

Die bestehende Domänenstruktur wird von [For12] als Hindernis zur effizienten Realisierung moderner vernetzter Funktionen gesehen. Insbesondere, da diese Separierung nicht nur im System, sondern auch in der internen Organisationsstruktur der OEM und dem Aufbau der verteilten Zulieferkette zu finden ist [BGS16]. Die Einführung einer systemweiten Trennung von Hardware und Apps über eine neue, funktionsunabhängige Softwareschicht, die Middleware⁵ zur Virtualisierung der Hardware und Kommunikation, wird von verschiedenen Quellen als vielversprechende Möglichkeit zur Umgestaltung mit vielen Vorteilen gesehen.

Zunächst ermöglicht die Trennung, die bestehende statische Kopplung zwischen Funktionsmodulen mit vielen versteckten oder direkten Abhängigkeiten zwischen integrierten Komponenten aufzulösen [Res+14], [Kü+14]. Ein dynamisches Funktionsdeployment (Dienste-Prinzip) ermöglicht die Modifikation der IKT zur Laufzeit, da Veränderungen der das System bildenden Komponenten berücksichtigt werden [Kü+14]. Apps können mittels Updates gewartet oder neue Funktionen über die Installation neuer Apps effizient integriert werden [Res+14].

Gleichzeitig können Technologien weiterentwickelt werden, ohne etablierte Services ändern zu müssen, wie dies bereits heute mit der Trennung von physischen Geräten zur Ausführung der Kommunikation und Routinen in Kommunikationsnetzwerken üblich ist, wie [LGM14] anhand einer „Multiple-Stack-Architecture“ darlegt. Damit können Apps ohne spezifisches Wissen über die physikalischen Zusammenhänge der ausführenden Hardware entwickelt werden [LGM14].

⁵Middleware, übersetzt Diensteschicht, bezeichnet eine generische Softwareplattform, die zwischen Anwendungen und Betriebssystem so vermittelt, dass verschiedene Aspekte verteilter Systeme verborgen werden, z.B. kann auf Ressourcen ohne Kenntnis über ihren exakten Speicherort zugegriffen werden [SS12].

Die Steuergerätezahl kann über ein flexibles Ressourcen-Management und die App-Verteilung durch die Middleware reduziert werden [Res+14]. Statt über neue Steuergeräte werden Funktionen über neu installierte Apps integriert. Ähnlich wie in der Avionik durch den Open Integrated Modular Avionics Ansatz, vergleiche [But07] und [AT14], ist der Einsatz weniger standardisierter Hochleistung-Rechner denkbar [For12].

Schließlich erlaubt die lose Kopplung der Komponenten durch Dienste eine funktionsunabhängige Umgestaltung der IKT-Architektur [Kü+14]. Sensoren und Aktoren können geometrisch optimal mit dem nächstgelegenen Steuergerät vernetzt werden. Dies ermöglicht eine klare Struktur der IKT-Architektur mit reduzierter Komplexität.

Bei solchen erweiterbaren Architekturen ist zur Zeit der Entwicklung der Funktionsumfang nicht wohldefiniert. Deshalb prägen funktionsübergreifende, nicht-funktionale Eigenschaften, wie fail-operational, die Auslegung solcher E/E-Architekturen. Ein Beispiel zur Gestaltung einer neuen IKT-Architektur, die nicht nur erweiterbar ist, sondern auch solche nicht-funktionalen Eigenschaften abbilden kann, wird in [Som+13] gegeben.

2.2. Energieversorgungsnetz

Das Energieversorgungsnetz dient zur Versorgung aller Verbraucher mit ausreichend Energie und Leistung. Es beinhaltet Bauteile wie Generatoren, Batterien, Kondensatoren, Sicherungen, Relais und die zur Vernetzung benötigten Kabel.

2.2.1. Status quo

Das konventionelle 12 V-Verteilnetz hat sich historisch entwickelt und ist heute etablierter Standard, wobei 12 V laut [PS16] nicht das technische Optimum sein muss. Ziel ist es, alle im Fahrzeug enthaltenen elektrischen und elektronischen Komponenten (Verbraucher) mit ausreichend Energie zu versorgen. Dabei hat sich für die Verteilung die in Abbildung 2.2 gezeigte Baumstruktur etabliert. Von einer zentralen Quelle – ein mit der Verbrennungskraftmaschine (VKM) gekoppelter Generator oder ein aus dem Hochvolt- (HV) Netz gespeister DC/DC-Wandler – wird die elektrische Energie mit 14 V Ladespannung über einen Energiespeicher, der Spannungsspitzen glättet, um sensible Elektronik zu schützen, in die Zweige verteilt [Bor14].

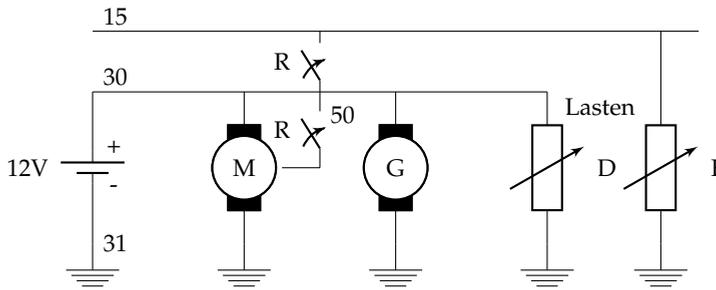


Abbildung 2.2.: Schematischer Aufbau der Energieversorgung eines Verbrennungsfahrzeugs [Rei10], [WR06]: Starter M, Generator G, 12V-Batterie und Dauerverbraucher D sind über Klemme 30 miteinander verbunden. Die Zündung aktiviert über Relais R den Starter und Fahrverbraucher F über Klemme 15 und 50.

Im Verbrennungsfahrzeug dient der elektrische Energiespeicher außerdem zum Starten der VKM. Deshalb muss der Generator so dimensioniert werden, dass unter allen möglichen Betriebsbedingungen nicht nur genügend Energie zur Versorgung der Verbraucher bereitgestellt wird, sondern auch genügend Energie zum Erhalt der Startfähigkeit in der Batterie gespeichert ist [Rob14]. Zu beachten ist hierbei, dass der vom Generator erzeugte Strom von der Drehzahl und folglich von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängt. Die sichere Versorgung unter extremen Fahrprofilen mit geringen Geschwindigkeiten und hohem Leistungsbedarf, wie eine Fahrt im Berufsverkehr im Winter, stellen hierbei hohe Ansprüche an die Auslegung. Sie dienen deshalb häufig als Grundlage der Auslegung [Rob14].

Ein im Fahrzeug eingesetzter Energiespeicher muss nach [Bor14] im allgemeinen folgenden Anforderungen genügen:

- hohe Energiedichte pro Volumen und pro Masse
- hoher Wirkungsgrad
- geringe Selbstentladung
- einsatzfähig in einem extremen Temperaturbereich
- mehrjährige Lebensdauer trotz rauer Betriebsbedingungen

Die als Speicher im Fahrzeug etablierte Blei-Säure-Batterie erfüllt diese Kriterien ausreichend. Ihre Kapazität muss so dimensioniert werden, dass trotz Ruhestromen zwischen 10 mA und 70 mA, z.B. zur Versorgung der Alarmanlage, die Startfähigkeit über längere Zeit aufrecht erhalten werden kann.

Parameter	elektronischer Leistungsschalter	Schmelzsicherung und Relais
I_N [A]	0,5-40	1-40
mech. Verschleiß	nein	ja
$R_{DSon/Co}$ [$m\Omega$]	1 (40 A)	16,5
m [g]	2	35
ΔU [V]	100-40	238-158
P_v [W]	1,5	6
Zyklen [-]	500.000	200.000
FIT Rate	0.5	236 (Relais)

Tabelle 2.2.: Vergleich verschiedener Kennwerte von Halbleiterschaltern mit Schmelzsicherungen oder Relais: zulässiger Nominalstrom I_N , Widerstand $R_{DSon/Co}$, Gewicht m , Spannungsabfall ΔU , Leistungsverlust P_v , Schaltzyklen und FIT Rate [Dre15], [Sto14].

Beim Start der VKM sind Leistungen von 0,7 kW bis 2 kW zu erbringen, wobei für 0,3 s bis 3 s Ströme zwischen 300 A und 1000 A fließen. Bei niedrigen Temperaturen kann sich dieser Leistungsbedarf sogar verdoppeln [Rob14]. Grund hierfür ist die höhere Viskosität des Motoröls, die die zu überwindende Bremsleistung des Motors steigert. Gleichzeitig verringert sich die Leitfähigkeit des Elektrolyten bei sinkenden Temperaturen und die verfügbare Kapazität und Stromstärke der Batterie nimmt ab [WJ06]. Außerdem sorgt die Batterie dafür, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten oder im Leerlauf E/E-Komponenten weiterhin versorgt werden. In diesem Betriebsbereich fließen Ströme zwischen 20 A und 70 A.

Für zusätzliche Anforderungen, wie erhöhte Vibrationsfestigkeit für Fahrten im Gelände oder hohe Korrosionsbeständigkeit bei warmem Klima, gibt es spezielle Weiterentwicklungen der bewährten Blei-Säure-Technik [Rob14].

Die Absicherung des Energieversorgungsnetzes ist hierarchisch und sollte selektiv erfolgen, damit ein Fehler isoliert abgeschaltet werden kann, ohne übergeordnete Zweige zu beeinflussen [PS16]. Die Hauptsicherungsbox wird meist nahe der Batterie platziert, darunter befinden sich gestaffelt weitere Verteilknoten. Dies ermöglicht eine flexible Integration neuer Komponenten, wie z.B. die Erweiterung um kundenspezifische Funktionen [PS16].

Tabelle 2.2 vergleicht ausgewählte Parameter verschiedener, für die Absicherung eingesetzter Schalt- und Sicherungselemente. Relais werden sowohl in Verteil- und Sicherungsboxen als auch direkt auf Steuergeräten verbaut und sind [PS16] zufolge heute bei Strömen über 10 A kostentechnisch den alternativen Halbleiterschaltern vorzuziehen. Dagegen werden Schmelzsicherungen

primär zur Absicherung von Leitungsfehlern wie Kurzschlüssen verwendet, da sie sehr günstig sind und dort ihr irreversibles Verhalten aufgrund der geringen Auftretswahrscheinlichkeit annehmbar ist [PS16].

Trotz allem sind Schmelzsicherungen in einfach zugänglichen Bauräumen anzubringen, da sie im Fehlerfall austauschbar sein müssen [PS16]. Deshalb befinden sich zumeist im Motorraum und im Fußraum des Fahrers zentrale Sicherungsboxen mit allen Schmelzsicherungen. Die Auswahl der passenden Schmelzsicherungen erfolgt anhand der zulässigen elektrischen und thermischen Belastung der zu sichernden Leitung.

Die elektrischen Verbraucher im Fahrzeug können nach Tabelle 2.3 anhand verschiedener Merkmale klassifiziert und zusammengefasst werden. Die Einteilung nach Funktion und der umgewandelten Energieform ermöglicht die Unterscheidung gleichartiger Verbraucher. Sensoren haben gemeinsam, dass sie physikalische oder chemische Eigenschaften ihres Umfelds ermitteln können. Steuergeräte verarbeiten oder speichern Messgrößen und steuern abhängig davon Aktoren an. Aktoren wiederum wandeln elektrische Energie in unterschiedliche Energieformen wie Licht oder Bewegung um.

Klassifizierung	Quelle	Klassen	Beispiele
Nach Funktion und Energieform		Sensoren	Radar, Kamera
		Steuergeräte	ABS
		Aktoren	Licht, Motoren
Nach Aufgaben	[Fab06]	Grundlast	Motormanagement
		Sicherheit	Licht, ABS
		Standard-/	Klimaanlage
		Luxuskomfort	4 Fensterheber
Nach Einschaltzeit	[Rob14]	Dauer	Motormanagement
	[Fab06]	Langzeit	Licht
		Kurzzeit	Fensterheber
Nach Leistungsbedarf	[WR06]	Niederstrom	Licht
		Hochstrom	Wankstabilisierung

Tabelle 2.3.: Möglichkeiten der Klassifizierung elektrischer Verbraucher

Für die Auslegung der Energieversorgung ist insbesondere der durchschnittliche und maximale Leistungsbedarf der Verbraucher sowie ihr zeitliches Verhalten entscheidend. Dauerverbraucher sind nach Starten des Fahrzeugs immer aktiv, während Langzeitverbraucher bei Bedarf zugeschaltet werden, danach jedoch in der Regel längere Zeit eingeschaltet bleiben [Rei10].

Diese Grundlast ist abhängig von Witterungsbedingungen, wie Temperatur

und Regen, sowie Lichtverhältnissen und persönlichen Präferenzen des Fahrers, z.B. bezüglich Klimatisierung der Fahrgastzelle. Hinzu kommen Kurzzeitverbraucher mit teilweise hohem Leistungsbedarf. Die gewählte Strecke und der Fahrstil beeinflussen ebenfalls das Zuschalten bestimmter Verbraucher.

Eine langfristig ausgeglichene Leistungsbilanz zwischen Energieversorgung und -verbrauch stellt die elektrische Versorgung sicher. Weiterhin muss die Spannungsstabilität trotz volatiler Kurzzeitverbraucher mit hoher Leistungsaufnahme, z.B. die Electric Power Steering (EPS), gewährleistet werden können, um ungewolltes Fehlverhalten, wie das Abschalten von Steuergeräten, zu verhindern. Mit der Integration sicherheitsrelevanter Komponenten, z.B. elektrischen Bremsen, muss außerdem sichergestellt werden, dass diese auch bei Versorgungsengpässen mit ausreichend Energie versorgt werden.

Die Tabellen C.1 bis C.5 geben einen Überblick über typische in der Literatur aufgeführte Verbraucher und ihren durchschnittlichen und maximalen Energieverbrauch. Dabei fällt einerseits die teils große Differenz zwischen diesen beiden Leistungsangaben auf. Ein Grund hierfür kann die Ermittlung der durchschnittlichen Verbrauchswerte sein. Anstatt auf Basis der eigentlichen Einschaltzeit des Verbrauchers können diese Werte auch anhand eines kompletten Fahrzyklusses berechnet worden sein [Hes11]. Außerdem unterscheiden sich einige maximale Leistungsangaben aus verschiedenen oder sogar derselben Quelle. Gründe hierfür können unterschiedliche Messverfahren, Komponentenausführungen oder Abschätzungen von Leistungswerten noch nicht eingeführter Verbraucher sein.

Die Dimensionierung der Versorgungsleitungen legt über das Verhältnis der Länge l zum Querschnitt A den Leitungswiderstand fest:

$$R_l(T) = \frac{\rho(T) \cdot l}{A}, \quad (2.1)$$

wobei der spezifische Widerstand ρ abhängig vom Temperaturkoeffizienten α und der Temperatur T ist [DF11]

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)). \quad (2.2)$$

Er beträgt für Kupfer bei 20°C $18.5 \frac{\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$. Die Verlustleistung ergibt sich zu

$$P_V = I^2 \cdot R_l. \quad (2.3)$$

Als Randbedingung für die Dimensionierung gelten zwei Größen: die zulässige Erwärmung bei Dauer- und Spitzenlast wie Kurzschlussströme im Fehlerfall und der gestattete Spannungsabfall bei der Versorgung des angeschlossenen Verbrauchers [Bor14]. Als zulässige Stromdichten werden für Dauerlast

Werte bis $5 \frac{A}{mm^2}$ und für kurze Spitzenlasten $10 \frac{A}{mm^2}$ angegeben. Ein Richtwert für den Spannungsabfall ist maximal 0,5 V bei 21 W Belastung [Rei14].

Damit legen die Verbrauchswerte die Randbedingungen für die Dimensionierung der Versorgungsleitungen fest. Referenz [Dre15] gibt an, dass bei einem voll ausgelasteten System mit einem 1300 kW-Generator bis zu 140 W Verluste durch die Leitungen entstehen. Die untere Querschnittsgrenze wird durch die Montage bedingt. Für eine ausreichende Leitungsfestigkeit werden laut [Rei10] $0,5 \text{ mm}^2$ vorausgesetzt, mit zusätzlichen Vorkehrungen wie Schutzrohre sind $0,35 \text{ mm}^2$ zulässig.

Weiterhin beeinflusst die Absicherung die minimal erforderlichen Leitungsquerschnitte. Die Alterung von Schmelzsicherungen erfordert laut [Jai15] eine Überdimensionierung um 20%. Statt einer 30 A- wird eine 36 A-Sicherung benötigt. Allerdings gibt es nur eine standardisierte SI40A Schmelzsicherung. Um eine unzulässige Erwärmung durch höhere Abreissströme zu verhindern, müssen die Leitungsquerschnitte ebenfalls überdimensioniert werden, in diesem Beispiel sind 4 mm^2 statt $2,5 \text{ mm}^2$ erforderlich [Jai15].

Das heute realisierte konsequente Absicherungskonzept erfordert eine hohe Anzahl an Sicherungselementen [PS16]. Typische B-Segment-Fahrzeuge⁶ haben gemäß [Dre15] Sicherungsboxen mit etwa 40 Sicherungen und 4 Relais, während Fahrzeuge im D-Segment über 100 Schmelzsicherungen besitzen. Zusätzlich zu den Leitungsverlusten errechnet [Dre15] für das erwähnte System mit 1300 kW-Generator einen Verlust von 2,5 W pro Relais, also insgesamt 10 W, und etwa 125 W durch die thermische Absicherung. Der Energieverlust durch die Relais und Schmelzsicherungen summiert sich auf etwa 10% der gesamten elektrischen Energie im Fahrzeug.

Zusammen mit den Leitungsverlusten ergeben sich Verluste von etwa 20% der Gesamtenergie durch das Energieverteilnetz [Dre15].

2.2.2. Trends in der Energieversorgung

Parallel zur Zunahme an Elektronik ist auch die Zahl elektrischer Komponenten im Fahrzeug und folglich der Leistungsbedarf auf heute teils bis zu 3 kW deutlich gestiegen [WR06]. Neben der Steigerung des Komforts der Insassen soll die Elektrifizierung mechanischer und hydraulischer Systeme den Energieverbrauch senken. Grund hierfür sind insbesondere die immer strengeren Gesetze zur Reduktion der CO_2 -Emissionen, vergleiche [Eur14], [Cen17].

⁶In dieser Arbeit wird auf die Definition der verschiedenen Fahrzeugsegmente in [Com03] zurückgegriffen. Das A-Segment umfasst Kleinstwagen wie smart, B-Segment Kleinwagen wie Ford Fiesta, C-Segment Mittelklasse wie 1er BMW, D-Segment obere Mittelklasse wie 3er BMW, E-Segment Oberklasse wie 5er BMW bis zu Luxusautos im F-Segment wie S-Klasse.

Die Energieversorgung elektrischer Nebenaggregate kann bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden. Sie ist folglich unabhängig vom Motor und der Geschwindigkeit. Damit generieren mechatronische Systeme mehr Freiheitsgrade in der Regelung und Optimierung der Energieverteilung [CP15].

Allerdings kann der hohe Leistungsbedarf zu kritischen Spannungsabfällen führen und die Funktionalität elektrischer Komponenten einschränken. Für elektrifizierte, sicherheitskritische Systeme ist dies nicht akzeptabel. Das etablierte Energieversorgungsnetz stößt an seine Grenzen.

Einführung einer 48 V-Spannungsebene

Um die Jahrtausendwende wurde bereits über die Einführung einer 42 V-Spannung zur kosteneffizienten Deckung des wachsenden Energiekonsums im Fahrzeug diskutiert [Bor14]. Selbst bei Spannungsschwankungen wird bei 42 V die Berührungsschutzgrenze von 60 V nicht überschritten, weshalb keine zusätzliche Absicherung erforderlich ist. Gleichzeitig sollten Ströme bei gleicher Leistung um etwa Faktor drei gesenkt werden. Erwartet wurde eine Senkung der Leistungselektronikkosten durch 20% kleinere Chipgrößen, bis zu 6 kg Gewichtseinsparung mittels kleinerer Leitungsquerschnitte und eine Steigerung der Effizienz, z.B. des Generators, von 40% auf 85% [Gra01].

Während die Entwicklung an diesem 42 V-Netz eingestellt wurde, kündigten 2011 mehrere Hersteller die Einführung eines 48 V-Netzes an, vergleiche Abbildung 2.3. Erst die Skalierbarkeit von Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ionen) ermöglicht es, ein Netz so knapp unter der Berührungsschutzspannung von 60 V zu realisieren. Weiterhin werden inzwischen die hohen Entwicklungskosten einer 48 V-Spannungsebene durch die notwendige Reduzierung der CO_2 -Emissionen gerechtfertigt [Dör+12]. Der Betrieb von Hochleistungsverbrauchern ist auf höheren Spannungsebenen deutlich effizienter.

In der Praxis sind aufgrund des erforderlichen hohen technischen Aufwands gemäß [Dör+12] Ströme zwischen 200 A und 300 A als grenzwertig und über 300 A als kritisch einzustufen. Daraus ergibt sich eine maximale stationäre Leistung von 14,4 kW im 48 V-Netz statt der 3,6 kW im 12 V-Netz. Damit bietet die 48 V-Spannungsebene [PS16] zufolge sogar eine interessante Alternative zu den bisher eingesetzten HV-Systemen in gering elektrifizierten Hybridfahrzeugen. Aufgrund der geringeren Isolationsvorschriften bei Systemen unter 60 V ist der Betrieb mit 48 V kostengünstiger bei akzeptabler Leistung z.B. für Rekuperation. Der Einsatz eines 48 V-Systems sei insbesondere für die mittleren Fahrzeugsegmente C und D vielversprechend, da einerseits der Kostenfaktor entscheidender ist als bei Oberklassefahrzeugen und ande-

rerseits die CO₂-Zielwerte höher sind als bei Kleinwagen [CP15]. Im Gegensatz zur 42 V-Ebene ist das 48 V-System nicht als Ersatz für die 12 V-Ebene geplant, sondern soll parallel zu ihr betrieben werden. Die Erhöhung der Leistungsfähigkeit bietet Chancen bei der Versorgung der zunehmend verbreiteten Komfortausstattungen wie individuelle Klimaanlage, Sitzheizung, Navigation und ADAS [CP15]. Zusätzlich ermöglicht eine höhere Spannungsebene die Integration neuer Hochleistungsfunktionen, beispielsweise der Wankstabilisierung.

Dagegen sollen Komponenten wie Steuergeräte, die mit 3 bis 5 V Spannung arbeiten, aufgrund der niedrigeren Kosten auf der 12 V-Seite bleiben. Referenz [Bor14] verknüpft diese Aussage mit dem Argument, dass heute eingesetzte lineare Spannungsregler hohe Leistungsverluste haben und Schaltnetzteile teuer, groß und EMV belastet sind. Mit effizienten Wandlern wäre also langfristig die komplette Umstellung auf ein 48 V-System denkbar.

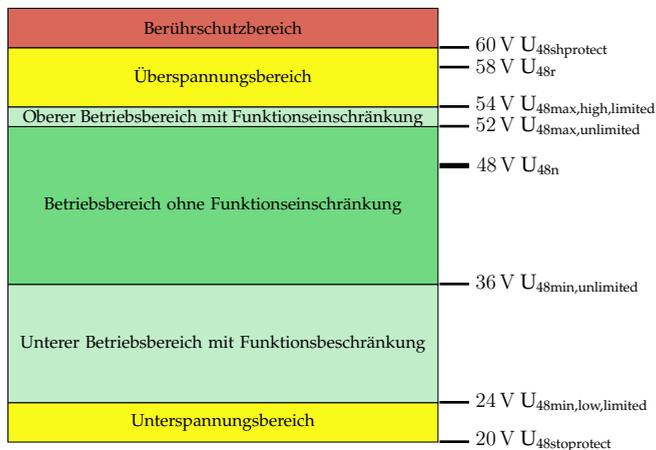


Abbildung 2.3.: Definierte Spannungsbereiche des 48 V Systems [Dör+12].

Einsatz mehrerer Energiespeicher

Die Aufgaben der Blei-Säure-Batterie haben sich mit der Zunahme an elektrischen Komponenten, die auch im Fahrzeugstillstand oder bei abgeschaltetem Motor aktiv sind, wie die Sitzheizung, zunehmend zu der einer zusätzlichen Energieversorgung gewandelt [Bor14]. Deshalb besitzen Fahrzeuge mit hohem Funktionsumfang oft ein Zwei-Batterien-Konzept mit einer Starter- und

einer Bordnetz-Batterie [PS16]. Vorteil des Zwei-Batterien-Konzepts ist, neben der erhöhten Startzuverlässigkeit, die Möglichkeit einer Rückfallebene, falls die Leistungsfähigkeit der Hauptbatterie nicht ausreicht [PS16]. Zukünftig ist es denkbar, dass zur Garantie der Spannungsstabilität oder zur Abbildung einer fail-operational Versorgung für sicherheitskritische Funktionen ein Minimum von zwei Energiequellen Voraussetzung ist.

Allerdings erhöhen sich neben der Zuverlässigkeit auch Kosten und Gewicht. Deshalb gibt es inzwischen Bestrebungen, wieder zu einem Konzept mit einer großen Batterie kombiniert mit einem intelligenten Lastmanagement zurückzugehen, z.B. 95 Ah beim Mercedes SL [EWF13].

Einsatz von Doppelschichtkondensatoren und Lithium-Ionen-Batterien

Aufgrund neuer Funktionen wandeln sich die Anforderungen an die Speichertechnik. Blei-Säure-Batterien eignen sich wegen ihrer geringen Zyklfestigkeit von maximal 2000 Zyklen [Rei14] nur bedingt für die Nutzung von Rekuperationsenergie beim Bremsen oder Start-Stopp-Funktionen zur Reduktion des Verbrauchs und der Emissionen [Bor14]. Für solche Aufgaben werden nach [Bor14] überarbeitete Varianten, Absorbent Glass Mat (AGM) oder Enhanced Flooded Batterien (EFB), verwendet.

Aufgrund ihrer hohen Zyklfestigkeit von etwa 5.500 Zyklen und guten Wirkungsgraden von 95%, 15% höher als die von Blei-Säure-Batterien, eignen sich auch Li-Ionen-Batterien für diese Funktionen [WJ06]. Die Energie- und Leistungsdichten von Li-Ionen-Batterien liegen ebenfalls über denen von Blei-Säure-Batterien, vergleiche Abbildung 2.4.

Doppelschichtkondensatoren, sogenannte Super- oder Ultracaps, sind eine weitere Alternative, da sie über sehr hohe Leistungsdichten bei einer hohen Zyklfestigkeit von über 100.000 Zyklen verfügen. Aufgrund ihrer großen Lade- und Entladeströme können Supercaps im Gegensatz zu Batterien in kurzer Zeit auf- oder entladen werden [Rei14]. Deshalb bietet sich ihr Einsatz auch bei der Bereitstellung der hohen Startströme von VKM an. Allerdings zeigt Abbildung 2.4, dass die spezifische Energiedichte von Ultracaps, also ihr Energieinhalt bezogen auf das Gewicht, geringer ist als bei Batterien, weshalb sie sich nicht zur langfristigen Versorgung von Verbrauchern eignen.

Ein Beispiel für den vorteilhaften Einsatz mehrerer Quellen, passend zu ihren spezifischen Eigenschaften, ist das seit 2008 in der BMW-Flotte verwendete System zur Bremsenergieerückgewinnung. Ein zu einem Multi-Voltage-Generator parallel integrierter Supercap wird durch die in Bremsphasen überhöhte Spannung des Generators geladen, während ein DC/DC-Wandler das restliche Energienetz inklusive Batterie mit einer konstanten Spannung versorgt.

Die durch die genutzte Rekuperationsenergie erwartete Verbrauchssenkung beträgt 0,3-0,7% [Chr09].

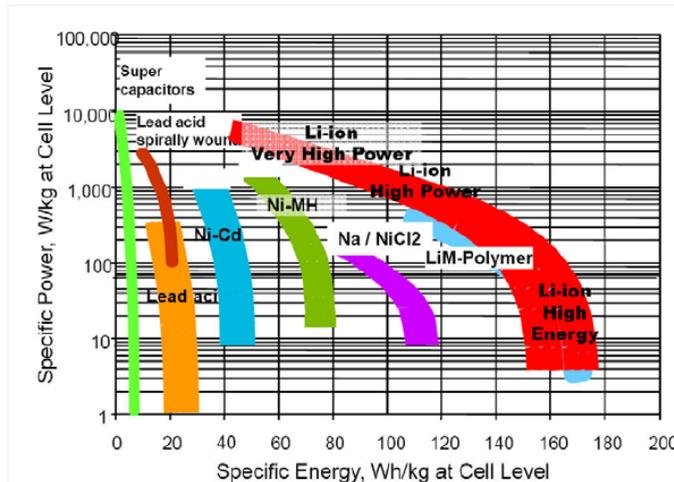


Abbildung 2.4.: Ragone-Diagramm von Zellen gebräuchlicher Akkumulatoren [Han+09]

Absicherung mit Hilfe von Halbleitern

Die Auslegung des Energieversorgungsnetzes bestimmt maßgeblich das Gewicht und die Verluste im Kabelbaum und folglich die durch das Energieversorgungsnetz verursachten CO_2 -Emissionen. Die in Kapitel 2.2 dargestellten Übertragungsverluste von circa 20% der Gesamtenergie haben Emissionen von etwa $10 \text{ gCO}_2/\text{km}$ zur Folge.

Bestehende Leistungsverteiler könnten laut [GKR13] durch den Einsatz von Halbleitern statt Relais deutlich kleiner und im dort dargelegten Beispiel mit weniger als der Hälfte des aktuellen Gewichts realisiert werden. Grund hierfür sei die Weiterentwicklung von Halbleitern, so dass sie zukünftig Relais in heute nicht ökonomischen Strombereichen ersetzen könnten [GKR13]. Bei vielen Funktionen könnte dies die Kosten reduzieren. Außerdem haben Halbleiter im Gegensatz zu Schmelzsicherungen schnelle und konstante Schaltgeschwindigkeiten [GKR13]. Die dadurch mögliche Einsparung der bisher erforderlichen Überdimensionierung der Versorgungskabel könnte laut [Jai15] das Gewicht um bis zu 10 kg reduzieren, wobei nicht angegeben wird, auf

welcher Basis sich diese Ersparnis berechnet.

Der Einsatz von Halbleitern ermöglicht nicht nur kleinere Querschnitte und eine Verringerung des Gewichts, sondern auch eine höhere Netzstabilität, wie [SF+14] anhand intelligenter Stromverteiler kombiniert mit einem Energiebackbone zeigt. Dies ist durch die Wartungsfreiheit, die neue Bauorte ermöglicht, realisierbar. Referenz [Dre15] weist darauf hin, dass nur durch eine solche neue Partitionierung des Energieversorgungsnetzes ausreichend Systemvorteile gehoben werden können, um die Einführung von Halbleitern zu rechtfertigen. Das alleinige Ersetzen von Schmelzsicherungen würde dies nicht tun. Vorteile wären dann neben kleineren Querschnitten auch kürzere Leitungslängen, ein einfacheres Packaging, geringere Verluste und Temperaturbelastungen und die Möglichkeit zur Diagnose [Sto14], [Dre15], [BGS16]. Die Modularität des Kabelbaums steigt und damit verbessert sich die Automatisierbarkeit und Handhabung in der Produktion.

2.3. Kabelbaum

Der Kabelbaum oder Leitungssatz beinhaltet alle Leitungen zur Energie- und Signalverteilung innerhalb eines Fahrzeugs.

2.3.1. Status Quo

Aufgrund abweichender Anforderungen bezüglich Abdichtung, Temperatur oder Vibration wird der Kabelbaum oft in verschiedene Module, z.B. Motorraum und Karosserie, unterteilt [Rei14]. Während 40 Leitungen und 60 Kontakte zur Energieversorgung in einem Mercedes-Benz Typ 170V ausreichen [Ern14], enthielt eine S-Klasse 2013 laut [Jur14] 488 Leitungssatz-Module mit insgesamt bis zu 2843 Leitungen und 1102 Stecker. Ein Audi A4 Modelljahr 2013 kann bis zu 121 Busverteiler, 2848 Kontakte in 549 Steckgehäusen und 3104 m Leitungen beinhalten [Pre15]. Hinzu kommen Schutz- und Anbauteile. Der Leitungssatz des BMW 7 G11 wiegt 47 kg [MB15].

Seit den 1990er-Jahren entwickeln deutsche OEMs statt modulatorientierten Stufenleitungssätzen kundenspezifische Kabelsätze (KsK) [Naz14]. Der KsK wird fahrzeugbezogen anhand der individuell vom Kunden gewählten Ausstattung produziert und geliefert [Jur14]. Im Gegensatz zum Stufenleitungssatz besitzt der KsK keine überflüssigen Komponenten.

Das Fehlen sogenannter verschenkter Ausstattung (Give-Away) sollte Material und damit Gewicht und Produktionskosten einsparen. Allerdings treibt der Entwurf und die Verifizierung der immensen Variantenvielfalt die Entwicklungskosten des KsK ebenso in die Höhe, wie die aufwändige Logistik und Produktion von Fahrzeugen mit der Losgröße eins. Gemäß [OM15] sind die theoretisch möglichen Varianten des KsK für den deutschen Markt von 16 Milliarden beim VW Golf 5 auf 425 Milliarden beim VW Golf 7 angestiegen.

2.3.2. Trends im Kabelbaumentwurf

Das Verwenden intelligent gewählter Module als Optimum zwischen benötigten Varianten und der Befriedigung individueller Kundenwünsche könnte die Variantenvielfalt bei minimalen Give-Away-Kosten reduzieren [Rei15]. Ein solcher intelligenter Stufenleitungssatz sei günstiger als der KsK.

Aluminium statt Kupfer

Der Ersatz von Kupferleitungen durch Aluminium soll das Leitungsgewicht trotz massiver Funktionszunahme konstant halten oder sogar senken [Ern14]. Beispielsweise kann alleine das Ersetzen der Batterieleitung zu einer deutlichen Gewichtsreduktion führen, insbesondere wenn die Batterie im Kofferraum verbaut ist [Reg+11].

Problematisch ist, dass Aluminium zwar um 70% leichter ist als Kupfer, aber auch die Leitfähigkeit mit $37,7 \cdot 10^6 \text{S/m}$ deutlich unter der von Kupfer mit $59,9 \cdot 10^6 \text{S/m}$ liegt [Vin16]. Für dieselbe Übertragungsleistung benötigen Aluminiumleiter folglich einen höheren Querschnitt, weshalb ein Optimum zwischen Bauraumverfügbarkeit, Gewichtseinsparung und erforderlichen Biegeradien gefunden werden muss. Der Bauraumbedarf kann durch die Ausführung als Flachleitung reduziert werden [Reg+11].

2.4. Modellbasierte E/E-Architekturentwicklung

Wie in den vorherigen Kapiteln dargelegt, hat der Umfang an Funktionen und daraus resultierend E/E-Systemen im Fahrzeug in den letzten Jahren

stark zugenommen. Ferner wird der Entwurf von E/E-Architekturen mehrerer Baureihen zur Reduktion der Entwicklungskosten gebündelt. Dies hat zur Folge, dass ein ganzheitlicher E/E-Architektorentwurf ohne eine werkzeuggestützte formale Modellierung mit konsistenter Datenerhaltung nicht mehr möglich ist [RSB08].

Deshalb ist die modellbasierte Entwicklung heute in frühen Entwicklungsphasen der E/E-Architektorentwicklung eine unverzichtbare Ergänzung zu Hardware-Prototypen. Sie ermöglicht die Generierung eines systemübergreifenden Verständnisses, dass für die ganzheitliche Betrachtung von Funktionalität, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Implementierung unentbehrlich ist [Rob14]. Modelle ermöglichen eine einfache Analyse und Bewertung verschiedener Alternativen und erhöhen damit die Effizienz der Entwicklung bei hohem Absicherungsgrad und Produktqualität [RSB08].

2.4.1. Status Quo

In der Automobilindustrie basiert der Ablauf des Produktentstehungsprozesses (PEP) auf einer hierarchischen, verteilten Zulieferkette. Der OEM trägt die Verantwortung für das Fahrzeug. Er spezifiziert die zu liefernden Komponenten und integriert sie zu einem System. Hierfür koordiniert er System- und Komponentenzieferanten (Original Equipment Supplier, OES), die weitere Zulieferer aussteuern. Die Herausforderung des PEP ist es, termingerecht, zu einem für den Kunden akzeptablen Preis, ein neues, innovatives Produkt zu liefern, welche die vom Hersteller angestrebte Rendite erzielt [PS16]. Die Dauer und der genaue Ablauf des PEP bis zum Produktions- und Verkaufstart (Start of Production, SOP) unterscheiden sich, abhängig von den jeweiligen Kompetenzen, von OEM zu OEM [ST12]. Abbildung 2.5 zeigt das Mercedes-Benz-Development-System (MDS) als Beispiel eines möglichen Ablaufs. Auffällig ist der durchgängige Einsatz digitaler Prototypen vor den realen Aufbauten. Die modellbasierte Entwicklung ermöglicht sehr früh virtuelle Erprobungen und Absicherungen von Entwürfen [Gei10]. Die Entwicklungszeit und die Kosten werden bei hoher Qualität und Reifegrad der Bauteile reduziert.

Aufgrund der vielen Wechselwirkungen zwischen E/E- und Fahrzeugentwicklung ist es unerlässlich, trotz der verteilten Entwicklung einen solchen durchgängigen Entwicklungsprozess zu generieren [SZ16]. Hierfür hat sich das in Abbildung 2.6 gezeigte V-Modell zur hierarchischen Abbildung einzelner Entwicklungsschritte in der Automobilindustrie etabliert. Kundenanforderungen, Normen und Gesetze bilden die Basis für die Spezifikation des

zu integrierenden Funktionsumfangs durch den OEM. Daraus leitet sich anschließend der Entwurf des Systems ab. In ihm werden alle vernetzten Funktionen, ihre Schnittstellen und ihr Kommunikationsaufkommen beschrieben. Dies bildet die Basis für die Spezifikation der Anforderungen an die darunterliegenden Komponenten als Grundlage für die Entwicklung beim OES. Diesem top-down-Prozess steht ein bottom-up-Prozess gegenüber, in welchem die anschließende Integration der Einzelkomponenten zum Gesamtsystem über verschiedene Testebenen beschrieben wird. Beginnend bei Komponententests über Integrations- und Systemtests bis hin zur Validierung des Systementwurfs im Gesamtfahrzeug [ST12].

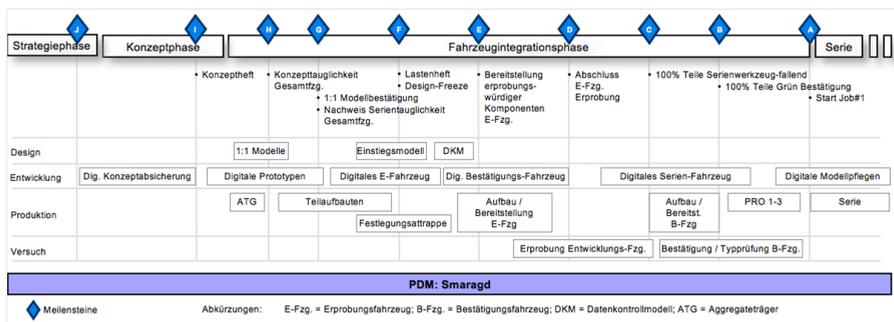


Abbildung 2.5.: Produktentstehungsprozess bei Mercedes-Benz-Cars [Gei10]

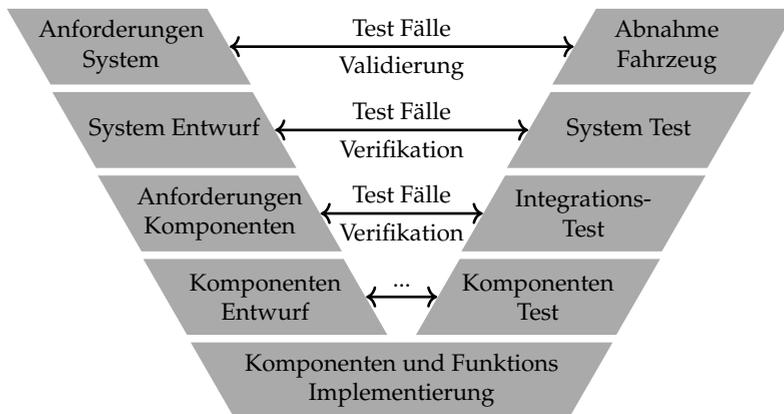


Abbildung 2.6.: V-Modell als Grundlage der Entwicklung von E/E-Systemen

Graphische Modelle zur strukturierten, formalen Darstellung einer E/E-Architektur ermöglichen eine ganzheitliche Beschreibung, die den Entwurf und die Analyse vereinfacht sowie Änderungen dokumentiert [Jä12]. Ein Beispiel ist die Electric Electronic Architecture-Analysis Design Language (EEA-ADL), die auf verschiedenen hierarchischen Ebenen sowohl die Beschreibung als auch die Bewertung der E/E-Architektur erlaubt [Jä12]. Heute eingesetzte Werkzeuge zur Unterstützung des Entwurfs, als Beispiel sei hier PREEVision genannt [Vec13], basieren auf dieser Beschreibungssprache. Das in [ST12] gezeigte Modell zur strukturierten Beschreibung der E/E-Architektur zeigt ebenfalls große Ähnlichkeit mit EEA-ADL. Eine alternative Darstellung ist die extra zur Beschreibung von E/E-Architekturen im Fahrzeug entwickelte MOdellbaSierte Systementwicklung (MOSES) [Fra06].

Alle diese Modelle verbindet eine am V-Modell orientierte Darstellung zeitlich nacheinander ablaufender Arbeitsschritte zur hierarchischen Dekomposition der E/E-Architektur. Basierend auf den Anforderungen der kundenerlebbaren Funktionen (Automotive Functions) leitet sich die technologieunabhängige logische Architektur inklusive Schnittstellen und Datenbeziehungen für die Kommunikation ab. Die technische Realisierung wird daraus auf der nächsten Ebene über die Partitionierung der sich ergebenden Softwareblöcke auf benötigter Hardware, z.B. Sensoren, definiert.

Während die MOSES Beschreibung sich nach [Fra06] auf diese Bereiche beschränkt, beinhaltet EEA-ADL zusätzlich die Ebenen Leitungssatz und Topologie. Der Leitungssatz leitet sich aus den logischen Verbindungen des benötigten Kommunikations- und Energieversorgungsnetzwerks ab. Er beschreibt real benötigte Leitungen inklusive Trennstellen, Ausbindungen, Pins und Stecker. Die Topologie beinhaltet das Packaging und Routing [Jä12].

Auch der Ablauf der Arbeitsschritte im Standard ISO 26262 für die Entwicklung sicherheitsrelevanter E/E-Systeme folgt einem solchen hierarchischen Ebenenaufbau [ISO15]. Zunächst wird das allgemeine Safety-Konzept definiert, um anschließend in drei verschachtelten V-Modellen Safety-Ziele sowohl für das Gesamtsystem als auch für Software und Hardware zu definieren und zu validieren. Am Ende wird das integrierte Gesamtsystem getestet und dessen funktionale Sicherheit als Ganzes bewertet [ISO15].

Das Ebenenmodell der „AUTOSAR Layered Software Architecture“ in Abbildung 2.7 beschreibt eine standardisierte, geschichtete Softwarearchitektur einzelner Steuergeräte basierend auf einem alternativen Ansatz der Dekomposition [Spr13]. Jede Abstraktionsebene erfüllt bestimmte Aufgaben im Gesamtsystem mit exakt definierten Schnittstellen zu anderen Ebenen. Zunächst werden die Ebenen Anwendung, Laufzeitumgebung, Basissoftware (BSW) und Mikrocontroller unterschieden. Die Ebene BSW ist weiterhin in die funktionellen Gruppen „Services“, „ECU Abstraction“, „Complex Drivers“ und

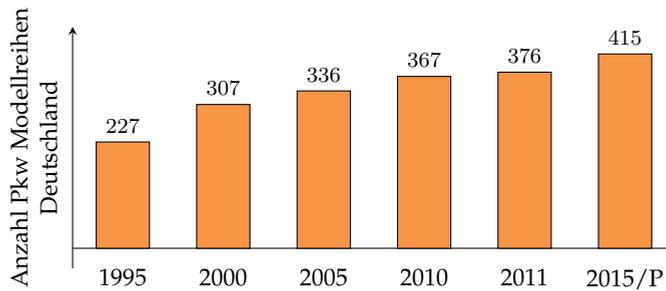


Abbildung 2.8.: Entwicklung der Zahl an Modellreihen im deutschen Pkw-Markt seit 1995, Stand 2011 mit Prognose (P) für 2015 [Hei11]

Allein für den deutschen Markt stieg die in Abbildung 2.8 gezeigte Zahl der Basismodelle zwischen 1995 und 2011 um über 60% auf 376 Modellreihen an [Hei11]. Ergänzt man die Auswahl möglicher Derivate⁷ und Motorenarten, erhält man für 2011 insgesamt 3.281 erhältliche Fahrzeugvarianten [Dud12]. Hinzu kommen die vielfältigen Konfigurationsmöglichkeiten der Ausstattung durch den Endkunden, insbesondere im Bereich der IKT. Kombiniert mit dem KsK, vergleiche Kapitel 2.3, führt dies zu Fahrzeugen mit einer Losgröße von eins. Dies erhöht das Risiko von Fehlern in Entwicklung und Produktion, z.B. durch falsche Einbauten und verringert Lern- und Skaleneffekte [GSB12]. Gleichzeitig steigt die Zahl paralleler Entwicklungsprojekte sowie deren Aufwand erheblich [Pre15].

Verkürzung der Time-to-Market

Das Produktverständnis wird heute durch die schnellen Innovationszyklen im CE-Bereich geprägt. Während die Dauer des gesamten PEP bei VW rund 48 Monate beträgt [GSB12], liegt sie für neue Smartphonemodelle bei etwa einem Jahr. Ihre Betriebssysteme werden sogar innerhalb weniger Wochen aktualisiert [Moh+15]. Deshalb wird versucht, die mehrjährige Fahrzeugentwicklung von der Entwicklung innovativer Infotainmentfunktionen abzuspalten, um dort eine schnellere Time-to-Market zu erzielen und mit den Innovationszyklen im CE-Bereich Schritthalten zu können [BGS16].

⁷Karosserieformen: Crossover, Sub-mini-MPV, Pick-up, Off-Road, SUV, MPV, Fließheck, Kombi, Limousine, Kompaktwagen, Sportwagen, Coupé, Cabrio, Roadster [Sch+12]

Problematisch ist hierbei allerdings, wie eine wirtschaftliche App-Entwicklung im automotive Bereich trotz der im Vergleich mit Mobiltelefonen vergleichsweise geringen Stückzahlen gestaltet werden kann. Um mit großen IT Firmen wie Google oder Apple konkurrieren zu können, muss es den Automobilkonzernen laut [Moh+15] beispielsweise durch starke Kooperation miteinander gelingen, ein ähnlich leistungsstarkes Ökosysteme rund um ihre Produkte zu etablieren, wie dies die IT Firmen bereits getan haben. Alleine Apple verfügt über etwa 630.000 unabhängige Softwareentwickler bei nur 5.000 bis 10.000 internen Entwicklern [Moh+15].

Plattformen und Wiederverwendung

In der Automobilindustrie gelten im Vergleich zur CE-Branche hohe Qualitätsanforderungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit (reliability) und Ausfallsicherheit (availability) von Bauteilen. Der Einsatz von Funktionen und Komponenten in verschiedenen Fahrzeugmodellen und -segmenten ermöglicht die Realisierung von Fahrzeugen mit hoher Qualität zu möglichst geringen Kosten trotz hoher Variantenvielfalt [PS16]. Das Modifizieren und Erweitern einer bestehenden Systemarchitektur für die nächste Generation verkürzt außerdem die Serienentwicklung, da auf vorhandene Erfahrung zurückgegriffen werden kann und das Risiko die Kundenbedürfnisse zu verfehlen als gering eingeschätzt wird [BGS16].

Der Einsatz von Plattformen, ein Baureihen übergreifender einheitlicher Aufbau der Karosseriestruktur, und Baukastenkomponenten, die über mehrere Fahrzeuggenerationen und Plattformen eingesetzt werden können, erlauben die Realisierung maximal vieler Baureihen und Derivate zu minimalen Entwicklungs- und Investitionskosten [PS16]. Dies erhöht die Stückzahlen der Einzelkomponenten und verbessert damit die Einkaufsbedingungen und senkt Produktionskosten [PS16].

Der sogenannte Hut, das sichtbare Interieur und Exterieur, gehört nicht zur Plattform. Hier wächst die Modularisierung. OEMs kaufen Module wie Sitze, Türen oder Cockpit fertig beim OES ein. Referenz [PS16] gibt die geschätzte durchschnittliche Eigenleistung der OEM im Jahr 2015 mit etwa 23% an.

Neue Strukturen für neue Systeme

Nicht die technische Umsetzung wird als Hürde zur Beherrschung der Herausforderungen gesehen, sondern Konzernstrukturen und Legacy Vorgaben,

z.B. auch durch den zuvor beschriebenen Baukastenansatz [BAS16]. Referenz [WA08] bemängelt ebenfalls den hohen Anteil an Legacy der Plattformstrategie, der das Erfüllen spezifischer Anforderungen erschwert. Die Integration neuer Funktionen in existierende Struktur-, Produktions- und Logistik-Konzepte erlaubt nur die Überarbeitung und Optimierung von Einzelkomponenten oder Subsystemen [Gem+05].

Beispielsweise ist die große Anzahl an Subsystemen und daraus resultierenden Ästen im Kabelbaum eine Folge der evolutionären Entwicklung. Die resultierende nicht optimale Struktur führt zu einer höheren Systemkomplexität als eigentlich zur Abbildung der Funktionen notwendig ist. Aus Zeitgründen wird diese gewachsene Architektur allerdings von Plattformentwicklung zu Plattformentwicklung mitgezogen [BGS16]. Ein weiteres Beispiel ist das Festhalten etablierter Hersteller an der 12 V-Blei-Säure-Batterie in Elektrofahrzeugen, obwohl die in Kapitel 2.2.1 dargelegte Anforderung hoher Kaltstartströme für den Start einer VKM entfällt [BAG15].

3. Bewertungskriterien von E/E-Architekturen

Die spätere Definition von Key-Performance-Indicators zur Bewertung von Entwürfen der Energieversorgung erfordert Kenntnis über Bewertungskriterien der E/E-Architektur und ihre Relevanz. Zur Ermittlung, welche Anforderungen sich durch die dargelegten Trends ändern, neu hinzu kommen oder wegfallen könnten, dient das in Kapitel 3.1 vorgestellte Experteninterview mit Vertretern aus Industrie und Forschung. Die Ergebnisse werden in Kapitel 3.2 diskutiert. Im Anschluss erläutert Kapitel 3.3 die daraus abgeleiteten wesentlichen Auslegungskriterien der E/E-Architektur und insbesondere des Energieversorgungsnetzes. Schließlich zeigt Kapitel 3.4 das im weiteren betrachtete Spannungsfeld zwischen den ermittelten Trends und Anforderungen auf.

3.1. Experteninterview zur Ermittlung von Stakeholder Requests

Grundlage für die empirische Ermittlung wichtiger Bewertungskriterien der E/E-Architektur bildet ein im Zeitraum von September 2014 bis Januar 2015 durchgeführtes Experteninterview mit 33 Vertretern deutscher Automobil- und Zulieferkonzerne sowie Forschern aus diesem Bereich. Die zentrale Forschungsfrage des Interviews bestand aus der Ermittlung von die E/E-Architektur betreffenden Trends, zugehörigen Hürden sowie bestehenden und zukünftigen Anforderungen.

Es wurde die Methode des Leitfadeninterviews der qualitativen, empirischen Sozialforschung angewendet. Der Leitfaden stellt sowohl die Vergleichbarkeit verschiedener Interviews als auch die Adressierung aller gewünschten Themengebiete sicher. Deshalb empfiehlt sich diese Methode, wenn verschiedene, nicht durch den Interviewpartner, sondern durch das Ziel des Interviews festgelegte Themen behandelt werden müssen [GG04].

Kategorie	Anzahl Interviews	Anzahl befragte Personen
Forschung	7	7
OEM	8	9
OES	11	17
Gesamt	26	33

Tabelle 3.1.: Experteninterview: Geführte Interviews und befragte Personen

Kapitel B.1 zeigt den verwendeten Leitfaden. Die Fragen und ihre Reihenfolge sind so gewählt, dass sie keine Antwortmöglichkeiten vorgeben, sondern die interviewten Experten zum freien Berichten, Kommentieren und Erklären anregen. Der Interviewinhalt ist folglich nicht durch die Fragen des Interviewers vorweggenommen [GG04].

Die Interviews wurden nach Präferenz des Interviewpartners persönlich, telefonisch oder schriftlich geführt, wobei die Fragen bei nicht schriftlichen Interviews situationsabhängig adaptiert wurden. Alle befragten Personen waren zur Zeit des Interviews im Umfeld der E/E-Architektur tätig. Tabelle 3.1 zeigt die Zusammensetzung der 26 geführten Interviews, wobei die Experten für die Auswertung einer von drei Gruppen zugeordnet wurden:

- Forschung: Vertreter von Universitäten und universitätsnahen Einrichtungen
- OEM: Vertreter verschiedener deutscher Automobilkonzerne
- OES: Vertreter verschiedener deutscher Zulieferfirmen

Weitere Informationen finden sich im Anhang in Kapitel B.2.

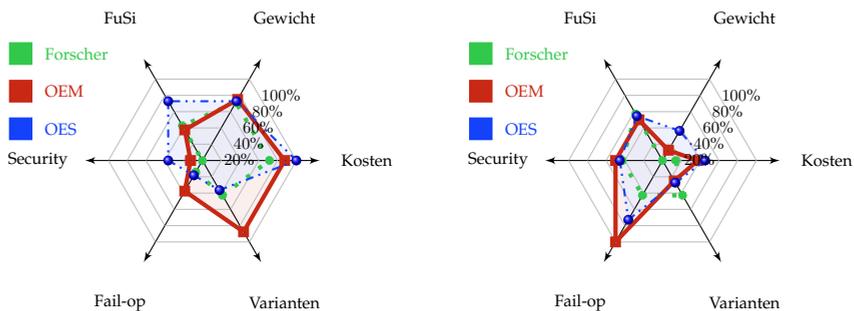
3.2. Diskussion wichtiger Stakeholder Requests

Geringe Kosten sind laut den Ergebnissen des Experteninterviews in Abbildung 3.1 (a) heute das wichtigste Auslegungskriterium von E/E-Architekturen. Kosten wurden sowohl am häufigsten genannt als auch am höchsten priorisiert und sind damit der wichtigste Treiber der Automobilindustrie [BGS16]. Weiterhin zeigt Abbildung 3.1, dass das Gewicht von allen Expertengruppen ebenfalls als wichtiges Optimierungskriterium eingestuft wird. Interessant ist auch die hohe Bedeutung der Beherrschung der Variantenvielfalt für Vertreter von OEMs, während dies bei den anderen Gruppen nicht so stark im Vordergrund steht.

Bei der Frage nach Anforderungen zukünftiger Architekturen ändert sich dieses Bild in Abbildung 3.1 (b). Während die Bedeutung von Kosten, Gewicht und Variantenvielfalt sinkt, rücken Qualitäten wie fail-operational in den Vordergrund. Alle befragten Experten von Automobilherstellern nannten fail-operational als wichtiges zukünftiges Auslegungskriterium. Während heute FuSi und Security nur bei Zulieferern eine zentrale Rolle einnehmen, werden auch diese Bereiche von Automobilherstellern als in Zukunft wichtig eingestuft.

Eine hohe Qualität, heute das dritt wichtigste Kriterium, wurde für zukünftige Architekturen nicht genannt, wie Abbildung B.2 zeigt. Die Bedeutung des Volumens der Bauteile nimmt bei der Frage nach zukünftigen Auslegungskriterien ebenfalls ab, obwohl die Integration der wachsenden Zahl an Komponenten in den begrenzten Bauraum eines Fahrzeugs eine zu erfüllende Randbedingung ist.

Allerdings lassen die Expertenaussagen keine Rückschlüsse darauf zu, ob sich die Prioritäten tatsächlich wie ermittelt ändern. Die auffällige Verschiebung könnte stattdessen auf den aktuellen Blickwinkel der Experten auf Herausforderungen zurückzuführen sein und schlussendlich ist es möglich, dass wieder dieselben Kriterien den Entwurf beherrschen.



(a) Heutige Anforderungen

(b) Erwartete zukünftige Anforderungen

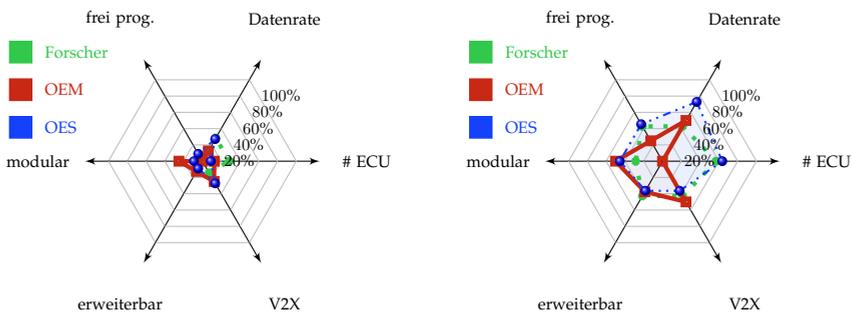
Abbildung 3.1.: Stakeholder Requests E/E-Architektur: links heute, rechts zukünftig

3.2.1. Anforderungen an die IKT

Die IKT zukünftiger Fahrzeuge steht nach Kapitel 2.1.2 vielen Herausforderungen gegenüber, die zukünftige Anforderungen prägen. Beispiele sind die Integration neuer ADAS mit hoher Vernetzung, neue Sensoren zur Umfelderkennung wie hochauflösende Kameras und die Realisierung autonomer Fahrzeuge. Neben der internen Vernetzung wird erwartet, dass Fahrzeuge „always on“ sind und sich V2X, mit der Infrastruktur, anderen Fahrzeugen oder mobilen Geräten, vernetzen lassen. Dies spiegelt sich in den von den Experten gegebenen Antworten wider. So nimmt die Relevanz aller in Abbildung 3.2 betrachteten Anforderungen für die Experten zukünftig deutlich zu.

Die rapide steigende Datenmenge erfordert hohe Datenübertragungsraten und eine hohe Rechenleistung. Während die Zahl integrierter Funktionen beherrscht werden muss, siehe Abbildung B.3, soll die Zahl integrierter Steuergeräte trotz höherem Rechenleistungsbedarf gesenkt werden.

Weiterhin soll die IKT zukünftig modular und erweiterbar sein. Einige Experten sehen frei programmierbare Steuergeräte als mögliche Lösung, deren Funktionen, wie in Kapitel 2.1.2 erläutert, über eine Laufzeitumgebung von der Hardware getrennt werden. Neben einer Reduktion der Steuergeräte würde eine einfache Integration von Apps über die Laufzeitumgebung ermöglicht, solange die erforderliche Rechenleistung ausreicht.



(a) Heutige Anforderungen

(b) Erwartete zukünftige Anforderungen

Abbildung 3.2.: Stakeholder Requests IKT: links heute, rechts zukünftig

3.2.2. Anforderungen an die Energieversorgung

Für Experten von Automobilherstellern ist die Reduktion der CO₂-Emissionen eine zentrale Anforderung an das Energieversorgungsnetz. Für die beiden anderen Expertengruppen spielt sie zukünftig auch eine größere Rolle. Zukünftig soll eine höhere Effizienz der Energieversorgung die Emissionen reduzieren. Hierfür liegt der Fokus auf der Optimierung der Kabelauslegung bezüglich der Länge und des Querschnitts, da eine Reduktion des Gewichts gleichzeitig auch zu einem verringerten Verbrauch und damit zu geringeren Emissionen führt.

Forschung und Zulieferer sehen weiterhin die Notwendigkeit einer stabilen Systemspannung, wohingegen dies bei zukünftigen Anforderungen von den Experten der Automobilhersteller nicht im Vordergrund steht. Mit der Zunahme elektrischer Verbraucher, die außerdem eine höhere Lastdynamik aufweisen, kommt zukünftig der Bedarf eines Energiemanagements (E-mgm) hinzu. Die Möglichkeit Lasten anzu steuern zu können, ermöglicht einerseits die Reduktion des Verbrauchs und trägt andererseits zur Sicherung der Spannungsstabilität bei.

Eine modulare und flexible Struktur ist eine weitere wichtige Anforderung der befragten Experten. Als eine mögliche Lösung zur Garantie der Versorgung wird die Integration eines Energiebackbones gesehen.

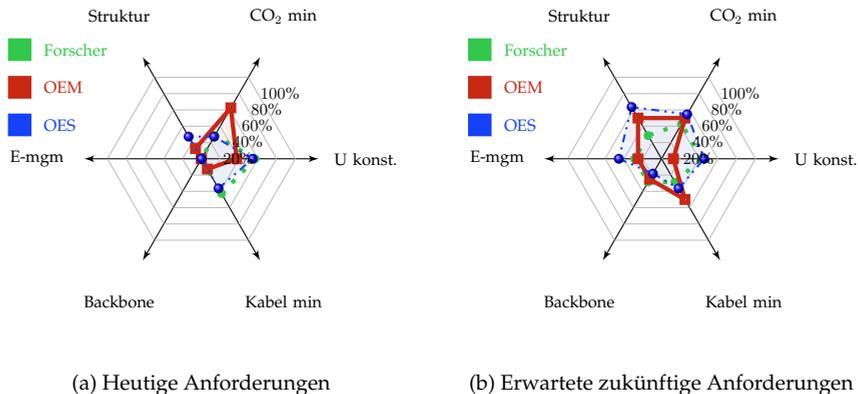


Abbildung 3.3.: Stakeholder Requests Energieversorgung: links heute, rechts zukünftig

3.3. Synthese wichtiger Auslegungskriterien

Aus den Aussagen der befragten Experten lassen sich folgende wichtige Auslegungskriterien der E/E-Architektur ableiten:

- Die Kosten pro integrierter Funktion sollen minimal sein, dies beinhaltet einen Anteil der Entwicklungskosten und die Herstellungskosten (s. Kapitel 3.3.1).
- Der in einem genormten Fahrzyklus ermittelte CO₂-Ausstoß des Fahrzeugs darf maximal dem Grenzwert entsprechen (s. Kapitel 3.3.2).
 - Das Gewicht der E/E-Architektur ist maximal konstant.
 - Die bei der Energieversorgung entstehenden Verluste sind kleiner als die bisherigen.
- Die Bauteile müssen den Qualitätsanforderungen entsprechen (s. Kapitel 3.3.3).
- Die Variantenvielfalt muss abbildbar sein (s. Kapitel 3.3.4).
- Das Volumen der Bauteile darf maximal dem Bauraum entsprechen (s. Kapitel 3.3.5).
- Die Funktionale Sicherheit im Entwurf nach ISO 26262 muss gegeben sein (s. Kapitel 3.3.6).
 - Die Datensicherheit muss gewährleistet werden können.
 - Sicherheitskritische Funktionen müssen ausfallsicher implementiert werden.
- Die Spannung darf im Betrieb nicht unter 9V fallen oder über 16V steigen [ZVE13] (s. Kapitel 3.3.7).

Im Folgenden wird näher auf diese Auslegungskriterien eingegangen und mögliche Auswirkungen auf die Auslegung werden diskutiert.

3.3.1. Kosten

Die Entwicklung eines wettbewerbsfähigen Fahrzeugs erfolgt heute über die Minimierung der Kosten pro integrierter Funktion, die sich aus den tatsächlichen Herstellungskosten und den anteilig berechneten Entwicklungskosten ergeben. Über mögliche Modul- und Komponentenpreise zur Erreichung der Produktzielkosten können die erwarteten Herstellungskosten eines Pkw zu Beginn des PEPs abgeschätzt werden. Daraus ergibt sich das verfügbare Budget für das zugehörige Entwicklungsprojekt [HW13].

Allerdings könnte die bereits heute zu beobachtende Veränderung des Mobilitätsverhaltens im urbanen Raum in allen Ländern der Triade¹ [Sch+12] dieses Geschäftsmodell des OEM zukünftig in Frage stellen. Die Zahl angemeldeter Car-Sharing Nutzer ist seit 2011 allein in Deutschland von 200.000 auf 1,26 Millionen angestiegen [Car16]. Bei sogenannten free-floating Anbietern wie Car2Go waren 2016 etwa 126 Nutzer pro Fahrzeug registriert [Car16].

Autonome Fahrzeuge könnten diesen Trend sogar noch deutlich verstärken [The16]. Kombiniert mit Apps, wie SMILE oder Google Now [Aud+14], zur Nutzung multimodaler² Mobilitätskonzepte und „e-hailing“³ gelten selbst fahrende Fahrzeuge als ideale Roboter-Taxis, die Fahrgäste auf Bestellung abholen und direkt an ihr gewünschtes Ziel transportieren („Mobility as a service“). Von öffentlichen Verkehrsbetreibern wird dies als Existenzbedrohung aber auch als Chance gesehen. Zwar fallen Alleinstellungsmerkmale weg, beispielsweise gefahren werden oder kein Parkplatzbedarf, sie könnten aber durch eigene Flotten ihr Angebot ideal ergänzen [Ver15].

Es wird erwartet, dass solche Geschäftsmodelle den Absatzmarkt von Pkw reduzieren, weshalb OEMs entweder mit weniger verkauften Fahrzeugen ihre Geschäftsziele erfüllen oder über alternative Services neue Geschäftsfelder erschließen müssen. Gleichzeitig ist für Flottenbetreiber nicht der Einkaufspreis, sondern die Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) eines Pkw entscheidend. Die TCO legen fest, zu welchem Preis der Dienstleister einen Kilometer Fahrleistung seiner Flotte anbieten kann. Aufgrund der durch geringere Standzeiten deutlich höheren Auslastung von Car-Sharing Fahrzeugen im Vergleich zu einem Privatfahrzeug steigt der Anteil der Betriebskosten an den TCO und somit auch die Bedeutung derselben beim Kauf von Flottenfahrzeugen.

Folglich könnte die Kostenoptimierung zum Erhalt eines wettbewerbsfähigen

¹Zusammenfassung der drei größten Wirtschaftsräume der Welt: NAFTA, EU und das industrialisierte Ostasien, Japan, Taiwan, Südkorea und Singapur

²Nutzung von mehr als einem Verkehrsmittel innerhalb eines bestimmten Zeitraums [Sch+12]

³Das Ordern eines Transportmittels z.B. ein Taxi über ein mobiles Gerät

Fahrzeugs beim OEM zukünftig um einen weiteren Faktor, die Betriebskosten, ergänzt werden.

Entwicklungskosten

Die Entwicklungskosten umfassen alle Ausgaben für Konstruktion und Versuch des in Kapitel 2.4 vorgestellten PEP. Eine ressourcenorientierte Gliederung dieser Kosten findet sich in [HW13]:

1. Personalkosten für Projektmanagement, Entwicklung, Konstruktion, Simulation, Beschaffung, Prototypenbau, Test oder Serienvorbereitung
2. Materialkosten und Kaufteile für Muster-, Prototyp- oder Testaufbau
3. Arbeits- und Betriebsmittel wie Labore, Werkzeuge und Messgeräte
4. Flächen- und Gebäudekosten wie Infrastruktur und Mieten
5. Strafen durch Gesetze

Die Personal- und Materialkosten eines Projekts ergeben sich unternehmensübergreifend aus der Summe aller genannten internen und aus Beauftragungen entstehenden Kosten. Die restlichen Punkte werden anteilig eingepreist.

Herstellungskosten

Unter Herstellungskosten fallen laut [Bun97] alle Aufwendungen, „die durch den Verbrauch von Gütern und die Inanspruchnahme von Diensten für die Herstellung eines Vermögensgegenstands, seine Erweiterung oder für eine über seinen ursprünglichen Zustand hinausgehende wesentliche Verbesserung entstehen“. Dies umfasst alle Ausgaben für die Erprobung der Fertigungsmittel und die Kosten der Herstellung eines Fahrzeuges in der Serienproduktion. Darunter fallen laut [Bun97] und [HW13]:

1. Materialkosten von Rohmaterial und Kaufteilen inklusive Beschaffung, Lagerung und Logistik
2. Fertigungskosten wie Löhne, Maschinenstundensätze, Energiekosten
3. Verwaltungskosten anteilig
4. Umlagen für sonstige Kosten, die nicht direkt mit der Produktion in Verbindung stehen wie Serienbetreuung oder Service

Die Summe aller Material- und Fertigungskosten sowie den anteiligen Verwaltungskosten und Umlagen liefert die Herstellungskosten eines Fahrzeugs. Während [HW13] die Vertriebskosten als Teil der Herstellungskosten mit aufzählt, schließt [Bun97] neben Forschungs- auch Vertriebskosten aus.

Betriebskosten

Die Betriebskosten sind alle vom Eigentümer eines Fahrzeugs zu tragende Kosten nach dem Erwerb eines Fahrzeugs. Dazu gehören nach [ADA16]:

1. Kosten des eigentlichen Fahrbetriebs: Energieverbrauch in $\frac{l}{100km}$ oder $\frac{kWh}{100km}$ und eventuell Nachfüllkosten für Motoröl oder Fahrzeugpflege
2. Fixkosten wie Versicherungsbeiträge, Steuern und Zulassungsgebühren
3. Kosten für Wartung, Reparatur und Verschleißteile wie Reifen

Nicht angegeben wurden die Kosten für die Verschrottung, die ebenfalls zu einer TCO Rechnung gehören.

Grundlage zur Ermittlung der Kosten des Fahrbetriebs bildet der spezifische Energieverbrauch in $\frac{kWh}{100km}$, der aus Gründen der Vergleichbarkeit auf Basis genormter Fahrzyklen, in Europa dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ), ermittelt wird. Die Höhe der Fixkosten unterscheidet sich abhängig von Fahrzeugart, Fahrzeug- und Motorgröße, Zulassungsort etc.. Nur Wartung, Verschleiß und Versicherung sind abhängig von der Fahrleistung des Fahrzeugs.

Für Benzin- und Diesel-Fahrzeuge, die nach dem 1. Juni 2009 zugelassen wurden, hängt die in Deutschland fällige Kfz-Steuer c_{ste} von den spezifischen CO_2 -Emissionen em_{CO_2} in $\frac{gCO_2}{km}$ ab, die auf Basis des genormten Verbrauchs ermittelt werden [Bun15].

$$c_{ste} = c_x \cdot \frac{H_{ubraum}}{100cm^3} + 2 \text{ €} \cdot em_{CO_2} \quad \text{mit } c_x = \begin{cases} 2 \text{ €} & \text{für Benzin} \\ 9,5 \text{ €} & \text{für Diesel} \end{cases} \quad (3.1)$$

Tabelle 3.2 vergleicht die Betriebskosten eines Kleinstwagens, eines SUV und einer Elektro-Limousine unter der Annahme einer durchschnittlichen täglichen Laufleistung von 100km und den Herstellerangaben aus Tabelle D.1 und D.2. Der Normverbrauch der Benzin-Modelle wird mit dem Faktor $8,6 \frac{kWh}{l}$ für den spezifischen Energieinhalt von Superbenzin umgerechnet, der sich aus dem Produkt des Heizwerts H_u in $\frac{MJ}{kg}$ und der Dichte bei $15^\circ C$ in $\frac{kg}{l}$ ergibt [Ara16]. Für den Preis eines Liters Benzin werden $1,38 \text{ €}$ angesetzt. Es

zeigt sich, dass der Kleinwagen ähnliche Kosten verursacht wie eine Elektrolimousine und etwa halb so viele Kosten verursacht als ein SUV.

Parameter	Einheit	Klein	SUV	Elektro
Normverbrauch	$[\frac{kWh}{100km}]$	38,7 (=4, 5l)	80,8 (=9, 4l)	22,04
Kosten Energie	$[\frac{€}{kWh}]$	0,1605	0,1605	0,2869
spezifische Kosten	$[\frac{€}{100km}]$	6,21	12,97	6,32
Fahrkosten pro Jahr	$[\frac{€}{a}]$	2.267	4.736	2.308
Steuern	$[\frac{€}{a}]$	198	496	0

Tabelle 3.2.: Vergleich der jährlichen Steuern und Fahrkosten zweier Benzinfahrzeuge mit einer Elektrolimousine bei einer Laufleistung von 36.500km im Jahr

3.3.2. CO₂-Emissionen

Die Verschärfung des in [Eur09] festgelegten CO₂-Grenzwerts $G_{CO_2,0}$ von $130 \frac{gCO_2}{km}$ im Jahr 2016 auf $95 \frac{gCO_2}{km}$ bis 2021 spielt bei Verbrennungsfahrzeugen eine große Rolle. Die für die Überschreitung zu erbringenden Strafen sollen möglichst vermieden werden. Erschwert wird dies durch die ab 2017 geplante Einführung eines neuen Testverfahrens mit realitätsnahen Fahrprofilen, dem „Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures“ (WLTP), das den bisherigen NEFZ zur Ermittlung des Normverbrauchs ablösen wird. Nach einer Übergangsphase ab der Einführung 2017 soll die Ermittlung der Emissionswerte ab 2021 auf Basis dieses Testzyklus erfolgen [Eur17]. [PA 16] erwartet hierdurch eine Steigerung der ermittelten Werte um bis zu 10%, [Tie+16] um bis zu 23%.

Der fahrzeugspezifische Grenzwert G_{CO_2} ergibt sich nach [Eur09] abhängig vom Fahrzeuggewicht m_{Fzg} und dem Gewichtskorrekturfaktor m_0 , bis 2016 1372 kg, zu:

$$G_{CO_2} = G_{CO_2,0} + 0,0457 \cdot (m_{Fzg} - m_0). \quad (3.2)$$

Bis 2019 gelten verminderte Strafsätze von 5 € für das erste Gramm, 15 € für das zweite Gramm, und 25 € für das dritte Gramm. Darüber fällt der ab 2019 für jede Überschreitung fällige vollständige Strafsatz von 95 € pro Gramm an. Weiterhin wird der Proportionalitätsfaktor zur gewichtsbedingten Umrechnung des erlaubten Grenzwertes 2019 von 0,0457 auf 0,0333 gesenkt [Eur14].

Die Ermittlung der Flottengrenzwerte der OEM erfolgt abhängig von den Absatzzahlen ihrer Modelle. Würde ein Fahrzeughersteller 90.000 Kleinwagen mit 885 kg und 500.000 SUV mit 2435 kg verkaufen, ergäbe sich für 2016 ein zulässiger Flottengrenzwert von $167,77 \frac{gCO_2}{km}$ ⁴. Hätte der Kleinwagen einen Emissionswert von $93 \frac{gCO_2}{km}$ und der SUV von $218 \frac{gCO_2}{km}$, beträgt der ermittelte Flottenwert $199,53 \frac{gCO_2}{km}$. Der zulässige Grenzwert würde um 31,15 g überschritten. Pro hergestelltem Pkw ergibt sich eine Strafzahlung c_S von 2720 €⁵. Auf die Entwicklungskosten umgerechnet wäre das für 2016 eine anteilig zu erbringenden Strafzahlung von 802 Millionen Euro pro Fahrzeugprojekt.

Gewicht

Leichtbau spielt eine zentrale Rolle bei der Reduktion des Verbrauchs. Insbesondere, da Leichtbau zu einem Dominoeffekt führen kann. Ein leichteres Fahrzeug benötigt z.B. eine geringere Bremskraft und folglich kleinere Bremsen, was wiederum das Gewicht senkt. Weiterhin verbessert Leichtbau die Fahrdynamik und Sicherheit, z.B. durch eine höhere Beschleunigung oder kürzere Bremswege. Bei Elektrofahrzeugen kann die oft als zu gering bemängelte Reichweite gesteigert werden oder es genügt für dieselbe Reichweite eine kleinere und damit ebenfalls leichtere Batterie.

Eine Gewichtseinsparung von 50 kg verringert bei einer Elektrolimousine mit einem Gesamtgewicht von 2000 kg im NEFZ aufgrund der hohen Effizienz des Antriebsstrangs den Energiebedarf für den Vortrieb um 3,71 kWh pro 100 km. Die Verbrauchsreduktion der Verbrennungsfahrzeuge fällt dagegen deutlich geringer aus. Für den Kleinwagen wird eine Reduktion um etwa 0,89 kWh bewirkt und um 0,91 kWh für den SUV. Dies verringert die CO₂-Emissionen⁶ der beiden Verbrennungsfahrzeuge um 2,4 g beziehungsweise 2,45 g pro Kilometer. Allerdings sinken aufgrund des niedrigeren Gewichts die zulässigen Emissionen ebenfalls, weshalb die Überschreitung nur geringfügig abnimmt.

⁴ $G_{CO_2, Flotte} = 130 + 0,0457 \cdot \left(\frac{885 \cdot 90.000 + 2.435 \cdot 500.000}{90.000 + 500.000} - 1372 \right) = 167,77 \frac{gCO_2}{km}$

⁵ $c_S = (31,15g - 3g) \cdot 95 \frac{€}{g} + 25€ + 15€ + 5€ = 2.720€$

⁶Die CO₂ Emissionen eines Liters Benzins betragen 2320 g [KB11]. Es entstehen $270 \frac{gCO_2}{kWh}$.

Effizienz Energieversorgung

Im heutigen Energieversorgungssystem eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und einem 1300 kW-Generator können, wie [Dre15] darlegt, bis zu 135 W Verluste durch die Absicherung und weitere 140 W Verluste in den Versorgungsleitungen entstehen, siehe auch Kapitel 2.2. Nimmt man beispielsweise den Wirkungsgrad der VKM mit 35% und des Generators mit 75% an, sorgen diese Verluste für einen Verbrauch von 0,121 Benzin pro Stunde. Würde das Fahrzeug in dieser Stunde konstant $33,6 \frac{km}{h}$ fahren, der Durchschnittsgeschwindigkeit des NEFZ, entspricht dies einem Anteil am Verbrauch von $0,36 \frac{l}{100km}$ oder einer Emission von $8,4 \frac{gCO_2}{km}$.

Deshalb steht bei der Reduktion des Verbrauchs neben dem Gewicht auch die Energieeffizienz im Fokus. Allerdings bestehen hierbei Interessenskonflikte. In Gleichung 2.1 zeigt sich, dass der Widerstand und damit die Verluste einer Leitung kleiner werden, je größer der Querschnitt im Vergleich zur Länge einer Leitung ausfällt. Dies erhöht allerdings das Gewicht.

Der Einsatz von Halbleiterschaltern statt Relais und Schmelzsicherungen ermöglicht dagegen gleichzeitig eine Reduktion der Verluste durch kleinere Widerstände und eine Gewichtsreduktion der Bauteile selbst.

Der Einfluss der Verluste im Elektrofahrzeug ist ungleich geringer, da das Niederspannungsnetz mit einem DC/DC-Wandler statt des Generators direkt aus der HV-Batterie gespeist wird und dadurch die hohen Übertragungsverluste, die bei der Versorgung aus der VKM entstehen, wegfallen [BS17]. Hier steht vielmehr die Reduktion des Energieverbrauchs der Lasten im Vordergrund, z.B. durch eine intelligente Ansteuerung, da diese die Reichweite des Fahrzeugs deutlich verringern können. Beispielsweise hätte alleine eine elektrische Heizung mit den von [Fab06] angegebenen 1,7 kW einen Anteil von 3,7% an den in Tabelle 3.2 angegebenen $22,04 \frac{kWh}{100km}$. Bei einer Batterie mit 60 kWh Kapazität entspräche dies einer Reduktion der Reichweite um 10 km.

3.3.3. Qualität

Eine erwartete Lebensdauer von 150 000 km oder von 10 Jahren [Rob14] unter extremen Umweltbedingungen stellt hohe Anforderungen an die Qualität der Bauteile im Pkw. Ein wichtiger Faktor zur Bestimmung der Zuverlässigkeit (reliability) ist die Fehlerrate. Sie gibt die relative Anzahl defekter Bauteile bezogen auf eine definierte Zeit in parts per million (ppm) an. Beispiele sind 15ppm für Steuergeräte nach der Produktion oder 50ppm bezogen auf die angegebene Lebensdauer im Feld, 10ppm für Sensoren oder weit weniger als 1ppm bei integrierten Schaltungen. Zum Vergleich können Fehlerraten in

Systemen für Mobiltelefone bis zu 5000ppm betragen [Rob14].

Die Ausfallrate (Failure in Time, FIT) gibt die Zahl der Ausfälle in 10^9 Stunden⁷ an. Sie dient zur Bewertung der Verfügbarkeit (availability). Halbleiter weisen Ausfallraten von 2 bis 5 FIT auf, Relais 500 FIT, Steckkontakte 10 FIT und Schalter 1500 FIT. Für Steuergeräte sind weniger als 50 FIT im Feld zulässig [Rei14].

Funktionen und Komponenten werden heute in verschiedenen Fahrzeugmodellen und -segmenten verwendet [EL12]. Dies ermöglicht es, eine hohe Qualität und damit einen geringeren Wartungsaufwand zu möglichst minimalen Kosten zu realisieren. Weiterhin erlaubt der Einsatz von Modulen⁸, eine große Variation von Fahrzeugen günstig zu realisieren [PS16]. Dies wird mit der steigenden Zahl verschiedener Fahrzeugsegmente und Derivate unerlässlich.

3.3.4. Varianten

Einfluss auf die Variantenbildung in der E/E-Architektur haben unter anderem die Karosserieform, Fahrerposition, Auswahl Antriebsstrang und Assistenzsysteme, sonstige Ausstattung und länderspezifische Gesetze [PS16]. Es wird erwartet, dass die Individualisierung weiter fortschreitet, wobei die heutige Variantenvielfalt bereits als zu umfangreich, vergleiche Kapitel 2.3, und schwer zu handhaben gilt [BGS16]. Die Ausweitung der Modellreihen in Kombination mit den individuellen Wahlmöglichkeiten für Kunden hat den Aufwand in Entwicklung, Logistik und Produktion deutlich gesteigert. Eine Automatisierung der Produktion ist nur schwer zu realisieren. Weiterhin schwindet der Vorteil der eingesparten Give-Away Kosten durch den wachsenden Aufwand für die Individualisierung [Rei15].

Zur kostengünstigen Serienproduktion wird der KsK in mehrere Fertigungsmodule wie Motorraum oder Cockpit eingeteilt. Alternativ kann nach [PS16] durch die Kombination vieler, räumlich begrenzter Leitungssätze mit einer kleinen Varianz n_i eine hohe Variantenzahl, im Idealfall $\prod_{i=1}^m n_i$, generiert werden. Ein Beispiel für eine räumlich begrenzte Variation ist der Leitungssatz des Türmoduls. Hinderlich für solche Lösungen ist, dass die funktionale und eine mögliche räumliche Trennung oft nicht übereinstimmen [PS16].

⁷entspricht 114.155 Jahren

⁸Kombination von Einzelkomponenten, die meist fertig montiert ins Fahrzeug verbaut werden können z.B. Sitz oder Tür

3.3.5. Bauraumvolumen

Der für mechanische, elektrische und hydraulische Bauteile zur Verfügung stehende Bauraum eines Fahrzeugs ist beschränkt. Beispielsweise stehen aktuell im BMW 7 für das Packaging und Routing der Gesamtzahl der E/E-Komponenten 741 Bauraum zur Verfügung [Bal16]. Deshalb ist die Integration der durch gesetzliche Reglementierung, aktive Assistenzsysteme und Personenschutzanforderungen wachsenden Zahl an Aggregaten insbesondere im Motorraum eine große Herausforderung [EWF13]. Folglich sollte das Volumen der Komponenten und des Kabelbaums so gering wie möglich sein. Hinzu kommt, dass manche Bauteile nicht in bestimmte Bereiche verbaut werden können, z.B. ein nicht hitzebeständiges oder wasserdichtes Steuergerät im Motorraum. Neben dem Volumen ist bei Leitungssätzen der maximal mögliche Biegeradius zu berücksichtigen.

3.3.6. Funktionale Sicherheit (Safety)

Mit der wachsenden Zahl an E/E-Systemen ist die Wahrscheinlichkeit von Fehlfunktionen, die eine unvermeidbare Gefährdung für Personen herbeiführen können, gestiegen. Deshalb spielt die FuSi, der Ausschluss eines solchen Risikos durch korrekte Funktion oder entsprechende Maßnahmen [ISO15], eine wachsende Rolle im Entwurf von E/E-Systemen. Die Norm ISO 26262 für die Entwicklung sicherheitsrelevanter E/E-Systeme beschreibt ein methodisches Vorgehen, um mit Hilfe von prozessualen und technischen Maßnahmen die, in einer Gefahren- und Risikoanalyse ermittelten, Risiken zu minimieren und die Betriebssicherheit gewährleisten zu können [ISO15].

Die Arbeitsschritte folgen dem Ebenenaufbau des V-Modells [ISO15]. Zunächst wird das allgemeine FuSi-Konzept definiert, um anschließend in drei verschachtelten V-Modellen Safety-Ziele sowohl für das Gesamtsystem als auch für Software und Hardware zu definieren und zu validieren. Mögliche Gefährdungen durch systematische oder zufällige Fehler werden analysiert und hinsichtlich ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit (exposure), Beherrschbarkeit (controllability) und Schweregrads (severity) bewertet [ZVE12]. Dies erlaubt ihre Klassifizierung von QM, übliches Qualitätsmanagement, bis zur höchsten Sicherheitsstufe ASIL D mit entsprechend aufwändigen Sicherheitsmaßnahmen. Basierend darauf werden im Anschluss Prozesse und Methoden für ein Sicherheitskonzept definiert [ZVE12]. Die zu ergreifenden Maßnahmen und -mechanismen gewährleisten die FuSi bei diesen Fehlern [Gol14].

Security

Funksysteme im Fahrzeug eröffnen den Zugriff ohne einen kabelgebundenen Datenzugang, rein über einen Laptop mit Internetverbindung [Foc15]. Über ein Entertainment-System [Foc15] oder eine Korruption des Codes über das Radio [Bub15] konnten Sicherheitsexperten sich sogar Zugriff auf das Bremsensystem verschaffen. Fehlt die Möglichkeit des Eingriffs durch den Fahrer, wie bei X-by-Wire Systemen und autonomen Fahrzeugen, kann die Betriebssicherheit mit solchen Sicherheitslücken nicht gewährleistet werden.

Security steht für die (Daten-)Sicherheit vor unbefugten Zugriffen durch Dritte. Dabei gibt es verschiedene Schutzziele. Daten zur Ausführung gewünschter Funktionen müssen verfügbar sein. Ihre Integrität ist zu gewährleisten, sprich sie müssen korrekt und unverändert sein. Unbefugte dürfen nicht auf vertrauliche Daten zugreifen können und die Daten müssen tatsächlich von der erwarteten Quelle stammen, also authentisch sein [Kne15].

Als eine Möglichkeit dies zu realisieren, schlägt [Rö15a] die Nutzung eines zusätzlichen „Trust center“ vor, das Zugriffsrechte kontrolliert und über verteilte Zertifikate die Authentizität von Updates bestätigt.

Fail-operational und Fail-safe

Das Erreichen eines sicheren Zustands kann nach [Gol14] durch Zufuhr (Arbeitsstromprinzip) oder Wegnahme (Ruhestromprinzip) der Energiezufuhr erfolgen. Ersteres führt zu einem ausfallsicheren fail-operational Prinzip, letzteres zu einem betriebssicheren fail-safe Zustand.

Eine ausfallsichere Auslegung sicherheitsrelevanter Funktionen ist spätestens für autonome Fahrzeuge unerlässlich. Aus ökonomischen Gründen ist ein „ein-Fehler-System“ im Fahrzeug wahrscheinlich, das einzelne Fehler durch entsprechende Maßnahmen toleriert und diese keine kritischen Systemzustände hervorrufen können. Im Gegensatz zu fail-safe Systemen sind abhängige Fehler, die zu einem Systemausfall führen, inakzeptabel und müssen mit entsprechenden Maßnahmen abgesichert werden [TV14].

Im Flugzeug werden z.B. zur Minimierung systematischer Fehler redundante Systeme unterschiedlicher Hersteller verbaut. Weiterhin werden redundante Steuergeräte mit dualen Rechnerkernen, sogenannte Duo-Duplex-Redundanzen, eingesetzt und auch die Energieversorgung ist über mehrere Energiequellen abgesichert [Flu12]. Im Start-Stopp- oder Segelbetrieb mit Motorschaltung wäre im Verbrennungsfahrzeug folglich zusätzlich zur Batterie mindestens ein weiterer Speicher zur sicheren Versorgung nötig [BAG15].

3.3.7. Spannungsstabilität

Die Systemspannung ist abhängig vom Gleichgewicht im Leistungsangebot und der -nachfrage. Bei zu hohem Angebot erhöht sich die Spannung, bei zu niedrigem sinkt sie. Weiterhin führen Verluste an Stromverteilern, Absicherung und Leitungen zu Spannungsabfällen zwischen den Energiequellen und den Lasten [Koh14].

Im 12V-Versorgungsnetz sind die zulässigen Spannungsgrenzen wie folgt definiert [ZVE13]:

- 9 V minimal zulässige Spannung für den Startvorgang einer VKM
- 11 V minimal zulässige Spannung bei abgeschalteter VKM
- 14,3 V maximale Spannung im Betrieb
- 16 V maximal zulässige konstante Überspannung
- 20 V maximal zulässige dynamische Überspannung (Lastabwurf)

Die Systemspannung muss sich für den sicheren Betrieb aller E/E-Systeme innerhalb dieser Betriebsspannungsgrenzen bewegen.

3.4. Spannungsfeld zwischen Trends und Anforderungen

Die wachsende Zahl sicherheitsrelevanter Funktionen macht eine ausfallsichere fail-operational Auslegung etwa über Redundanzen unerlässlich. Diese ist jedoch durch die Vielzahl an vernetzten Komponenten, Teilsystemen und damit verbundenen Schnittstellen auch zwischen bisher getrennten Domänen nur mit hohem Aufwand realisierbar, weshalb zur zielgerichteten Erfüllung dieser Anforderungen eine Überarbeitung der bestehenden IKT-Architektur naheliegt.

Mögliche Ansätze gehen von einer evolutionären Weiterentwicklung durch die Integration einer neuen Domäne über die Einführung von Domänenleitrechnern inklusive einem Datenbackbone zur Erreichung hoher Datenübertragungsraten bis hin zu revolutionären Ansätzen mit wenigen Hochleistungsrechnern, die die bestehende Vielzahl an Steuergeräten drastisch senken sollen. Für letztere wird eine systemweite Trennung von Hardware und Apps durch eine Middleware als vielversprechende Möglichkeit gesehen, Komplexität zu verringern, Qualität zu erhöhen und langfristig Kosten zu senken. Statt mit neuen Steuergeräten werden neue Funktionen über Apps integriert,

die einfach und flexibel aktualisiert, installiert und über verschiedene Modelle und Generationen hinweg verwendet werden können. Dies generiert eine einfach und flexibel zu erweiternde E/E-Architektur.

Eine solche Veränderung erfordert neben einer Überarbeitung der IKT-Architektur selbst auch eine Veränderung in der Art der Entwicklung. Bei solchen erweiterbaren E/E-Architekturen ist zur Zeit der Entwicklung der Funktionsumfang nicht wohldefiniert und folglich kann die Entwicklung nicht länger auf Basis der funktionalen Anforderungen erfolgen, da diese ebenfalls nicht voll umfänglich bekannt sind.

Im Energieversorgungsnetz ist mit der wachsenden Zahl an Komponenten nicht nur der Energiebedarf gestiegen, sondern auch die Zahl volatiler Hochleistungsverbraucher, die die Garantie der Spannungsstabilität deutlich erschweren. Gleichzeitig ist die Versorgungssicherheit durch die Elektrifizierung sicherheitsrelevanter Komponenten ein entscheidendes Auslegungskriterium. Aus diesem Grund werden Veränderungen wie zum Beispiel die Integration einer zusätzlichen 48 V-Spannungsebene, der Einsatz mehrerer Energiespeicher und anderer Speichertechnologien wie Lithium-Ionen-Batterien und Doppelschichtkondensatoren, die die Sicherheit der Energieversorgung trotz solcher Hochleistungsverbraucher garantieren sollen, diskutiert. Eine weitere Möglichkeit zur Erreichung einer höheren Netzstabilität ist der Einsatz von Halbleitern oder eines Backbones statt der bestehenden zentralen Baumstruktur.

Die Einführung einer neuen Spannungsebene erfordert jedoch hohe Investitionskosten und muss durch entsprechende Einsparungen, z.B. geringere CO₂-Emissions-Strafen, gerechtfertigt werden. Der Einsatz mehrerer Speicher ist ebenfalls mit höheren Kosten verbunden. Allerdings könnte eine fail-operational Auslegung sicherheitsrelevanter Funktionen den Einsatz mindestens zweier unabhängiger Quellen voraussetzen. Außerdem ist ein möglicher Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien teurer als die bewährte Blei-Säure-Batterie, dasselbe gilt für Halbleiter im Vergleich zu etablierten Schmelzsicherungen. Während Halbleiter eine Reduktion des Gewichts durch kleinere Leitungsquerschnitte erlauben, erhöhen mehrere Speicher ohne zusätzliche Veränderungen in der Auslegung des Systems neben den Kosten auch das Gewicht.

4. Semi-formale Beschreibung erweiterbarer E/E-Architekturen

Für die Entwicklung ist eine qualitative Diskussion des Entwurfsraums wichtig, um verschiedene Alternativen finden und für eine optimale Lösung vergleichen zu können. Eine modellbasierte Entwicklung erlaubt eine verständliche Darstellung der komplexen Zusammenhänge heutiger E/E-Architekturen, weshalb sie nach Kapitel 2.4.1 unerlässlich geworden ist, um Fehler im Entwurf trotz hoher Variabilität zu vermeiden und eine hohe Qualität bei geringen Kosten zu erreichen.

Gleichzeitig diskutiert Kapitel 2.1.2 Ansätze zukünftiger, erweiterbarer E/E-Architekturen, die auf einer durch eine Laufzeitumgebung (Run Time Environment, RTE) realisierten Trennung von Funktion und Hardware basieren. Dies erlaubt die spätere Integration neuer Funktionen über Apps statt neuer Steuergeräte. Deshalb kann zur Zeit der Entwicklung ihr Funktionsumfang und folglich ihre funktionalen Anforderungen nicht vollständig definiert werden. Ihre Auslegung erfolgt, im Gegensatz zu bestehenden Architekturen, verstärkt anhand nicht-funktionaler Eigenschaften wie fail-operational.

Aus diesem Grund muss die E/E-Architektur für eine modellbasierte Entwicklung ohne die vorherige vollständige Definition der funktionalen Anforderungen strukturiert beschrieben werden können. Ferner erlaubt eine strikte Modularisierung eines solchen Modells, einfache Anpassungen bei der Umsetzung der geforderten Erweiterbarkeit vorzunehmen. Deshalb sollte das verwendete Modell Freiheitsgrade im Entwurf, die aus der Trennung von Funktion, Laufzeitumgebung und Hardware entstehen, beschreiben können. In diesem Kapitel wird ein SysML-basiertes, semi-formales Domänenmodell (Domain model) vorgestellt, das E/E-Architekturen beschreiben kann, deren Funktionsumfang zur Zeit der Entwicklung nicht festgelegt ist. Kapitel 4.1 geht zunächst auf andere „Modelle“ zur Beschreibung der E/E-Architektur ein und diskutiert ihre Vor- und Nachteile bei der Beschreibung erweiterbarer E/E-Architekturen. Anschließend wird in Kapitel 4.2 die Methodik und in Kapitel 4.3 das entwickelte semi-formale Domänenmodell vorgestellt.

4.1. Diskussion existierender Modellierungsansätze

Heute existiert eine vielfältige Auswahl an Beschreibungssprachen und Modellen zur Abbildung und strukturierten Beschreibung der bestehenden E/E-Architektur oder ihrer Teilaspekte. Die in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Ansätze können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Während am Entwicklungsprozess orientierte Ansätze die E/E-Architektur analog zum Ablauf des V-Modells anhand verschiedener Arbeitsschritte in Ebenen unterteilen, zeigen am Systemaufbau angelehnte Ansätze eine auf Basis von funktionalen Eigenschaften und Systemmerkmalen gebildete Dekomposition.

Zu den am Entwicklungsprozess orientierten Ansätzen zur Modellierung gehören nach Kapitel 2.4.1 EEA-ADL und MOSES, die eigens für die modellbasierte Entwicklung der E/E-Architektur entworfen wurden. Ihr Vorteil gegenüber anderen etablierten Beschreibungssprachen, wie UML oder EAST-ADL2, ist die Möglichkeit der, mittels hierarchischer Ebenen, grafischen Darstellung verschiedener Sichten auf die E/E-Architektur [Jä12]. Analog zum Entwicklungsprozess beruhen diese Ebenen auf dem zu integrierenden Funktionsumfang, aus welchem sich hierarchisch die Sichten „funktionale Anforderungen“, „logische Systemarchitektur“ und „technische Systemarchitektur“ ableiten. Während die Logik-Ebene die Funktionalität implementierungsunabhängig zeigt, modelliert die technische Ebene Details der Implementierung in Software und Hardware [Fra06].

Folglich können diese Modellansätze den Systems Engineering Prozess zur Entwicklung der E/E-Architektur ganzheitlich darstellen. Allerdings setzen sie voraus, dass die aus dem Funktionsumfang abgeleiteten funktionalen Anforderungen zu Beginn des PEPs vollumfänglich definiert werden können. Dies ist bei einer in Kapitel 2.1.2 beschriebenen, über die Fahrzeuglebensdauer um neue Funktionen erweiterbaren E/E-Architektur jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund kann ein solches, aus den funktionalen Anforderungen abgeleitetes, Modell das Gesamtsystem nicht hinreichend beschreiben. Spätere Erweiterungen des Funktionsumfangs führen zu Iterationsschleifen, in welchen das Modell von Beginn an angepasst werden muss.

In der Informatik sind auf der Systemstruktur basierende hierarchische Modelle etabliert, deren Ebenen verschiedene Aufgaben im Gesamtsystem zugeordnet werden. Jede Ebene ist Client der darunterliegenden Ebene und bietet wiederum der über ihr liegenden Ebene einen bestimmten Dienst an [tut17]. Beispiele solcher Protokolle und Systeme sind das in Kapitel 2.4.1 vorgestellte ISO-OSI-Modell und die AUTOSAR Layered Software Architecture.

Die modellierte Systemstruktur dieser Ansätze kann jederzeit flexibel ange-

passt werden, da sie entkoppelt vom zeitlichen Verlauf des PEP ist. Ferner müssen Implementierungen verschiedener Kommunikationsprotokolle oder Softwarearchitekturen nicht alle in der Beschreibung spezifizierten Komponenten oder Ebenen beinhalten. Dies ermöglicht eine einfache und modulare Anpassung auf Basis eines Grundmodells. Allerdings beziehen sich beide Modelle nur auf Ausprägungen, genauer gesagt die Kommunikation und die Softwarearchitektur, und nicht auf die gesamte E/E-Architektur.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass am Entwicklungsprozess orientierte Modelle erweiterbare E/E-Architekturen nur ungenügend beschreiben können. An der Systemstruktur orientierte Modelle bieten hingegen die gesuchte Möglichkeit einer modularen und flexiblen Modellierung zur Abbildung erweiterbarer E/E-Architekturen. Die genannten Ansätze liefern allerdings keine Modelle zur Beschreibung der gesamten E/E-Architektur. Folglich bietet es sich an, eine mögliche Beschreibung einer erweiterbaren E/E-Architektur basierend auf der Systemstruktur zu realisieren.

4.2. Methodik Domain Driven Design

Der Einfluss einer Trennung von Funktion, Laufzeitumgebung und Hardware auf die Auslegung muss unmissverständlich beschrieben werden können, um daraus entstehende Freiheiten im Entwurf, insbesondere auch bei der Energieversorgung, zu finden und zu definieren. Eine solche Beschreibung muss weiterhin berücksichtigen, dass der Funktionsumfang zur Zeit der Entwicklung einer erweiterbaren E/E-Architektur nicht vollständig definiert ist. Domain Driven Design (DDD) wird in der System- und Softwareentwicklung eingesetzt, um das relevante Wissen einer Anwendungsdomäne strukturiert und unmissverständlich zu beschreiben [Eva03]. Mit Hilfe eines Domänenmodells werden alle Elemente, die für das Verständnis eines Problems relevant sind, beschrieben und ihre assoziativen Beziehungen untereinander aufgezeigt. Ein Domänenmodell kann deshalb auch als Kombination eines Wörterbuchs mit einer Mindmap gesehen werden [Sch09]. Es etabliert demzufolge einen einheitlichen gemeinsamen Sprachgebrauch zur einfachen Kommunikation in interdisziplinären Teams [Eva03]. Dies erhöht die Produktivität der Entwicklung und Konstruktion in komplexen Anwendungsbereichen. Die Komplexität der E/E-Architektur-Entwicklung entsteht aus der Multiplizität ihrer Elemente, deren wechselseitigen Beziehungen und verschiedenen technischen Detailebenen, die zur Beschreibung dieser Beziehungen berücksichtigt werden müssen.

Im Gegensatz zu einem Systemmodell beschreibt ein Domänenmodell kei-

ne konkreten Systemstrukturen und ihre Arbeitsweisen, sondern erklärt Elemente exakt und ermöglicht eine Unterscheidung zwischen ihnen. Ein Systemmodell kann dabei basierend auf einem Domänenmodell erstellt werden, indem es auf dessen definierte Elemente zurückgreift.

Die Beschreibung der Elemente kann informell, semi-formal oder formal erfolgen. Eine auf Umgangssprache basierende, informelle Beschreibung ist einfach zu erstellen, liefert aber aufgrund der fehlenden Struktur keine eindeutige Definition [Hus93]. Ein formales Modell mit mathematisch präziser Syntax und Semantik könnte ein exaktes Abbild des dargestellten Systems liefern, das z.B. die Computer-gestützte Analyse ermöglicht [Tur13], ist jedoch nicht einfach verständlich [Hus93]. Die semi-formale Darstellung stellt einen Kompromiss zwischen Verständlichkeit und Abstraktion dar [Hus93]. Sie basiert zwar auf einer formalen Struktur aus definierten Elementen und ihren Beziehungen, aber deren Inhalt wird nicht formal beschrieben. Eine solche Abstraktion kann die Darstellung komplexer Inhalte und das Erreichen eines gemeinsamen Verständnisses vereinfachen [Tur13].

Weiterhin ist zur Beschreibung der E/E-Architektur eine Modellierungssprache nötig, die Systeme unterschiedlicher Disziplinen wie Software oder Hardware beschreiben kann. Eine Erweiterung von UML im Systems Engineering, die Systems Modeling Language (SysML), erlaubt eine solche Beschreibung von Systemen unabhängig von ihrer Disziplin [Wei06]. Ihre Stärken liegen in der Spezifikation von Anforderungen, Struktur, Verhalten, Zuweisungen und Einschränkungen der Systemeigenschaften [Obj15].

Aus diesen Gründen wird ein SysML-basiertes, semi-formales Domänenmodell als Grundlage zur Beschreibung einer erweiterbaren E/E-Architektur entwickelt.

Semi-formale Beschreibungsmethode mit SysML

Das Block Definition Diagram (BDD) in SysML erlaubt die Definition von Blöcken und ihren Beziehungen, z.B. zur Abbildung der Systemhierarchie. Ein Block bildet verschiedene Elemente ab, z.B. Sensoren oder Apps. Er basiert auf einer SysML Metaklasse, die um sogenannte Stereotypen mit zusätzlichen fest-definierten Eigenschaften erweitert werden kann. Mögliche Beziehungen zwischen Blöcken sind Abhängigkeiten, Assoziationen, Generalisierungen, Aggregationen oder Kompositionen. Die interne Struktur eines Blocks wird mit einem Internal Block Diagram (IBD) dargestellt. Im IBD können Einschränkungen, Wirkungsweisen, Teilbezüge zu anderen Blöcken, Werte oder Eigenschaften spezifiziert werden [Obj15].

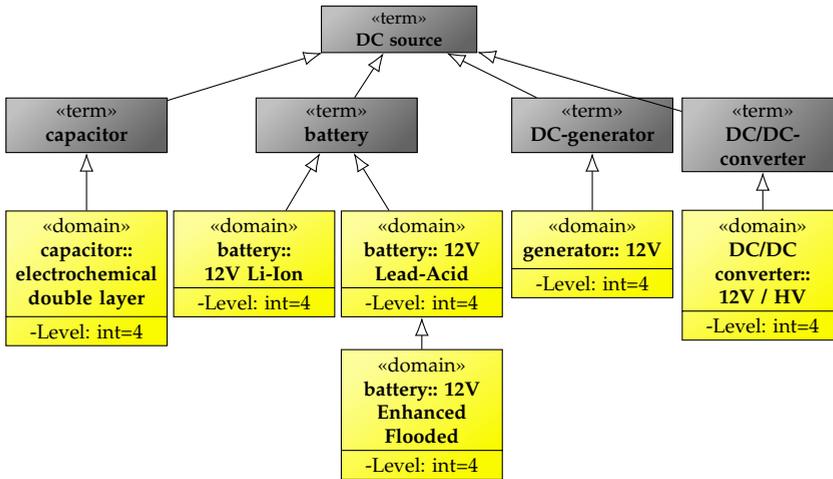


Abbildung 4.1.: Ausschnitt aus dem SysML Blockdiagramm zur Klassifizierung von Gleichstromquellen für 12 V durch den Term Block „DC source“

Das Domänenmodell basiert auf zwei definierten Block-Stereotypen: Domain und Term. „Domain“-Blöcke repräsentieren reale Objekte der E/E-Architektur ähnlich des Beispiels in [Wei06]. „Term“-Blöcke dienen dagegen, wie in Abbildung 4.1 gezeigt, ausschließlich als Generalisierung von Domain-Blöcken. Es handelt sich hierbei um auf bekannten Fachausdrücken beruhende Sammelbegriffe, die das Verständnis des Modells erleichtern sollen. Sie stehen nicht für reale, in der E/E-Architektur integrierbare Komponenten und können deshalb im Gegensatz zu Domain-Blöcken nicht als Objekte (entities), z.B. für ein Systemmodell, instanziiert werden. In diesem Beispiel wird zunächst der Überbegriff Gleichstromquelle (DC-source) weiter unterteilt in Kondensatoren, Batterien, Gleichstromgeneratoren oder -wandler. Diese spezifizieren mögliche Komponenten, wie die Li-Ionen- beziehungsweise Bleisäurebatterie, im 12 V-Netz. Letztere besitzt in diesem Fall noch eine spezielle Ausführung.

Die Basis des entwickelten Domänenmodells bildet eine auf mehreren architektonischen Ebenen beruhende Dekomposition der E/E-Architektur. Diese Ebenen werden als Attribute der Domain-Blöcke modelliert. Term-Blöcke haben keine zugehörigen Ebenen. Für eine bessere Lesbarkeit wird außerdem ein Farbcode zur Unterscheidung der Ebenen verwendet. Die eingeführten Ebenen und ihre zugehörigen Farben werden in Tabelle 4.1 dargelegt.

Ebene	Farbe	Objekt	Beschreibung
IX	blau	Infrastruktur	Flottenoperationen mit Vernetzung (V2X, Cloud-Services)
VIII	türkis	Fahrzeug	Fahrzeug als Endprodukt inklusive IKT, Hydraulik und Mechanik
VII	grün	E/E-Plattform (/ -Architektur)	Realisierung aller Automotive Functions
VI	hellblau	Netzwerk	Informations- und Energieverteilung (ohne logisches Netzwerk)
V	hellgrün	Gerät	Informations- und Energieverarbeitung z.B. ein Steuergerät
IV	gelb	Komponente	Disziplinenabhängige Funktionalitäten bereitstellen z.B. Hardware eines Steuergeräts
III	orange	Modul	Einzelne Funktionen bereitstellen z.B. PCM
II	hellgelb	Funktionsblock	Einzelne Unterfunktionen bereitstellen z.B. RAM
I	weiß	Atomares Element	Leiten, schalten z.B. Transistor

Tabelle 4.1.: Hierarchische Dekomposition der E/E-Architektur

4.3. Domänenmodell einer funktions-unabhängigen E/E-Architektur

Das Domänenmodell basiert auf der in Tabelle 4.1 dargelegten hierarchischen Dekomposition der E/E-Architektur in neun aufeinander aufbauende Ebenen, die es erlauben, in einzelne Elemente der E/E-Architektur einzutauchen und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten darzustellen. Angelehnt an die in Kapitel 4.1 vorgestellten, auf der Systemstruktur basierenden Modellansätze erfolgt die Einteilung der Ebenen anhand verschiedener Funktionsebenen des Systems unabhängig von den Arbeitsschritten des PEP.

Die höchsten zwei Ebenen VIII Fahrzeug und IX Infrastruktur reflektieren, dass die E/E-Architektur kein in sich geschlossenes System darstellt. Mögliche Interaktionen von Apps mit hydraulischen oder mechanischen Komponenten werden auf Fahrzeugebene berücksichtigt. Außerdem können Cloud-Services mit V2X Kommunikation zur Steigerung von Komfort und Sicherheit auf der Infrastrukturebene abgebildet werden.

Der Kern des Modells ist allerdings die Unterscheidung der Ebenen E/E-Plattform (VII) und Netzwerk (VI). Sie ermöglicht die Beschreibung einer nach Kapitel 2.1.2 durch die Trennung von Funktion und Hardware um Apps erweiterbaren E/E-Architektur. Eine solche Trennung wird mit Hilfe einer Rechnerplattform realisiert. Die Plattform virtualisiert das zugrundeliegende physische Netzwerk, Steuergeräte, Kommunikation und Energieversorgung, mittels Laufzeitumgebung, wie es in Computer-Architekturen üblich ist. Sie stellt zudem Schnittstellen zur Installation von Apps oder für den Anschluss neuer Sensoren oder Aktoren zur Integration von Automotive Functions bereit. Die Bezeichnung E/E-Plattform statt E/E-Architektur betont die Änderung in der Systemstruktur erweiterbarer E/E-Architekturen, die den heutigen Steuergeräte-Fokus noch mehr in Richtung Software verschiebt.

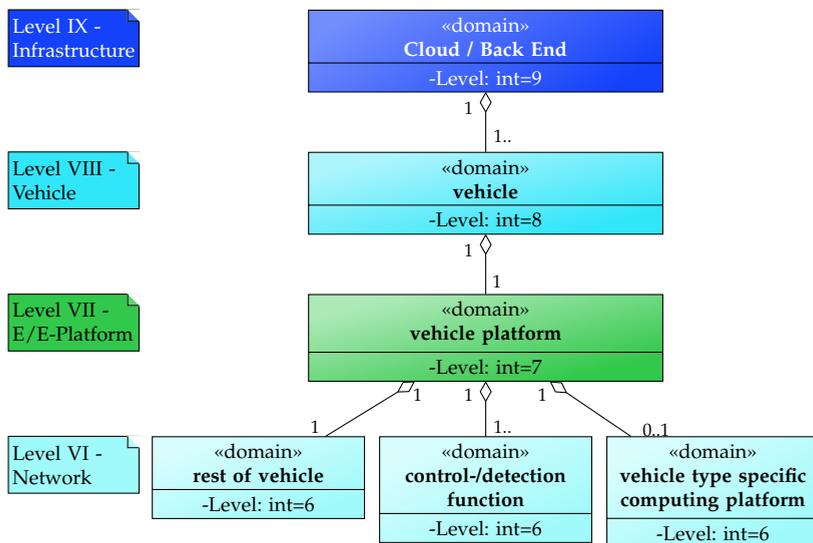


Abbildung 4.2.: Domänenmodell mit den Elementen der Ebenen IX Infrastruktur bis VI Netzwerk

In Abbildung 4.2 fasst der Domainblock Steuer-, Regel- und Erkennungsfunktionen (Control-/ Detection Functions) alle, zur Abbildung der Automotive Functions benötigten, Übertragungsfunktionen zusammen, während die „Vehicle type Specific Computing Platform“ (VSCP) die Rechnerplattform darstellt und „Rest Of Vehicle“ (ROV) übrig gebliebene Legacy-Steuergeräte,

Sensoren, Aktoren und ihre Netze, zusammenfasst. Folglich wird von Ebene VII zu Ebene VI das durch die Integration der Automotive Functions entstehende logische Netzwerk und das in der Rechnerplattform integrierte physische Netzwerk getrennt. Die Netzwerkebene VI ist für die Beschreibung einer etablierten funktionsorientierten E/E-Architektur demzufolge nicht erforderlich, da auf Ebene VII die gesamte E/E-Architektur definiert wird, die, ohne eine solche Zwischenschicht, anschließend auf Geräteebene V in die einzelnen, zur Abbildung der Funktionen erforderlichen Geräte, Steuergeräte, Sensoren und Aktoren, aufgeteilt werden kann.

Abbildung 4.3 zeigt die weitere Dekomposition verschiedener Elemente. Auf Ebene V „Gerät“ werden beispielsweise Steuergeräte, Übertragungsfunktionen oder das Kommunikations- und Energieversorgungsnetz abgebildet. Die weitere Zerlegung auf tieferen Ebenen führt für die betrachteten Elemente zusätzlich zu einer Aufteilung in die einzelnen Disziplinen Software (SW), Hardware (HW), Kommunikation und Energieversorgung. Ebene IV betrachtet Komponenten wie Apps oder den Kabelsatz. Diese werden auf Ebene III in Module, auf Ebene II in Funktionsblöcke und auf Ebene I in ihre atomaren Elemente zerlegt.

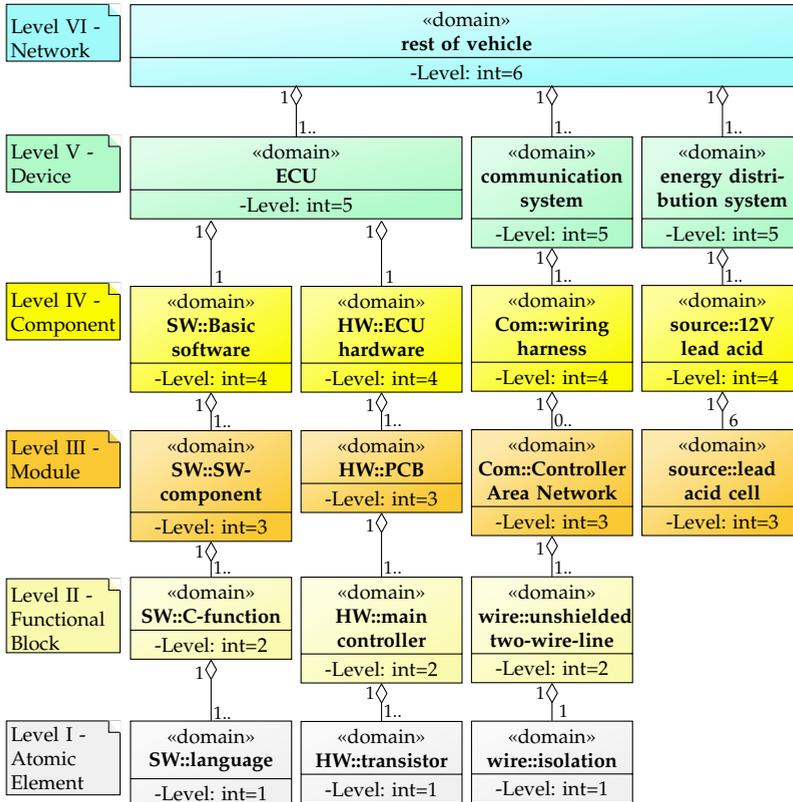


Abbildung 4.3.: Ausschnitt der unteren Ebenen des Domänenmodells aus Sicht des Elements Rest of Vehicle: von Ebene V Device bis Ebene I atomares Element.

5. Design Space Exploration Energieversorgungsnetz

Eine Design Space Exploration (DSE) untersucht verschiedene Alternativen im Entwurf eines Systems vor dessen Implementierung unter Berücksichtigung von Randbedingungen [KJS10], [SHL10].

Ihr Ziel ist es anhand der Variation n ausgewählter Entwurfsparameter eines definierten n -dimensionalen Designraums einen optimalen Lösungsraum zu extrahieren, wobei Einschränkungen der Parameter einfließen. Wenn mehr als ein Parameter untersucht wird, handelt es sich um ein multikriterielles Optimierungsproblem. Die Untersuchung des definierten Designraums verläuft nach [HB13] auf Basis folgender fünf Schritte:

1. Definition des Entwurfproblems als Grundlage für die DSE
2. Kreieren verschiedener Lösungen auf Basis der gewählten Freiheiten und Randbedingungen
3. Abschätzung von nicht-funktionalen Eigenschaften jeder Lösung
4. Untersuchung des Lösungsraums anhand der im ersten Schritt definierten Anforderungen
5. Auswahl eines Designs

Zielkonflikte im Entwurf werden dabei durch einen Satz inkompatibler optimaler Lösungen widerspiegelt [KTZ05]. Beispiel ist der Konflikt zwischen minimalem Leitungsquerschnitt für geringes Gewicht und großen Leitungsquerschnitten für geringe Verluste durch kleine Übertragungswiderstände. Mögliche Methoden zum Umgang mit solchen Zielkonflikten eines multikriteriellen Optimierungsproblems werden in Kapitel 5.1 erläutert.

Im Anschluss diskutiert Kapitel 5.2 ausgewählte Key-Performance-Indicators (KPIs), die einen Lösungsraum zur quantitativen Beschreibung der in der DSE generierten Entwürfe erzeugen. Dieser erlaubt eine systematische Analyse und Bewertung des betrachteten Entwurfsraums. Als Grundlage zur Definition der KPIs werden die aus dem Experteninterview gewonnenen und priorisierten Anforderungen aus Kapitel 3 herangezogen.

Schließlich analysiert Kapitel 5.3 sowohl Freiheiten als auch Randbedingungen des Energiebordnetzes einer erweiterbaren E/E-Architektur. Dabei werden in Kapitel 2 aufgezeigte Trends, die das Energieversorgungsnetz in Zukunft prägen werden, berücksichtigt. Ziel dieser Abgrenzung des Entwurfsraums der DSE ist es, vielversprechende Auslegungsparameter zu ermitteln.

5.1. Lösung eines multikriteriellen Optimierungsproblems

Das größte Problem einer multikriteriellen Optimierung ist der Umgang mit Zielkonflikten durch inkompatible Lösungen. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass es keinen weiteren Punkt gibt, der in allen Zielgrößen überlegen ist [Ehr05]. Eine einfache Lösung wäre es, das Problem durch eine zeitlich aufeinanderfolgende Optimierung von gewichteten Zielgrößen in mehrere eindimensionale Probleme zu überführen. Allerdings werden bei der Gewichtung von Zielen alle Lösungen, die höher priorisierten Teilzielen widersprechen, kategorisch vom Lösungsraum ausgeschlossen, weshalb dieses Vorgehen sich nicht für die hier angestrebte Untersuchung von Auslegungsvarianten des Energiebordnetzes eignet.

Eine alternative Möglichkeit zur Lösung eines Problems mit mehreren Optimierungskriterien ist das Bilden einer gewichteten Summe zur Generierung einer übergeordneten Zielgröße z [SvH10]. Das Gewichten und Aufsummieren von Teilzielen überführt das mehrdimensionale Problem in ein eindimensionales Problem. Dies ermöglicht den einfachen und direkten quantitativen Vergleich der Alternativen.

$$z = \sum_{k=1}^n w_k z_k \quad \text{mit} \quad \sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad (5.1)$$

Allerdings erfolgt die Gewichtung subjektiv und sie erfordert bereits vor der eigentlichen Optimierung Wissen über die Abhängigkeiten der Zielgrößen und Parameter. Damit ist es nicht möglich, den Einfluss verschiedener Parameter des Energieversorgungsnetzes auf ausgewählte Auslegungskriterien wertefrei zu untersuchen. Ein weiterer Nachteil nach [SvH10] ist, dass bei nicht konvexen Problemen Alternativen aus dem betrachteten Lösungsraum ausgeschlossen werden können.

Die Pareto-Front liefert hingegen alle nicht dominierten Alternativen des Lösungsraums [Alm+15]. Nicht dominiert heißt, dass es keinen Punkt gibt, der in allen Zielen besser ist. Demnach kann im Lösungsraum kein Kriterium

verbessert werden, ohne dass sich ein anderes verschlechtert. Abbildung 5.1 zeigt das Prinzip der Dominanz am Beispiel des Zielpunktes \hat{x} im Zielgrößenraum [SvH10]: \hat{x} ist in beiden Kriterien besser als die von ihm dominierten Punkte und schlechter als die ihn dominierenden Punkte. Die Punkte der grauen Bereiche sind gegenüber \hat{x} jeweils nur in einem Kriterium überlegen. Die Pareto-Front beinhaltet die Menge aller gleichwertigen Kompromisslösungen, aus welchen die bevorzugte Alternative gewählt werden kann.

Definition 5.1 Pareto-Front: Die Lösung $\hat{x} \in \mathcal{X}$ ist Pareto optimal (effizient) wenn kein $x_i \in \mathcal{X}$ existiert, für welches gilt $f(x_i) < f(\hat{x})$. Es gilt folglich [Ehr05]:

$$\exists \hat{x} \in \mathcal{X} : \begin{cases} f_k(\hat{x}) \leq f_k(x_i) & \forall k, i \in 1, \dots, n \\ f_k(\hat{x}) < f_k(x_i) & \forall k, i \in 1, \dots, n \end{cases} \quad (5.2)$$

\hat{x} dominiert alle $x_i \in \mathcal{X}$ und $f(\hat{x})$ dominiert $f(x_i)$. Die Pareto-Front beinhaltet den Satz aller nicht dominierten Alternativen $\hat{y} = f(\hat{x}) \in \mathcal{Y}$ [Ehr05].

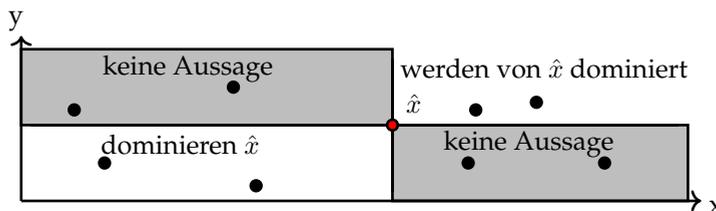


Abbildung 5.1.: Das Prinzip der Dominanz am Beispiel des Zielpunktes \hat{x} im Zielgrößenraum [SvH10]

Nachteil der Pareto-Optimierung ist das Fehlen einer direkten quantitativen Vergleichbarkeit der gefundenen Alternativen. Die Auswahl wird nur auf optimale Kompromisse reduziert.

Um einerseits keine Lösungen aus dem betrachteten Lösungsraum auszuschließen und andererseits eine objektive Bewertung verschiedener Entwürfe zu ermöglichen, werden die im Folgenden ausgewählten Auslegungskriterien zunächst einzeln ermittelt und über die zugehörige Pareto-Front vielversprechende Lösungen abgeleitet. Aus dieser Basis könnte durch die nachgelagerte Generierung einer einzelnen Architekturkennzahl über eine gewichtete Summe eine optimale Lösung ausgewählt werden.

5.2. Definition von Key-Performance-Indicators zur Bewertung des Energieversorgungsnetzes

Ziel der gesuchten KPIs ist es, in frühen Entwicklungsphasen fundierte Aussagen über Vor- und Nachteile alternativer Architekturentwürfe zu liefern. Deshalb müssen sie messbare Zielgrößen erzeugen, die eine nachvollziehbare Systematik zur Bewertung unterschiedlicher Entwürfe ermöglichen.

Die in Kapitel 3 dargelegten Ergebnisse des Experteninterviews zeigen eine Übersicht bestehender und zukünftiger Optimierungskriterien und ihre Priorisierung als Grundlage zur Definition von KPIs. Die ermittelten allgemeinen Anforderungen in Abbildung B.2 zeigen die hohe Relevanz von minimalen Kosten, minimalem Gewicht, Berücksichtigen der FuSi und Integration von fail-operational. Gleichzeitig sind Spannungsstabilität, geringe CO₂-Emissionen, eine bessere Struktur und ein geringerer Kabelaufwand in Abbildung B.4 wichtige spezifische Anforderungen an die Energieversorgung.

Kapitel 3.3.6 zeigt bereits, dass eine fail-operational Auslegung sicherheitsrelevanter Systeme zukünftig unerlässlich ist. Dies betrifft beides, die Informations- und Energieverteilung. Zwar können beide Bereiche getrennt voneinander ausfallsicher entworfen werden, allerdings würde nach [LE14] eine Kombination von Maßnahmen in beiden Bereichen zur gegenseitigen Absicherung die Realisierung von Ausfallsicherheit mit geringem Mehraufwand erlauben. Powerline Communication könnte beispielsweise die Datenübertragung im Fehlerfall garantieren, wie auch bei lebenden Organismen nicht nur das Nervensystem, sondern auch der Blutkreislauf mittels Hormonen einen Teil der Kommunikation übernimmt [LE14]. Dies erfordert Kriterien, die eine Kombination aus Maßnahmen im Kommunikations- und Energieversorgungsnetz analysieren. Aus diesem Grund wird, über die Berücksichtigung mindestens zweier unabhängiger Energiequellen hinaus, darauf verzichtet, einen KPI zur Bewertung der Ausfallsicherheit der Energieversorgung zu entwickeln. Allerdings wird die Sicherheit zusätzlich über den KPI Spannungsstabilität bewertet, da sie ausschließlich das Energieversorgungsnetz betrifft und zur Sicherstellung der Funktionalität erforderlich ist.

Nach Kapitel 3.3.2 hängen die Emissionen sowohl vom Gewicht als auch von der Energieeffizienz ab und beeinflussen den Kabelaufwand. Der abgeleitete KPI Energieverbrauch Gesamtfahrzeug berücksichtigt folglich das Zusammenspiel all dieser Kriterien. Schließlich beinhaltet der KPI TCO das heute wichtigste Optimierungskriterium, die Stückkosten, ergänzt um die Betriebskosten. Im Folgenden werden diese Kriterien ausführlich dargelegt.

5.2.1. Spannungsstabilität

Für den sicheren Betrieb von E/E-Systemen ist wichtig, dass die Spannungsgrenzen aus Kapitel 3.3.7 an den Senken eingehalten werden, da sonst die Funktionalität nicht oder nur teilweise bereitgestellt wird. Ihre Einhaltung stellt damit eine wichtige Grundvoraussetzung für die Auslegung dar.

In [KG11] wird die Spannungsstabilität verschiedener Konfigurationen über einen Puffer, den minimal auftretenden Abstand zu diesen Grenzen, verglichen. Alternativ dient in [Koh14] die Größe der maximalen Abweichung von einem definierten Grenzwert bei einem worst case Szenario zur Bewertung der Spannungsstabilität. Die Spannweite zwischen maximalem und minimalem Spannungswert kann ebenfalls für einen Vergleich herangezogen werden. Diese Bewertungsmethoden haben gemeinsam, dass sie alle keine Rückschlüsse auf die Volatilität, die tatsächliche Schwankung der Spannung über der Zeit, zulassen. Infolgedessen ist nicht ersichtlich, ob es sich um einen konstanten Wert mit wenigen Ausreißern oder ein Breitbandrauschen innerhalb der ermittelten Spannweite handelt [KG11].

In der Statistik können über sogenannte Quantile, Lageparameter, die eine geordnete Datenreihe in Bereiche aufteilen, Rückschlüsse auf die Streuung gezogen werden. Der Median oder 50-Prozent-Quantil spaltet eine geordnete Datenreihe in zwei gleich große Hälften. Zusammen mit dem Interquartilsabstand zwischen dem 25-Prozent-Quantil und dem 75-Prozent-Quantil wird der Boxplot gebildet. Je kleiner der Interquartilsabstand und je näher der Median an der gewünschten Systemspannung ist, desto stabiler ist die Spannung.

Ähnlich zu diesem Ansatz wird in [KG11] die Häufigkeitsverteilung $f(U)$ der ermittelten Spannungswerte während eines definierten Belastungsmodells zur Bestimmung des Gütewerts L_{St} der Spannungsstabilität herangezogen. Dabei wird jeder Wert abhängig von seinem Abstand zum Nennwert linear zwischen null für die kritischen Grenzwerte U_{min} und U_{max} und eins für den Nennwert gewichtet¹.

$$L_{St} = \sum_{U=U_{min}}^{U_n} f(U) \left(1 - \frac{U_n - U}{U_n - U_{min}}\right) + \sum_{U>U_n}^{U_{max}} f(U) \left(1 - \frac{U - U_n}{U_{max} - U_n}\right) \quad (5.3)$$

Eine alternative Methodik aus der Statistik zur Ermittlung der Streuung ist die empirische Varianz σ und die daraus berechnete Standardabweichung s_{emp} , die durchschnittliche Abweichung der Messwerte x_i vom Mittelwert \bar{x} . Je kleiner die Standardabweichung, desto stabiler ist der Kurvenverlauf der

¹Indizes der Summation wurden korrigiert, da Formel und Beschreibung in [KG11] abweichen.

Spannung für das betrachtete Zeitintervall. Die Normierung der Standardabweichung mit dem Mittelwert liefert den Variationskoeffizient V für den Vergleich verschiedener Datensätze [Cle12]:

$$s_{emp} = \sqrt{\sigma(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (5.4)$$

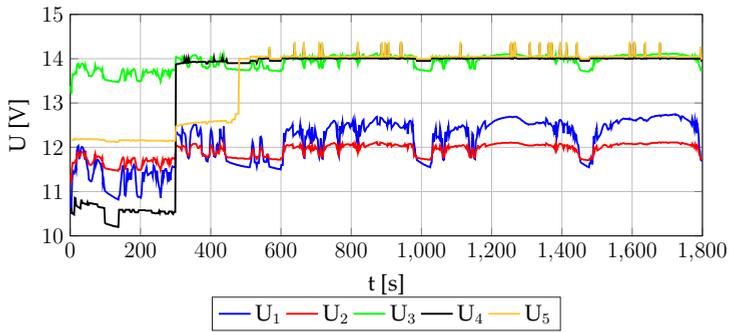
$$V = \frac{s_{emp}}{\bar{x}}. \quad (5.5)$$

Die Spannungsverläufe U_1 und U_2 in Abbildung 5.2 (a) schwanken um 12 V. U_3 hat denselben Verlauf wie U_2 , allerdings bei 14 V. U_4 und U_5 springen nach einiger Zeit von 10,5 V beziehungsweise 12 V auf 14 V und sind dort vergleichsweise stabil. Aufgrund der größeren Schwankungen wäre im Boxplot analog zur Standardabweichung in (b) beziehungsweise Varianzkoeffizient in (c) Spannung U_1 weniger stabil als Spannung U_2 . Allerdings lässt im Gegensatz zum Boxplot die normale Standardabweichung keine Rückschlüsse auf das passende Spannungsniveau zu, da die Abweichung abhängig von den Mittelwerten bestimmt wird. Beide Verfahren haben außerdem Probleme bei der Einordnung der Kurvenverläufe mit Sprung. Die relativ kurze Zeit bis zum Sprung fällt bei U_4 nicht in die Quantile, sondern zählt als Ausreißer, so dass diese Spannung fälschlicherweise als die stabilste eingeordnet wird. Bei der Standardabweichung über dem Mittelwert werden U_4 und U_5 dagegen deutlich schlechter als U_1 bewertet, trotz der geringeren Volatilität im gesamten Verlauf und dem insgesamt höheren Spannungsniveau.

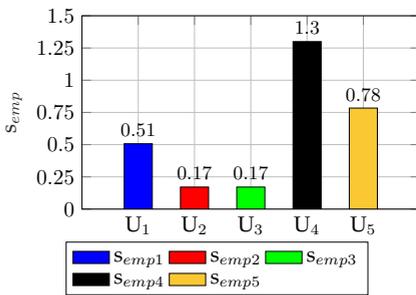
Wenn statt des Mittelwerts die Standardabweichung in (d) über die vorgegebene Systemspannung von 14,3 V ermittelt wird, lässt sich dies korrigieren, jedoch erscheint hier U_1 stabiler als U_2 , da die Spannungslage insgesamt näher an 14,3 V liegt. Dieselben Ergebnisse lassen sich mit der Berechnung des Gütewerts nach [KG11] in (e) erzielen. Im Unterschied zur Standardabweichung fällt allerdings die Abweichung bis zum Sprung bei der Bewertung nicht so stark ins Gewicht, weshalb die Standardabweichung zur Systemspannung als Bewertungskriterium für die Spannungsstabilität gewählt wird.

Definition 5.2 *Das Energieversorgungsnetz gilt als stabil, wenn für die Systemspannung während des gesamten Betriebs gilt $U \in [9,16]$ und die dynamische Überspannung 20 V nicht übersteigt.*

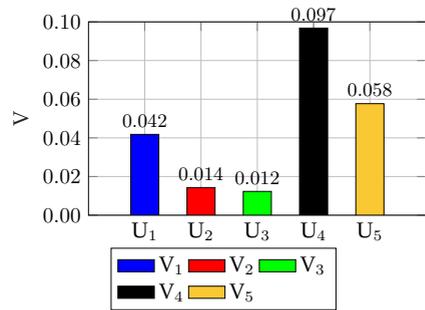
Die Stabilität verschiedener Energieversorgungssysteme wird über die Standardabweichung zu 14,3 V bewertet. Je kleiner der Wert ausfällt, desto stabiler ist die Spannung für das betrachtete Zeitintervall.



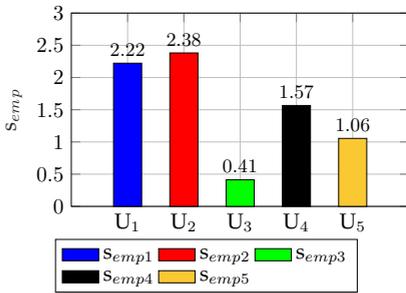
(a) Spannungsverläufe



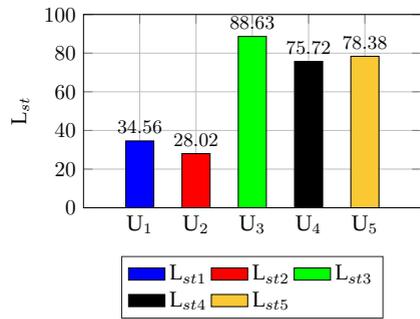
(b) Standardabweichung $s_{emp}(\bar{U})$



(c) Varianzkoeffizient $V(\bar{U})$



(d) Standardabweichung $s_{emp}(14,3\text{ V})$



(e) Gütewert

Abbildung 5.2.: Fünf verschiedene Spannungsverläufe (a), ihre zugehörige Standardabweichung (b) und Varianzkoeffizient (c) zum Mittelwert, Standardabweichung zu 14,3 V (d) und Gütewert (e) zur Bewertung der Stabilität.

5.2.2. Energieverbrauch Gesamtfahrzeug

Bereits zu Beginn dieses Kapitels wurde anhand des Leitungsquerschnitts auf das Problem sich widersprechender Optimierungskriterien hingewiesen. Die Auslegung der Leitungen beeinflusst einerseits das Gewicht des Fahrzeugs auf Ebene VIII in Abbildung 4.2 und andererseits die im Energieversorgungsnetz auf Ebene V in Abbildung 4.3 entstehenden Verluste. Beides wiederum bestimmt nach Kapitel 3.3.2 den, von der Energieversorgung verursachten, Anteil an CO₂-Emissionen im Verbrennungsfahrzeug oder die Reduktion der Reichweite im Elektrofahrzeug.

Die Auflösung des Widerspruches dieser Kriterien erfolgt über die Betrachtung ihrer gleichgewichteten Summe als KPI, den von beiden Optimierungskriterien beeinflussten spezifischen Verbrauch des Gesamtfahrzeugs auf Ebene VIII. Dadurch wird automatisch das Kriterium mit dem größeren Einfluss auf das übergeordnete System präferiert. Beispielsweise können im Verbrennungsfahrzeug, aufgrund der hohen Wandlungsverluste, Systeme mit geringen Leitungsverlusten von Vorteil sein, während im Elektrofahrzeug ein geringeres Gewicht den gesamten Energieverbrauch stärker reduzieren und damit größere Reichweiten ermöglichen kann.

Zunächst muss zur Bestimmung des Fahrverbrauchs der Energiebedarf W_c an den Rädern bekannt sein. Dieser errechnet sich abhängig vom Geschwindigkeitsprofil $v_c(t)$ und dem zu überwindenden Fahrwiderstand F_{ges} zu

$$W_c = F_{ges} \cdot s_c = F_{ges} \cdot \int_0^t v_c(\tau) d\tau. \quad (5.6)$$

Der Fahrwiderstand setzt sich aus mehreren Werten zusammen [PS16]:

$$F_{ges} = F_r(m_{veh}) + F_s(m_{veh}) + F_l(v_c(t)) + F_a(m_{veh}, a(t)) \quad \text{mit} \quad (5.7)$$

$$F_r = g \cdot c_r \cdot m_{veh} \quad (5.8)$$

$$F_s = g \cdot \sin(\beta) \cdot m_{veh} \quad (5.9)$$

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_l \cdot c_W \cdot A_{veh} \cdot v_c(t)^2 \quad (5.10)$$

$$F_a = F_{a,trans} + F_{a,rot} = m_{veh} \cdot a(t) + \frac{J_{Rad} + i^2 \cdot J_{Mot}}{r_{stat} \cdot r_{dyn}} \cdot a(t) \quad (5.11)$$

Auf befestigten Straßen entsteht der Rollwiderstand F_r fast vollständig aus den, im Koeffizient c_r berücksichtigten, Walkverlusten der Reifen [PS16]. Der, das Höhenprofil berücksichtigende, Steigungswiderstand F_s wird bei der Ermittlung des Fahrwiderstandes im Folgenden nicht weiter berücksichtigt, da der verwendete genormte Testzyklus kein hinterlegtes Höhenprofil enthält.

Der Luftwiderstand F_l errechnet sich aus der Frontfläche A_{veh} , der Luftdichte ρ_l , dem Luftwiderstandsbeiwert c_W und der Luftanströmgeschwindigkeit $v_c(t)$ des Fahrzeugs. Der translatorische Anteil des Beschleunigungswiderstands F_a hängt von der Beschleunigung $a(t)$ und dem Fahrzeuggewicht ab, der rotatorische Anteil von den Trägheitsmomenten der Räder J_{Rad} und des Motors J_{Mot} , der Übersetzung i sowie dem statischen r_{stat} und dynamischen r_{dyn} Reifenhalmes [PS16]. Der rotatorische Anteil ist unabhängig von der Variation des Energieversorgungsnetzes und folglich konstant, weshalb er ebenfalls nicht in die weitere Betrachtung eingeht.

Die Summe des Gewichts der Einzelkomponenten, Sicherungen m_{Si} , Energiespeicher m_{Sp} und Leitungen m_L , liefert den, für die DSE entscheidenden, veränderlichen Gewichtsanteil des Energieversorgungsnetzes m_{EVS} .

$$m_{EVS} = \sum_{i=1}^n m_{Si,i} + \sum_{k=1}^m m_{Sp,k} + \sum_{l=1}^l m_{L,l} \quad (5.12)$$

Die zu erbringende Antriebs- W_{Ant} und Rekuperationsenergie W_{Rek} bei integrierter Rückspeisung ergeben sich abhängig vom Antriebsstrangwirkungsgrad η_{Ant} zu

$$W_{Ant} = \int_0^t \frac{1}{\eta_{Ant}(\tau)} \cdot F_{ges}(\tau) \cdot s(\tau) d\tau \quad \text{für } (F_a > 0) \quad \text{und} \quad (5.13)$$

$$W_{Rek} = \int_0^t \eta_{Ant}(\tau) \cdot F_{ges}(\tau) \cdot s(\tau) d\tau \quad \text{für } (F_a < 0). \quad (5.14)$$

Hieraus kann schließlich der, vom Gewicht beeinflusste, spezifische Fahrverbrauch B_{sF} in $\frac{kWh}{100km}$ abhängig von der zurückgelegten Strecke s_c berechnet werden.

$$B_{sF} = \frac{W_{Ant} + W_{Rek}}{s_c} \cdot 100 \quad (5.15)$$

Die elektrischen Übertragungsverluste $P_{V,el}$ beruhen ebenfalls nicht nur auf der Auslegung, sondern auch auf der Fahrdynamik, Präferenzen des Fahrers und Umweltbedingungen wie Temperatur, Sicht und Wetter. Diese Parameter bestimmen den Betrieb der Lasten, z.B. Heizung oder Beleuchtung, und damit den, die Verluste verursachenden, Stromfluss durch das Netz. Für den Vergleich der Verluste unterschiedlicher Konfigurationen ist demnach ein festes Umfeldmodell zur Festlegung des Betriebs der Lasten P_i erforderlich. Dar-

aus lassen sich die Verluste der Energiespeicher $P_{V,Sp}$, Sicherungen $P_{V,Si}$ und Leitungen $P_{V,L}$ ermitteln.

$$B_{sEl} = \frac{\int_0^t \left(\sum_{i=1}^n P_i(\tau) + P_{V,el}(\tau) \right) d\tau}{s_c} \cdot 100 \quad \text{mit} \quad (5.16)$$

$$P_{V,el} = P_{V,Sp} + P_{V,Si} + P_{V,L} \quad (5.17)$$

Weiterhin muss zur Berechnung des Einflusses auf den Gesamtverbrauch der Wirkungsgrad η_{Vers} bei der Erzeugung, beziehungsweise Übertragung der elektrischen Energie über die jeweilige Energiequelle berücksichtigt werden. Dieser setzt sich im Verbrennungsfahrzeug aus dem Wirkungsgrad der VKM und des Generators zusammen, während im Elektroauto der Wirkungsgrad der HV-Batterie und des DC/DC-Wandlers berücksichtigt werden muss.

Definition 5.3 Die Pareto Front des spezifischen Energieverbrauchs B_s des Gesamtfahrzeugs liefert alle optimalen Kombinationen aus Gewicht m_{EVS} und elektrischen Verlusten $P_{V,el}$ des Energieversorgungsnetzes.

$$B_s = B_{sF}(m_{EVS}, v_c(t)) + \frac{1}{\eta_{Vers}} B_{sEl}(P(t), P_{V,el}(t)) \quad (5.18)$$

5.2.3. Gesamtbetriebskosten

Während nach Abbildung B.2 die Kosten pro im Fahrzeug integrierter Funktion heute das entscheidende Auslegungskriterium der E/E-Architektur sind, könnte sich diese Betrachtung, wie Kapitel 3.3.1 darlegt, durch eine Kombination der Trends autonomes Fahren und die sogenannte Ökonomie des Teilens (Share Economy) zukünftig ändern. Die Wettbewerbsfähigkeit eines Fahrzeugs würde dann durch die Reduktion der TCO entscheidend beeinflusst, wobei der von Entwicklungs- und Produktionskosten abhängige Kaufpreis weiterhin deren Startpunkt festlegt. Die Bewertung von Energiebordnetzentwürfen mittels TCO erfordert neben der Bestimmung des Anteils am Kaufpreis auch die Ermittlung der jeweiligen verursachten Betriebskosten.

Der Beitrag der Entwicklungskosten wird im Folgenden ausschließlich über die Unterschiede in den zu erbringenden Strafzahlungen für die CO₂-Emissionen c_{CO_2} berechnet. Der fahrzeugspezifische Grenzwert eines Pkws berechnet sich nach Gleichung 3.2 aus dessen Gesamtgewicht. Es werden die ab 2019 geltenden Grenzwerte von $95 \frac{gCO_2}{km}$ und Strafsätze von 95 € pro Gramm

aus Kapitel 3.3.2 angesetzt. Weiterhin wird der ab 2019 reduzierte Proportionalitätsfaktor sowie der bis 2016 geltende Gewichtskorrekturfaktor von 1372 kg verwendet, da bisher kein neues offizielles durchschnittliches Flotengewicht zur Gewichtsumrechnung veröffentlicht wurde.

Zur Abschätzung der Herstellungskosten werden die Materialkosten herangezogen. Sie lassen sich über die Menge der verbauten Komponenten und deren Stückkosten c_{Mat} überschlagen.

Die anteilig eingepreisten Kosten für Infrastruktur, Arbeits- und Betriebsmittel und Verwaltung aus Kapitel 3.3.1 können für verschiedene Entwürfe des Energiebordnetzes als konstant angenommen werden und eignen sich damit nicht für deren Bewertung. Für die restlichen Kostenanteile für Personal- und Arbeitsmittelaufwand in Entwicklung und Produktion liegt die Vermutung nahe, dass sie proportional zur Komplexität sind, z.B. durch viele Varianten oder Schnittstellen, siehe auch [Moo16]. Weiterhin könnte insbesondere der Entwicklungsaufwand umgekehrt proportional zum Anteil an Legacy sein, da wenig Veränderungen im Aufbau auch wenige Anpassungen in der Entwicklung erfordern. Es handelt sich hierbei allerdings nur um Thesen, die nicht auf Basis belegter Kostenfunktionen nachgewiesen werden können. Weiterhin ist es ohne konkrete Zahlen zu bisherigen Kosten und deren Verhältnis zu Legacy und Komplexität nicht möglich, deren Einfluss korrekt abzuschätzen, weshalb diese Kosten im Weiteren nicht betrachtet werden.

Die Betriebskosten setzen sich aus der jährlich zu erbringenden Steuerlast c_{ste} nach Gleichung 3.1 und die durch den Fahrbetrieb verursachten spezifischen Energiekosten c_{en} in $\frac{\text{€}}{100\text{km}}$ durch Kraftstoff- oder Stromverbrauch zusammen. Für Ihre Bestimmung ist folglich eine über einen bestimmten Zeitraum erbrachte Fahrstrecke festzulegen.

Auf eine statistische Berechnung der Servicekosten für mögliche Ausfälle von Leitungen und Absicherung wird aufgrund der in Kapitel 3.3.3 angegebenen geringen Ausfallraten für automotiv Komponenten verzichtet.

Definition 5.4 *Der Beitrag des Energieversorgungsnetzes zur Wettbewerbsfähigkeit eines Fahrzeugs wird über dessen Kostenbeiträge c_x abgeschätzt. Diese setzen sich aus den statischen Strafzahlungen für die CO_2 -Emissionen c_{CO_2} , Materialkosten c_{Mat} und zu erbringende Steuerlast des Fahrzeughalters c_{ste} sowie die dynamisch zu ermittelnden Energiekosten c_{dyn} im Fahrbetrieb zusammen.*

$$c_{stat} = c_{\text{CO}_2} + \sum_{i=1}^n c_{Mat,i} + c_{ste} \quad (5.19)$$

$$c_{dyn} = c_{en} \cdot s \quad (5.20)$$

5.3. Freiheiten und Randbedingungen im Entwurf des Energieversorgungsnetzes

Die DSE des Energiebordnetzes kann auf verschiedenen Abstraktionsebenen des in Kapitel 4 beschriebenen Modells erfolgen. Auf der Komponentenebene IV unterscheidet die Disziplin Energieversorgung in Abbildung 5.3 zwischen drei Funktionsgruppen: Energiesenken, -quellen und -verteilung.

In dieser Arbeit sind unter dem Begriff Energiesenken alle Komponenten zusammengefasst, die elektrische Energie aus dem Energienetz konsumieren. Rein mechanische oder hydraulische Komponenten werden nicht weiter berücksichtigt. Hierzu gehören auch mechanische Bauteile des Energieversorgungsnetzes wie Kabelkanäle, Umschäumungen etc., da sie für die betrachteten Überlegungen, wie das Energieversorgungsnetz gestaltet werden soll, keinen Mehrwert liefern. Als Energiequellen werden Komponenten bezeichnet, die elektrische Energie abgeben können, um die Versorgung der Senken zu übernehmen, auch wenn sie eventuell, wie beispielsweise Batterien, ebenfalls Energie aufnehmen müssen, um geladen zu werden. Zur Energieverteilung, dem Kabelbaum, zählen alle Komponenten, die Energie zwischen den Quellen und Senken übertragen.

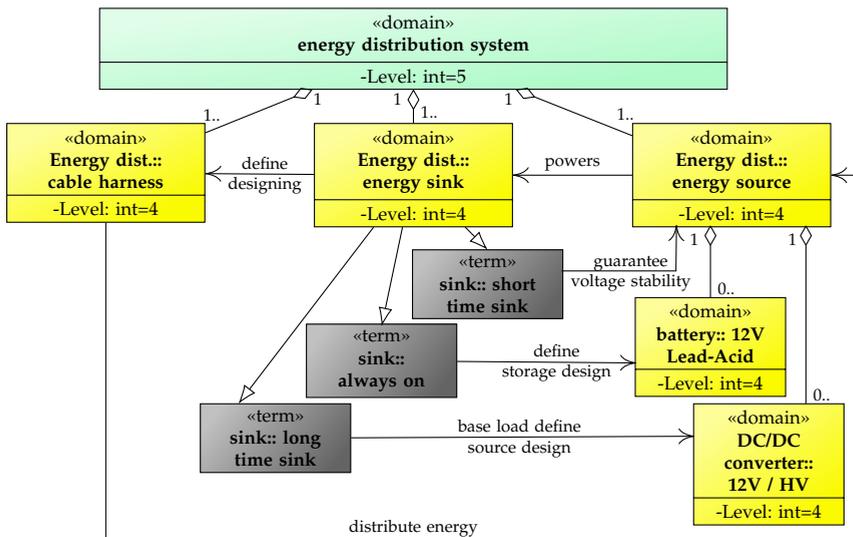


Abbildung 5.3.: Zusammenhang zwischen den drei Funktionsgruppen des Energiebordnetzes: Senken, Quellen und Verteilung

Abbildung 5.3 zeigt die Abhängigkeiten zwischen den drei Komponentengruppen. Die Energiesenken bestimmen durch ihre Leistungswerte maßgeblich die Auslegung der Energiequellen und -verteilung. Bereits Kapitel 2.2 zeigt auf, dass in Verbrennungsfahrzeugen die Grundlast die Dimensionierung des Generators und die Start-Fähigkeit die Auslegung des Energiespeichers festlegen.

Jede Komponente besitzt charakteristische Parameter, die durch die Variation der Bauteile auf den darunterliegenden Ebenen beeinflusst werden können. Als Beispiel bestimmt die Zahl der parallelen Zellen einer Batterie deren Kapazität, wobei eine bestimmte Zahl serieller Zellen zum Erreichen der Systemspannung verbaut werden muss.

Im Folgenden werden zunächst die, durch eine Trennung von Software und Hardware erwarteten, Veränderungen im Design einer nach Kapitel 4.3 definierten E/E-Plattformen und die dadurch möglichen Rückwirkungen auf die Auslegung des Energieversorgungsnetzes diskutiert. Anschließend werden Merkmale der Auslegung analysiert und für jede der drei definierten Komponentenklassen separat dargelegt. Dabei sind folgende grundlegende Variationen beim Entwurf des Energiebordnetzes möglich:

- Variation der Technologie eines Bauteils
- Variation der Multiplizität eines Bauteils
- Variation der Position im Fahrzeug eines Bauteils
- Variation der Topologie bei der Vernetzung von Bauteilen
- Variation der Verlegewege der Verbindungen (Routing)

5.3.1. Qualitative Diskussion von Freiheitsgraden im Design von Plattform-Ansätzen

Jede Automotive Function besteht aus einer oder mehreren Übertragungsfunktionen $G(\dots)$, die das Verhältnis der Eingangs- und Ausgangsgrößen der Kontroll-/ Regel- und Erkennungsfunktionen beschreiben [Bor14] und durch Apps implementiert werden. Die Integration der Apps unterscheidet funktionsorientierte-Architekturen von Plattform-Ansätzen nach Kapitel 4.3.

Abbildung 5.4 zeigt die, in etablierten funktionsorientierten E/E-Architekturen bestehende, feste Verbindung von Apps mit ihren ausführenden Geräten. Grund hierfür kann die verteilte Entwicklung mit dem Grundsatz „ein Zulieferer pro Steuergerät“ [BGS16] oder der hohe Legacy Anteil sein. Neue Funktionen werden mit Hilfe neuer Geräte in eine bestehende Struktur integriert

[BAG15]. Das Resultat ist ein physikalisches Netzwerk, dessen Struktur, wie in Abbildung 5.4 dargelegt, der Partitionierung von Apps auf Steuergeräten (Deployment architecture) folgt. Damit prägt die Funktionsentwicklung den Systemaufbau der E/E-Architektur. Wie in Kapitel 4.1 diskutiert, reflektieren heutige Modelle zur Beschreibung der E/E-Architektur diese Abhängigkeit mit der direkten Ableitung der physischen Struktur und ihrer Komponenten aus dem zuvor definierten logischen Netzwerk.

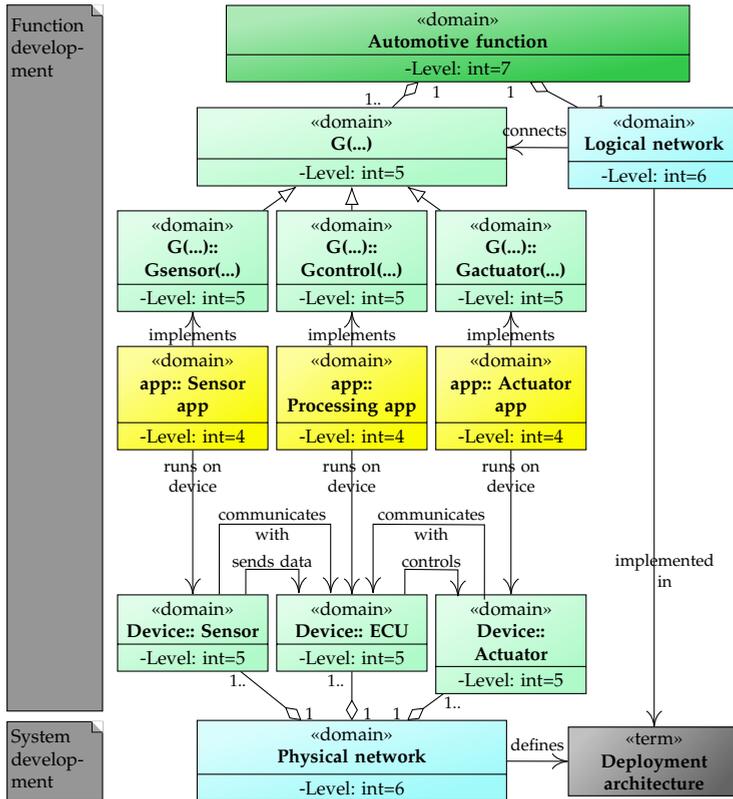


Abbildung 5.4.: Zusammenhang zwischen logischem und physischem Netzwerk in einer klassischen E/E-Architektur

Im Gegensatz dazu muss bei einer Plattform nicht bereits in der Entwicklung festgelegt werden, welches Gerät welche Applikation ausführt. Dies könnte laut [Kü+14] sogar von der RTE zur Laufzeit entschieden werden. Sie parti-

tioniert die Apps auf verfügbaren Geräten und unterbricht damit die in Abbildung 5.4 gezeigte direkte Verbindung zwischen App und Device. Ist die Verteilung von Apps auf Steuergeräten frei, sind auch Sensoren und Aktoren nicht länger an bestimmte Steuergeräte gebunden. Für die RTE ist, wie Abbildung 5.5 zeigt, nicht entscheidend, welche Komponente welche Aufgaben erfüllt, sondern nur, dass sie erfüllt werden und die Daten dem System zur Garantie der Funktionalität zur Verfügung stehen.

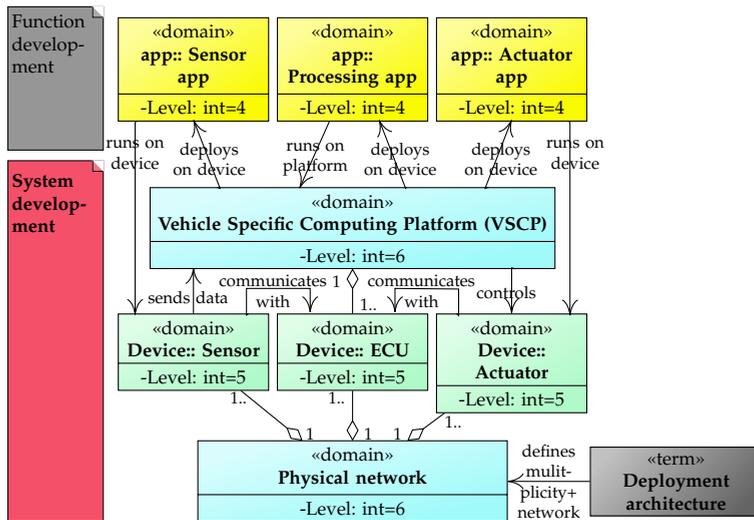


Abbildung 5.5.: Zusammenhang zwischen logischem und physischem Netzwerk in einer IKT-Plattform

Folglich ist nicht mehr das physische Netzwerk, die Steuergeräte ihre verbundenen Sensoren und Aktoren und deren benötigte Vernetzung, für die Realisierung von Automotive Functions verantwortlich, sondern die VSCP, die die Apps ausführt. Damit gibt es zwischen dem physischen und logischen Netzwerk keine direkte Zuordnung mehr. Dies führt zu neuen Freiheitsgraden in der Systementwicklung, da sich das physische Netzwerk nicht länger abhängig von den Funktionen ergibt. Das logische Netzwerk stellt, wie in Abbildung 5.5 gezeigt, weiterhin Anforderungen an die Auslegung z.B. die Integration einer Mindestanzahl an Steuergeräten zur Bereitstellung der erforderlichen Rechenleistung, eine erforderliche Datenübertragungsrate oder Absicherung. Allerdings ist deren Umsetzung, z.B. die Zahl integrierter Steu-

ergeräte oder deren Position im Fahrzeug, unabhängig von der Funktionalität frei wählbar, solange die Anforderungen erfüllt werden [Bra+17].

5.3.2. Energiesenken als Randbedingung der Auslegung

Die Auswahl der Energiesenken leitet sich aus den Funktionen ab, wobei die Freiheiten in der Auslegung vielfältig sind. Tabelle 5.1 zeigt neben den Freiheiten auch die zwischen ihnen bestehenden Abhängigkeiten auf.

Die Technologie kann abhängig von priorisierten Merkmalen variieren. Ein Beispiel ist der Einsatz von Halogen-, Xenon-, LED- oder Laserscheinwerfern. Die Positionierung im Fahrzeug ist in diesem Fall aufgrund der Funktion ortsgebunden, kann aber bei anderen Funktionen auch frei erfolgen. Abhängig von der Technologie variiert der durchschnittliche und maximale Leistungsbedarf P_i der verbauten Senken, dessen zeitlicher Verlauf wiederum zu einem Betriebsmodell führt. Dieses ist je nach Senke von Umgebungsbedingungen, persönlichen Vorzügen des Fahrers und dem Fahrzyklus abhängig. Schließlich ergibt sich aus der Zahl der Komponenten und dem Betriebsmodell der Lastgang $P_{ges}(t)$. Dieser setzt die Randbedingung für die, zur sicheren Versorgung erforderliche, Auslegung sowohl der Energiequellen als auch der Energieverteilung.

Zur Erzeugung fester Randbedingungen wird die in Tabelle D.3 gezeigte spezifische Auswahl an Senken mit fester Position vorgegeben. Dies schließt eine durch die Wahl der Senken hervorgerufene Änderung der KPIs aus der Betrachtung aus und erlaubt eine nach Kapitel 1.1 isolierte Untersuchung einer Variation von Parametern der Energieversorgung. Die angenommenen Leistungswerte der ausgewählten Energiesenken in Tabelle D.3 beruhen auf dem in den Tabellen C.1 bis C.5 gegebenen Überblick über in der Literatur verfügbare Verbrauchswerte. Die Multiplizität der verbauten Senken wird abhängig von der betrachteten Fahrzeugklasse variiert. Weiterhin wird angenommen, dass eine E/E-Plattform integriert wurde, weshalb nur drei bis sieben Steuergeräte in die Betrachtung mit einfließen, während beispielsweise das ABS weiterhin als übrig gebliebenes Legacy-Steuergerät vorausgesetzt wird. Ferner sind die berücksichtigten Abhängigkeiten jeder Senke von Umwelt, Fahrer und Fahrprofil in Tabelle D.4 dargelegt. Diese werden zur Erstellung eines Betriebsmodells als charakteristische Merkmale der jeweiligen Senken gespeichert.

Variable	Abhängig von	Einfluss auf
Technologie	Funktion, Position	Multiplizität, Leistungsbedarf
Position	Funktion, Bauraum	Routing
Multiplizität	Funktion, Technologie	Anzahl Sicherungen, Anzahl Leitungen, Lastgang $P_{ges}(t)$
Leistungsbedarf P_i	Technologie	Lastgang $P_{ges}(t)$, Leitungsquerschnitt, Absicherung
Betriebsmodell $P_i(t)$	$f(\text{Wetter, Licht, Temperatur, Fahrer, Fahrzyklus})$	Lastgang $P_{ges}(t)$
Lastgang $P_{ges}(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t)$	Leistungsbedarf, Multiplizität, Betriebsmodell	Auslegung Quellen, Auslegung Sicherung, Auslegung Leitung

Tabelle 5.1.: Mögliche Freiheiten der Senken und deren Abhängigkeiten

5.3.3. Freiheiten der Energiequellen und Energiespeicher

Die Fahrzeugart bestimmt die Technologie der Energiequelle, deren maximal mögliche Übertragungsleistung für alle Entwürfe fest vorgegeben wird. Der verfügbare Strom des Generators im Verbrennungsfahrzeug ist weiterhin von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig, wobei für alle Fahrzeuge eine Leerlaufdrehzahl von 900 min^{-1} angenommen wird. Der DC/DC-Wandler eines Elektrofahrzeugs kann dagegen vom Lastgang bedingt jeden Stromwert bis zu seiner maximalen Übertragungsleistung erbringen.

Die Auslegung des Energiespeichers wird als zentraler Freiheitsgrad bei der Gestaltung des Energieversorgungsnetzes gesehen. Er garantiert Spannungsstabilität und Versorgungssicherheit trotz volatiler Hochleistungsverbraucher. Während heute nach Kapitel 2.2 in der Regel ein bis zwei Blei-Säure-Batterien unterschiedlicher Kapazität eingesetzt werden, gelten Kondensatoren und Li-Ionen-Batterien aufgrund ihrer nach Kapitel 2.2.2 höheren Zyklfestigkeit, Wirkungsgrade oder Ströme als vielversprechende Ergänzungen beziehungsweise Ersatz. Beispielsweise eignet sich die bewährte Blei-Säure Technik aufgrund ihrer geringen Zyklfestigkeit nur bedingt zur Integration neuer Funktionen wie Rekuperation. Bereits heute kommen Li-Ionen-Batterien in Elektrofahrzeugen und der neuen 48V-Spannungsebene zum Einsatz. Ihre Verwendung auf der 12V-Ebene und die langfristige vollständige Ablösung der Blei-Säure Technik ist der nächste logische Schritt.

Basierend auf diesen Überlegungen wurde die in Tabelle 5.2 dargestellte mögliche Variation der Technologie dahingehend eingeschränkt, dass ausschließlich Li-Ionen-Batterien betrachtet werden. Deren Multiplizität, Position und Kapazität wird variiert. Die Integration einzelner Supercaps parallel zu gewählten Hochleistungsverbrauchern wäre zusätzlich denkbar, da mit dieser Technologie schnelle Lastspitzen gepuffert werden können.

Variable	Abhängig von	Einfluss auf
Technologie	Fahrzeug, Lastgang	Wirkungsgrad, Zyklenzahl, Stromcharakteristik
Multiplizität	Lastgang	Spannungsstabilität, Versorgungssicherheit
Position	Bauraum	Routing
Kapazität	Anzahl Zellen, Lastgang	Entladetiefe

Tabelle 5.2.: Mögliche Freiheiten in der Auslegung von Energiespeichern

5.3.4. Freiheiten der Energieverteilung

Der Leitungssatz beinhaltet die Auslegung der Verteiler in Tabelle 5.3 und die Auslegung der Leitungen selbst in Tabelle 5.4. Bei beiden ist die Wahl der verwendeten Technologie abhängig von der gewünschten Funktion und dem Einbauort, da dieser Randbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit und Wartbarkeit festlegt. Da in dieser Arbeit kein optimierter Leitungssatz, sondern grundsätzliche Aussagen bezüglich verschiedener Entwürfe gesucht sind, werden die Leitungen zur Vereinfachung auf Basis der in ISO 6722-1 definierten Querschnitte und spezifischer Widerstände für reines Kupfer entworfen [ISO11]. Zusätzliche Anforderungen an Isolation oder Überdimensionierungen, z.B. durch hohe Temperaturen im Motorraum eines Verbrennungsfahrzeuges oder Alterungsverhalten von Sicherungen, werden bei der Auslegung nicht berücksichtigt.

Grundsätzlich mögliche Topologien sind Bus-, Stern-, Ring- oder Maschentopologie [Rob14]. Letztere scheint aufgrund des hohen Verkabelungsaufwands unwahrscheinlich. Weiterhin wird eine Ringtopologie im Fehlerfall zu einer Bustopologie, weshalb der betrachtete Entwurfsraum auf eine Bustopologie und die nach Kapitel 2.2.1 heute im Fahrzeug etablierte Sterntopologie beschränkt wird. Während bei der Sterntopologie alle Komponenten über einen zentralen Verteilerknoten versorgt werden, besteht die Bustopologie aus einer einzelnen Leitung, der Busschiene, die mehrere dezentrale Leistungsverteiler

verbindet. Die Komponenten werden in der Regel mit dem am nächsten befindlichen Verteilerknoten verbunden.

Ist die Topologie festgelegt, ergibt sich mit der Anzahl an Senken und der Annahme, dass jede Senke eine Sicherung benötigt, die erforderliche Zahl an Sicherungselementen und Leitungen. Als Sicherungselemente werden bei der Sterntopologie Schmelzsicherungen gewählt. Bei der Bustopologie werden Halbleiter aufgrund der schlechten Wartungsmöglichkeiten durch die im Fahrzeug verteilten Bauorte vorausgesetzt. Dies ändert Widerstand und Abschaltcharakteristik, die nach Kapitel 2.2 die Leitungsauslegung beeinflusst. Weiterhin unterscheiden sich Gewicht und Kosten der Bauteile.

Die Positionierung der Senken, Quellen und Absicherung kombiniert mit der durch die Topologie festgelegten Vernetzung zwischen den Elementen und verfügbaren Wegen für die Verlegung führt zum Routing und liefert damit die erforderlichen Leitungslängen. Dabei wird angenommen, dass in E/E-Plattformen die Energieversorgung aller Komponenten direkt über das Versorgungsnetz erfolgt. Der Leitungsquerschnitt kann, ohne die Berücksichtigung der Abschaltcharakteristik der Sicherungen, abhängig von der zu übertragenden Leistung festgelegt werden. In dieser Arbeit wird der Querschnitt so gewählt, dass die maximale Stromdichte j auf der Leitung, wie in Kapitel 2.2.1 dargelegt, kleiner oder gleich $10 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ ist. Als weitere Randbedingung wird der ebenfalls angegebene, durch den Widerstand verursachte, zulässige Spannungsabfall ΔU auf der Leitung von maximal 0,5 V übernommen. Ist der Querschnitt festgelegt, können die Parameter der passenden Sicherung aus den in [Lit16] gegebenen Werten gewählt werden.

Damit kann der Entwurf des Kabelbaums als indirekter Freiheitsgrad der DSE angesehen werden, da er sich aus den in den vorherigen Kapiteln diskutierten Freiheiten in der Auslegung der Senken und Quellen zusammen mit der gewählten Topologie ergibt.

Variable	Abhängig von	Einfluss auf
Technologie	Einbauort, Funktion	Maximalstrom, Widerstand, Abschaltzeit, Leitungsquerschnitt
Multiplizität	Anzahl Senken, Topologie	Widerstand
Position	Topologie, Technologie	Routing

Tabelle 5.3.: Mögliche Freiheiten der Leistungsverteilung und Absicherung

Variable	Abhängig von	Einfluss auf
Topologie	—	Anzahl Sicherungen, Anzahl Leitungen, Routing
Technologie	Einbauort, Funktion	Leitungsquerschnitt, spezifischer Widerstand, Isolation
Multiplizität	Topologie, Anzahl Senken	
Routing	Topologie, Position Senken, Position Quellen, zulässige Wege	Leitungslänge
Leitungslänge	Routing	Widerstand
Leitungsquerschnitt	Technologie Sicherung, Technologie Leitung, Lastgang	Widerstand, Stromdichte j
Widerstand	Leitungslänge, -querschnitt, Technologie	Spannungsabfall ΔU

Tabelle 5.4.: Mögliche Freiheiten der Energieübertragung

5.3.5. Zusammenfassung der Parametervariation der DSE

Die Auswahl der Senken ist abhängig vom gewählten Antriebsstrang und der Art des Fahrzeugs, z.B. Mittelklasse oder Luxusklasse. Ihr Verbrauch und ihre jeweilige Position sind dabei für alle Entwürfe fest gewählt, um konstante Randbedingungen zu generieren.

Tabelle 5.5 fasst die betrachteten Freiheiten zusammen. Zunächst wird die etablierte Sterntopologie untersucht. Hierbei ist nur eine Batterie zulässig und als Sicherungselemente werden Schmelzsicherungen verwendet. Außerdem wird eine Bustopologie betrachtet, die unterschiedlich positioniert werden kann. Hier kommen Halbleiterschalter als Sicherungselemente zum Einsatz und die Zahl der Batterien wird von eins bis vier variiert. Bei beiden Topologien wird die Position der Speicher variiert und ihre Kapazität von 10 Ah bis 100 Ah untersucht, wobei beim Einsatz mehrerer Speicher dieselbe Kapazität verwendet wird. Werden zwei unterschiedliche Positionen für einen Bus im Fahrzeug berücksichtigt und sechs mögliche Positionen für die Energiespeicher betrachtet, ergeben sich aus dieser Kombination bereits 1.180^2 zu untersuchende Kombinationen.

$${}^2k = k_{Stern} + (k_{Bus,1Bat} + k_{Bus,2Bat} + k_{Bus,3Bat} + k_{Bus,4Bat}) \cdot n_{Bus,Pos}$$

$$k = 60 + (60 + 150 + 200 + 150) \cdot 2 = 1180$$

Variable	Variation	Auswahl	Werte
Senken	$n_{Se} = 1$	fest	Tabelle D.3
Topologie	$n_{To} = 2$	Stern Bus	—
Sicherung	$n_{Si} = 2$	Schmelzsicherung Halbleiterschalter	Tabelle D.7 Tabelle 2.2
Speicher (1-4)	$n_{Li} = 40$	Li-Ionen-Batterie	[10 Ah, 20 Ah, ...100 Ah]

Tabelle 5.5.: Betrachtete Entwurfsvariablen zur Generierung der Entwürfe

Bereits Kapitel 5.3.1 erläutert, dass eine steuengeräteübergreifende Trennung von Funktion und Hardware dazu führt, dass das physische Netzwerk nicht länger direkt aus der Funktionsverteilung auf Steuergeräte ableitbar ist. Stattdessen kommen andere Auslegungskriterien, wie geometrische Optimierung, zum Tragen. Dies betrifft die Energieverteilung dahingehend, dass Sensoren und Aktoren nicht mehr funktionsbezogen mit spezifischen Steuergeräten vernetzt werden müssen. Deshalb wird für die Auslegung des Kabelbaums angenommen, dass alle zu vernetzenden Elemente auf dem kürzest möglichen Routingweg an ihren zugehörigen Verteiler und Massepunkte angeschlossen werden. Für den Anschluss werden pauschal 100 mm zu der damit ermittelten Leitungslänge addiert. Mit den definierten Grenzwerten von $10 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ für die Stromdichte und einem maximal zulässigen Spannungsabfall von 0,5 V kann der passende genormte Querschnittswert abgeleitet werden. Im Anschluss wird bei Schmelzsicherungen zur Absicherung der passende Sicherungswert aus Tabelle D.7 gewählt.

Parallel zu im Fahrzeug integrierten innovativen Hochleistungsverbrauchern mit hoher Dynamik könnten zusätzlich ein oder zwei Supercaps berücksichtigt werden. In den betrachteten Fahrzeugklassen aus Tabelle D.3 betrifft dies nur die Lenkung und die Bremse des Segments J beziehungsweise F.

6. Modellbasierte Analyse des Energieversorgungsnetzes

Modelle und Simulationen bilden das Verhalten physischer Parameter eines Systems reproduzierbar ab. Aus diesem Grund erfolgt die Evaluierung des Entwurfsraums modellbasiert. Die Simulationsumgebung muss dabei neben statischen auch dynamische, auf physikalischen Zusammenhängen beruhende Optimierungsgrößen hinreichend genau bestimmen, um konkrete Aussagen zu den Entwürfen ableiten zu können. Insbesondere das Verhalten elektrischer Komponenten, aber auch thermische Abhängigkeiten, beispielsweise der Entladekennlinie von Batterien, müssen berücksichtigt werden.

Eine von den gewählten Parametern abhängige, automatisierte Generierung des Modells erlaubt ferner eine flexible Anpassung und systematische Suche nach optimalen Lösungen innerhalb des definierten Entwurfsraums der DSE. Der Aufbau der Simulation erfolgt in Simscape. Dieses Modellierungswerkzeug beruht auf dem von der Netzwerkanalyse elektrischer Systeme abgeleiteten Ansatz der Netzwerkmodellierung. Dabei werden Komponenten basierend auf ihren physikalischen Energieströmen (Flussvariable) und Potentialen (Differenzvariable) definiert [Ege09]. Ein Vorteil von Simscape ist neben der Möglichkeit der physikalischen Mehrdomänenbeschreibung auch die einfache Co-Simulation mit Matlab/Simulink.

Die graphischen Simscape Modelle gleichen dabei optisch den nachgebildeten Systemen. Dies macht sie intuitiv verständlich. Weiterhin können Simscape Modelle einfach angepasst werden, da jede Komponente ihre spezifischen Systemgleichungen zur Beschreibung ihres Verhältnisses zu Energiestrom und Potential besitzt [Ege09]. Modellkomponenten können mit individueller Genauigkeit abgebildet und bei Bedarf einzeln ausgetauscht werden, ohne weitere Anpassungen vornehmen zu müssen. Gleichzeitig ermöglicht die Verbindung mit Matlab eine generische Programmierung der zu betrachtenden Entwürfe und eine weitere Aufbereitung der erzeugten Ergebnisse.

Im Folgenden stellt Kapitel 6.1 die Simulationsumgebung inklusive der Modelle zur Nachbildung der betrachteten Komponenten vor. Im Anschluss gehen Kapitel 6.2 und 6.3 auf die Generierung der Entwürfe und den Vergleich mit Hilfe der KPIs ein.

6.1. Aufbau einer Simulationsumgebung

Die realitätsnahe Modellierung des dynamischen Verhaltens der Quellen und Senken zur Bestimmung der in Kapitel 5.2 definierten KPIs erfordert Kenntnisse über die Umgebungsbedingungen. Diese definieren, wann welche Last ein- und ausgeschaltet ist und legen folglich den Lastgang und damit die vom Versorgungsnetz zu erbringenden Ströme fest. Sie beinhalten:

- Fahrzeug: Antriebsart, Gewicht, Abmessungen, integrierte Funktionen
- Fahrprofil $v(t)$ und Strecke: Höhenprofil und Kurvenverlauf
- Umgebungstemperatur T_U
- Wetter: Sonne, Regen oder Nebel
- Licht: Tag oder Nacht
- Fahrer: Fahrstil, Präferenzen wie Temperatur Fahrgastzelle

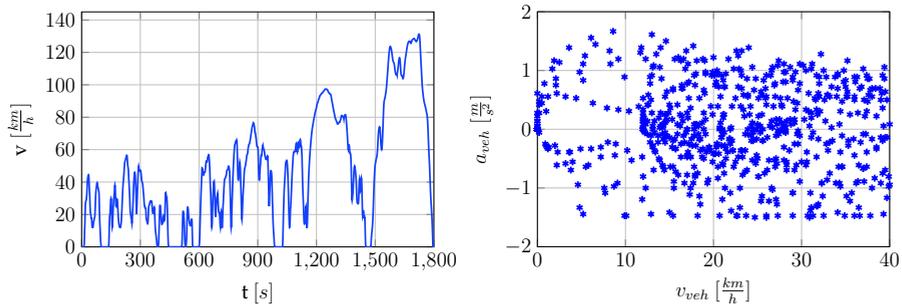
Im Folgenden werden drei Benzin- und drei Elektrofahrzeuge mit den Parametern aus den Tabellen D.1 und D.2 betrachtet. Ihre Unterscheidung erfolgt über ihre Segmente, A, C, J und F¹, und den Antriebsstrang. Abhängig vom Fahrzeugsegment wird die in Tabelle D.3 definierte Zahl der Senken gewählt. Außerdem legt die Wahl des Fahrzeugs neben der Energiequelle und den Abmessungen für die Platzierung auch das Fahrzeuggewicht zur Berechnung des Fahrwiderstands fest.

Als Fahrprofil wird der genormte Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC) aus Abbildung 6.1 angesetzt [Tut+13], der ab 2017 zur Ermittlung der genormten Verbrauchs- und Emissionswerte von Fahrzeugen dient und den bisher in Europa üblichen NEFZ ablöst. Das dynamischere Fahrprofil mit realitätsnäheren Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten hat großen Einfluss auf die ermittelten Verbrauchs- und Emissionswerte, wie Kapitel D.6 aufzeigt. Ein zugehöriges Streckenprofil, das Höhen- und Kurvenverläufe enthält, um die abhängigen Verbraucher und den Steigungswiderstand berücksichtigen zu können, ist allerdings nicht verfügbar.

Die minimale Drehzahl des Verbrennungsmotors wird mit 900 min^{-1} angenommen, darüber wird die Drehzahl n_{VKM} abhängig von der Geschwindigkeit, der Getriebe und Achsübersetzung i und dem dynamischen Rollradius r_d wie folgt berechnet:

$$n_{VKM} = \frac{v_{Fzg}(t) \cdot i}{2\pi r_d} \cdot 60 \quad (6.1)$$

¹A Kleinstwagen, C Mittelklasse, J SUV, F Limousine



(a) Geschwindigkeitswerte des genormten Fahrzyklus WLTP (b) Beschleunigungswerte des genormten Fahrzyklus WLTP

Abbildung 6.1.: Fahrprofil des genormten Fahrzyklus WLTP und die zugehörige Beschleunigungsverteilung über der Geschwindigkeit

Zur Berechnung der Drehzahl wird nicht die in [ZRF17] beschriebene, von der Antriebsleistung abhängige Bestimmung der Gangwahl verwendet, sondern vereinfacht angenommen, dass bei Verbrennungsfahrzeugen geschwindigkeitsabhängig die folgenden Gänge eingelegt sind:

- 1. Gang bis $10 \frac{km}{h}$
- 2. Gang zwischen $10 \frac{km}{h}$ und $30 \frac{km}{h}$
- 3. Gang zwischen $30 \frac{km}{h}$ und $50 \frac{km}{h}$
- 4. Gang zwischen $50 \frac{km}{h}$ und $75 \frac{km}{h}$
- 5. Gang zwischen $75 \frac{km}{h}$ und $100 \frac{km}{h}$
- 6. Gang ab $100 \frac{km}{h}$ (falls vorhanden)

Bei Schaltgetrieben mit mehr als 6 Gängen wird im Gegensatz dazu der zweite bis letzte Gang gleichmäßig auf die zugehörigen Geschwindigkeitswerte zwischen $10 \frac{km}{h}$ und $120 \frac{km}{h}$ aufgeteilt.

Die Bestimmung der einzelnen Betriebszeiten der Lasten erfolgt basierend auf eingestellten Temperaturen, Wetter- und Lichtverhältnissen sowie Kurvenangaben. Wie bereits dargelegt, fehlt letzteres beim WLTP, da die Verbrauchstests keinen Betrieb der Nebenverbraucher vorsehen. Vom Streckenverlauf abhängige Lasten werden in der Modellierung zwar hinterlegt, sind aber während der gesamten Fahrt ausgeschaltet.

6.1.1. Umgebungsmodell deutscher Pendler

Heute erfolgt die Auslegung der Energieversorgung basierend auf kritischen Betriebsmodellen wie Berufsverkehr im Winter [Rob14]. Für solch ein Worst-Case-Szenario wird eine vergleichsweise tiefe Temperatur von 0°C , Dunkelheit, Regen und Nebel gewählt. Aus diesen festgelegten Umgebungsbedingungen und den definierten Abhängigkeiten der Lasten lassen sich die in Abbildung 6.2 (a) gezeigten Lastgänge für die Verbrennungs- und Elektro-Variante des C-Segment-Fahrzeugs generieren. Der Vergleich mit den Lastgängen eines Sommerszenarios mit einer Temperatur von 30°C , Licht und sonnigem Wetter in Abbildung 6.2 (b) zeigt die deutlich höhere Belastung insbesondere durch die Heizsysteme des gewählten Worst-Case-Szenarios. Die Lastgänge des Winter-Szenarios der anderen betrachteten Fahrzeuge befinden sich in Abbildung D.1.

Der Lastgang basiert dabei auf der angegebenen Durchschnittsleistung der Komponenten. Alle vier Lastkurven zeigen nach 300 s bedingt durch von der Fahrdynamik abhängige Lasten dieselben Schwankungen, allerdings auf unterschiedlichen Lastniveaus. Das höhere Niveau der Lastkurve des Verbrennungsantriebs entsteht durch zusätzlich berücksichtigte Dauerverbraucher aus Tabelle D.3. Die hohen Eingangsströme entstehen durch den Starter, der 5 s in Betrieb ist, und die für 60 s zugeschaltete Katalysatorheizung.

Weiterhin sind Sitzheizung, Spiegelheizung, Licht und Scheibenwischanlage im Winterszenario während der gesamten Fahrt aktiv. Die Heckscheibenheizung ist 120 s in Betrieb. Im Elektrofahrzeug wird angenommen, dass für das zusätzliche Hochleistungsheizsystem nach Tabelle D.5 bei 0°C eine Heizzeit von 300 s zusätzlich zur Sitzheizung genügt. Im Sommerszenario werden stattdessen die Klimaanlage und das Tagfahrlicht benutzt.

Über das Jahr hinweg variieren jedoch die Umgebungsbedingungen und dadurch auch der Einsatz der Lasten und die damit verbundenen KPIs stark. Deshalb wird außerdem das Umgebungsmodell eines typischen deutschen Pendlers definiert. Hierfür wird angenommen, dass der Pendler abzüglich der in Deutschland üblichen Feiertage und 26 Urlaubstage insgesamt an 225 Tagen im Jahr immer zur selben Uhrzeit morgens zur Arbeit und abends zurück fährt. Folglich werden 450 Fahrten mit abweichenden Umgebungsbedingungen simuliert. Abbildung 6.3 zeigt den angenommenen Anteil der Fahrten morgens und abends bei Dunkelheit. Gut sichtbar ist der Einfluss der Zeitumstellung im Herbst. Während es morgens zunächst zur gewählten Uhrzeit wieder hell ist, herrscht abends schlagartig Nacht. Es wird vorausgesetzt, dass die Fahrzeugbeleuchtung bis zehn Minuten nach Sonnenaufgang und bereits zehn Minuten vor Sonnenuntergang angeschaltet ist.

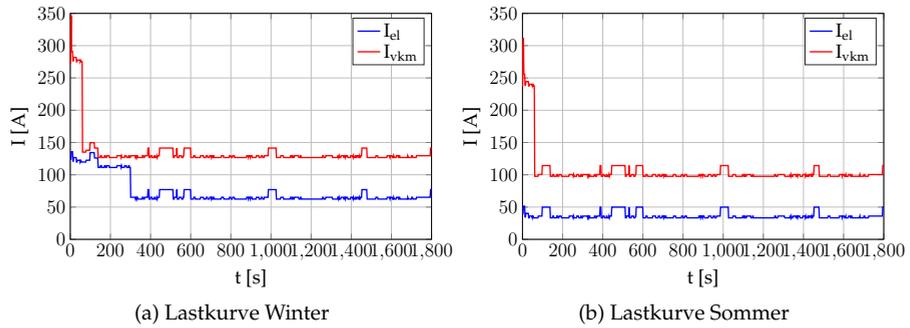


Abbildung 6.2.: Lastkurven Winter- und Sommer-Szenario C-Segment-Fahrzeug

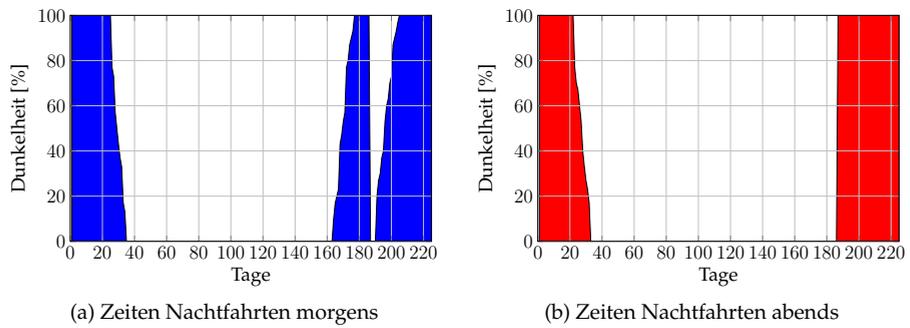


Abbildung 6.3.: Zeitanteil von Nachtfahrten morgens und abends

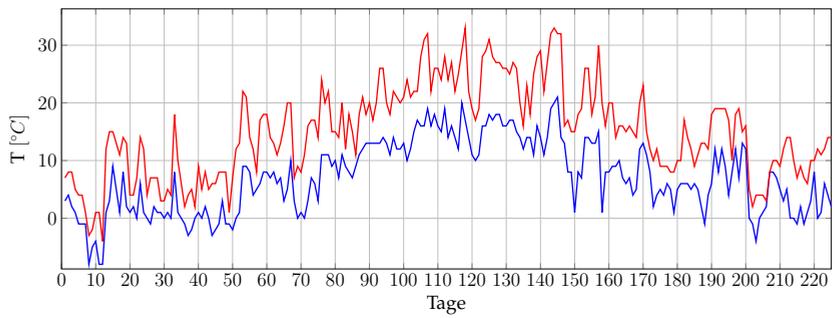


Abbildung 6.4.: Temperaturwerte für morgens (blau) und abends (rot)

Die Umgebungstemperatur ist während einer Fahrt konstant, wobei morgens die minimale und abends die maximale Tagestemperatur angesetzt wird. Abbildung 6.4 zeigt den hinterlegten Temperaturverlauf. Als Datengrundlage dienen die Durchschnittstemperaturen der Stadt München im Zeitraum zwischen dem 16.8.2015 und dem 15.8.2016. Die durchschnittlichen 130 Regentage und 59 Nebeltage der Stadt München werden zufällig verteilt, wobei Nebel nur morgens und bei Temperaturen bis 10°C vorkommt.

6.1.2. Lasten Modell

Für Analysen der Topologie in frühen Entwicklungsstadien sind nach [WR06] Komponentenmodelle mit geringen Detailinformationen meist ausreichend. Beispielsweise kann ein hinterlegtes Lastprofil das kumulierte Verhalten verschiedener Verbraucher nach [Hes11] und [Bue08] simulieren. Allerdings ist damit die Betrachtung verschiedener Topologien und davon abgeleiteter Kabelbaumausführungen schwierig zu realisieren, weshalb ein solcher Ansatz für diese Arbeit ungeeignet ist.

Bereits in Tabelle 2.3 wird auf verschiedene Möglichkeiten zur Klassifizierung elektrischer Verbraucher hingewiesen. Analog können elektrische Verbraucher anhand ihrer charakteristischen Merkmale auf vielfältige Weise nachgebildet werden. Typische Verbraucher sind nach [Ruf14]:

- einfache ohmsche Lasten, wie Heizsysteme
- von der Betriebsspannung unabhängige Leistungsverbraucher, wie viele Steuergeräte
- leistungselektronisch geregelte Aktoren, wie die elektrische Lenkkräftunterstützung
- unregelte Aktoren, meist Gleichstrommaschinen, wie Fensterheber

Die in der Literatur zur Verfügung stehenden Daten zu elektrischen Verbrauchern im Fahrzeug zeigen durchschnittliche und maximale Leistungswerte, jedoch keine Kennlinien zur Beschreibung des zeitlichen Verhaltens, die eine präzise Nachbildung des Lastgangs, beispielsweise über gesteuerte Stromquellen, erlauben.

Deshalb wird ein Kompromiss zwischen einfacher Realisierung und exakter Nachbildung gewählt. Alle Komponenten werden einzeln, basierend auf der in Tabelle D.3 hinterlegten Anzahl für das gewählte Fahrzeug und der in Tabelle D.6 definierten Position automatisiert in das Modell integriert. Sie

werden weiterhin bedingt durch die im vorigen Kapitel definierten Umgebungsbedingungen und den in Tabelle D.4 angegebenen Abhängigkeiten zugeschaltet. Während über Dauerbetrieb, Beschleunigung, Licht- und Wetterabhängigkeit bereits eindeutige Betriebsmodi festgelegt sind, wird die Temperaturabhängigkeit der Komponenten nach Tabelle D.5 genauer spezifiziert. Allerdings bildet der hinterlegte Lastgang kein zeitlich veränderliches Verhalten, wie Einschaltströme oder unterschiedliche Leistungsstärken, z.B. durch verschiedene Heizstufen, der einzelnen Lasten ab. Stattdessen werden alle Komponenten als ohmsche Widerstände ausgeführt, deren Wert sich abhängig von den hinterlegten Leistungswerten und der gegebenen Systemspannung ergibt.

6.1.3. Lithium-Ionen Batterie Modell

Die gewählte Modellierung mit Hilfe eines elektrischen Ersatzschaltbildes nutzt passive Elemente zur äquivalenten Abbildung elektrischer Eigenschaften von Batterien [MN14]. Ihr Vorteil gegenüber exakten physischen Modellen, die sowohl ein großes analytisches Verständnis als auch hohe Rechenzeiten erfordern, ist zunächst die leichte Verständlichkeit, aber auch die Kompatibilität zu Modellen anderer Systemkomponenten für Gesamtsystemsimulationen in einer einheitlichen Simulationsumgebung [RVR03]. Eine Übersicht der in der Literatur verfügbaren Ersatzschaltbildmodelle zeigt [MN14].

Impedanz-basierte Modelle bilden die in einer Zelle ablaufenden elektrochemischen Prozesse mit Hilfe eines komplexen Ersatzschaltbildes ab [CRM06]. Abbildung 6.5 (a) zeigt einen entsprechenden Randle-Schaltkreis mit Innenwiderstand R_{int} , Widerstand R_{SE} und Kapazität C_{SE} des Oberflächenfilms der Elektroden, Ladungstransferwiderstand R_{ct} , Doppelschichtkapazität C_{dl} sowie Warburgimpedanz Z_w [MN14]. Eine elektrochemische Impedanzspektroskopie liefert Werte zur Parametrierung.

Dagegen dienen gemessene Spannungskennlinien zur Parametrierung des in Abbildung 6.5 (b) gezeigten Thevenin Modells, das transiente und eingeschwingene Vorgänge abbilden kann [LB11]. Allerdings ist es schwierig mit einem solchen Modell Batterielaufzeit oder Ansprechzeiten einfach und genau vorherzusagen [CRM06]. Diese können stattdessen mit laufzeitbasierten Modellen nachgebildet werden. Um auch veränderbare Entladeströme berücksichtigen zu können, stellt [CRM06] das in Abbildung 6.5 (c) gezeigte mit einem Thevenin-Ansatz kombinierte Laufzeitmodell vor.

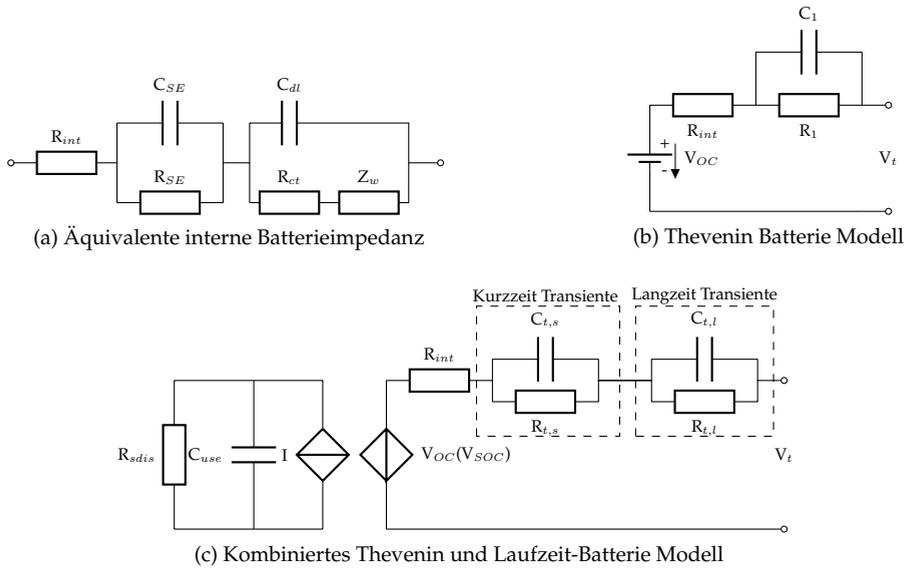


Abbildung 6.5.: Batteriemodelle: Randle Schaltkreis (a), Thevenin Modell (b) und kombiniertes Thevenin und Laufzeit-Modell (c)[MN14]

Der linke Bereich bildet die Veränderung der Batterie über ihre Lebenszeit nach, während rechts die Spannungscharakteristik dargestellt wird. Mit diesem Modell ist es möglich, alle dynamischen Vorgänge einer Batterie hinreichend genau nachzubilden: nutzbare Kapazität, Leerlaufspannung und Übergangsverhalten. Ein solcher Ansatz wird für die Nachbildung einer Lithium-Ionen-Zelle gewählt. Die Parameter berechnen sich abhängig vom Ladezustand der Batterie (State of Charge, SOC) nach [CRM06] wie folgt:

$$V_{OC}(SOC) = -1,031 \cdot e^{-35 \cdot SOC} + 3,685 + 0,2156 \cdot SOC - 0,1178 \cdot SOC^2 + 0,3201 \cdot SOC^3 \quad (6.2)$$

$$R_{int}(SOC) = 0,1562 \cdot e^{-24,37 \cdot SOC} + R_{int,0} \quad (6.3)$$

$$R_{t,s}(SOC) = 0,3208 \cdot e^{-29,14 \cdot SOC} + R_{t,s,0} \quad (6.4)$$

$$C_{t,s}(SOC) = -752,9 \cdot e^{-13,51 \cdot SOC} + C_{t,s,0} \quad (6.5)$$

$$R_{t,l}(SOC) = 6,603 \cdot e^{-155,2 \cdot SOC} + R_{t,l,0} \quad (6.6)$$

$$C_{t,l}(SOC) = -6.056 \cdot e^{-27,12 \cdot SOC} + C_{t,l,0} \quad (6.7)$$

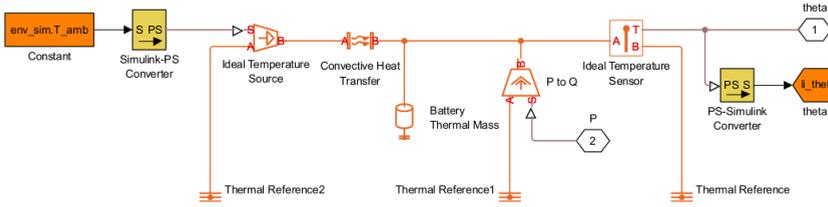


Abbildung 6.6.: Hinterlegtes thermisches Modell der Li-Ionen Batterie

Der benötigte SOC-Wert ergibt sich aus der verfügbaren Kapazität $C(\theta)$ der Batterie und der entnommenen Ladung Q_e zu [WJ06]:

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(\theta)} \quad (6.8)$$

Die Kapazität ist dabei von der Temperatur der Batterie T_{Bat} abhängig, was oft durch einen einfachen linearen Ansatz beschrieben wird [WJ06]:

$$C(\theta) = C_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T_{Bat} - T_0)) \quad \alpha \in [0, 001 \dots 0, 01] \quad (6.9)$$

Zur Ermittlung des linearen Multiplikationsfaktors α wird in dieser Arbeit der Ansatz über Lookup-Tabellen gewählt. Aus Datenblättern lassen sich unterschiedliche Kapazitätswerte für verschiedene Temperaturen ablesen und aus diesen der Faktor für die Temperaturabhängigkeit ableiten. Die dafür benötigte Temperatur der Batterie lässt sich aus der Wärmebilanz über die gewichtsabhängige Wärmekapazität c_{Bat} , bei Li-Ionen-Batterien etwa $0,7 \frac{Wh}{Kkg}$ und die Wärmeleistung P_W errechnen [WJ06]:

$$T_{Bat} = T_{Bat}|_{t=0} + \frac{1}{c_{Bat}} \cdot \int_0^t P_W d\tau \quad (6.10)$$

Hierfür wurde das einfache thermische Modell in Abbildung 6.6 hinterlegt, das auf Basis der durch die inneren Widerstände erzeugten Verluste die Wärmetwicklung wie folgt ermittelt

$$P_V = (R_{int} + R_{t,s} + R_{t,l}) \cdot I^2 = \dot{Q}_V \quad (6.11)$$

$$Q_{mass} = m_{Bat} \cdot c_P \cdot \dot{T}, \quad (6.12)$$

wobei m_{Bat} die Batteriemasse, c_P der spezifische Wärmekoeffizient und T die Batterietemperatur darstellt. Außerdem wird der Wärmetransport über Konvektion mit einbezogen [WJ06]

$$P = A \cdot c_K \cdot (T_{Bat} - T_U), \quad (6.13)$$

mit der offenen Oberfläche A des Batteriepacks und dem Konvektionswärmekoeffizient c_K bei einer spezifischen Luftgeschwindigkeit. Zur Berechnung der Batterieparameter für das Modell werden die Daten einer Panasonic NCR18650 Lithium Ionen Zelle aus [Pan12] mit einer Nennkapazität von 2,7 Ah und einer Nennspannung von 3,6 V herangezogen.

6.1.4. Generator Modell

Das implementierte Generator Modell ist ein Simulink Regelkreis, der eine gesteuerte Stromquelle zur Versorgung der elektrischen Verbraucher regelt. Der einzuspeisende Strom ergibt sich aus dem durch die aktuelle Drehzahl maximal induzierten Strom, der zur Verfügung steht, und einer zusätzlichen Spannungsregelung auf 14,3 V Nennspannung. Die Temperaturabhängigkeit der Erregerwicklung wird im Modell nicht berücksichtigt.

Der aus den interpolierten Werten der Kennlinien in [vic16] maximal verfügbare Strom in Abbildung 6.7 (a) wird über eine Lookup-Tabelle hinterlegt. Die Übersetzung der berechneten Drehzahl des Motors zur Drehzahl des Generators erfolgt dabei mit dem Faktor 2,5.

Für Fahrzeuge des Typs A und C wird der Generator mit einem maximalen Ausgangsstrom von 150 A gewählt, für die höheren Klassen der in Abbildung 6.7 gezeigte Generator mit einem maximalen Ausgangsstrom von 210 A.

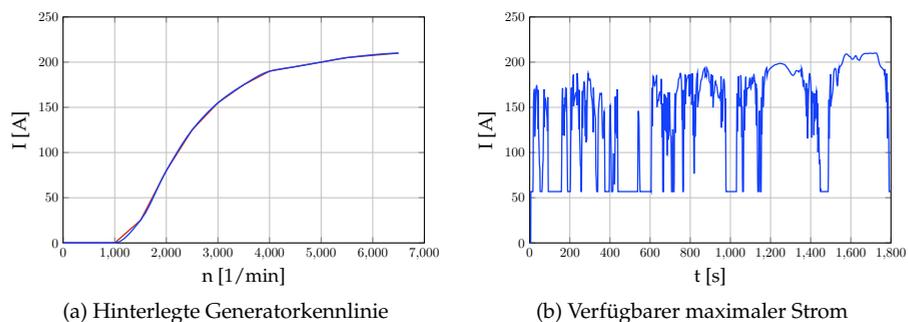


Abbildung 6.7.: Die hinterlegte Generatorkennlinie und der zugehörige maximale Stromverlauf während des Fahrzykluses WLTC

6.1.5. DC/DC-Wandler Modell

Es wird ein von einer konstanten Spannungsquelle versorgter Tiefsetzsteller nach Abbildung 6.8 (a) mit einer geregelten 14,3 V Ausgangsspannung und der gleichen maximalen Ausgangsleistung wie der hinterlegte Generator des Verbrennungsfahrzeugs modelliert. Für diesen gilt:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{t_{on}}{T} \quad (6.14)$$

Analog zum hinterlegten Generatormodell handelt es sich um einen Simulink Regelkreis, der die entsprechenden Systemgleichungen 6.16 und 6.17 des Wandlers abbildet und mittels des Ergebnisses eine gesteuerte Stromquelle einstellt, die das physikalische Modell mit dem zugehörigen Strom versorgt. Ein integrierter zweistufiger Regelkreis ermöglicht mittels zweier PI-Glieder erst die Spannung zu regeln und anschließend den begrenzten Strom einzustellen. Die dadurch erzeugte Kennlinie unter Last zeigt Abbildung 6.8 (b). Für die Vergleichbarkeit mit dem Verbrennungsfahrzeug wird der Ausgangsstrom bei hoher Last auf denselben Strom begrenzt, hier 200 A.

$$0 = -U_{in} + U_{RS1} + U_L + U_C \quad (6.15)$$

$$0 = U_{out} - U_C \quad (6.16)$$

$$0 = -U_{RS2} + U_L + U_C \quad (6.17)$$

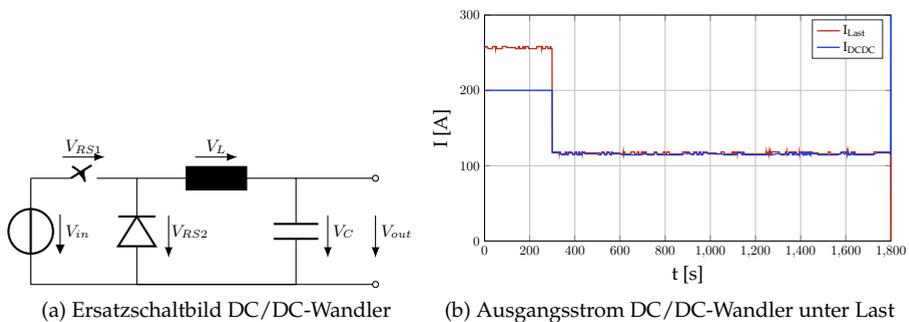


Abbildung 6.8.: Das modellierte Ersatzschaltbild des DC/DC-Wandlers und die geregelte Ausgangsstromkennlinie mit Lastverlauf

6.1.6. Kabelbaum Modell

Kapitel 5.3.4 beschreibt, wie aus den gegebenen Randbedingungen Kabellänge und -querschnitt für jede Verbindung berechnet werden. Daraus ergibt sich der temperaturabhängige Widerstand der verbauten Leitungen nach Gleichung 2.1 und 2.2. Weiterhin zeigt [Geh+09] auf, dass für kleine Querschnitte und kleine Frequenzen im ein- bis zweistelligen Hertzbereich der Skineffekt und Induktivitätsbeläge bei der Berechnung des Leitungswiderstands vernachlässigt werden können. Analog zu [Ruf14] wird deshalb zur Simulation von Leitungen ein reines Widerstandsmodell verwendet.

Die Absicherung mittels Schmelzsicherungen sowie Halbleiterschalter wird ebenfalls mit Hilfe der in Tabelle D.7 beziehungsweise Tabelle 2.2 dargelegten Widerstandswerte nachgebildet. Zusätzliche Widerstände für Kontakte, Massebolzen und Karosserie wie in [Ruf14] sind über alle Entwürfe konstant und deshalb nicht implementiert.

6.2. Generierung der Entwürfe durch die DSE

Bereits Kapitel 5.3.4 legt dar, dass sich der Leitungssatz aus der Topologie und der Positionierung aller zu verbindenden Elemente im Fahrzeug ableiten lässt. Dies erfordert einerseits die Definition von Positionen für Senken und Quellen und andererseits das Festlegen zulässiger Wege für das Routing. Zur Lösung dieses Problems wird das als Ebene betrachtete Fahrzeug in Abbildung 6.9 mittels eines Graphen mit $n \times m$ gleichmäßig verteilten Kanten und Knoten überspannt. Die Knoten liefern erlaubte Positionen für die Platzierung der Quellen, Senken und Sicherungselemente im Fahrzeug. Die Kanten bilden vorgegebene Wege für das Routing der Leitungen ab.

Aus funktionaler Sicht der Senken ist die, in Abbildung 6.9 gezeigte, minimale Auflösung von $m = 5$ und $n = 8$ sinnvoll. Die Fahrzeugbreite kann in die Bereiche Fahrertür, Fahrersitz, Schaltbereich, Beifahrersitz und Beifahrertür unterteilt werden und entlang der Fahrzeuglänge werden die Bereiche Front, Vorderrad, Frontscheibe, Armatur, Vordersitz, Rücksitz, Kofferraum und Heck unterschieden. Dies erlaubt eine möglichst realitätsnahe Abstraktion der Platzierung der Komponenten. Um unabhängig von der Auflösung die Randbedingungen konstant zu halten, werden alle Komponenten so platziert, dass ihr Abstand von den in Abbildung 6.9 markierten Positionspunkten, abhängig von den erlaubten Positionen der gewählten Auflösung, minimal ist. Dies ermöglicht es, die Auflösung für das Routing zu verändern,

ohne die Positionierung neu definieren zu müssen. Tabelle D.6 legt die Positionierung der Senken auf den markierten 40 erlaubten Positionen fest.

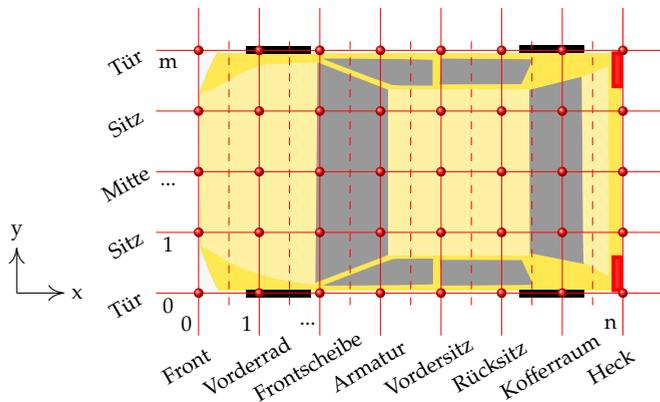


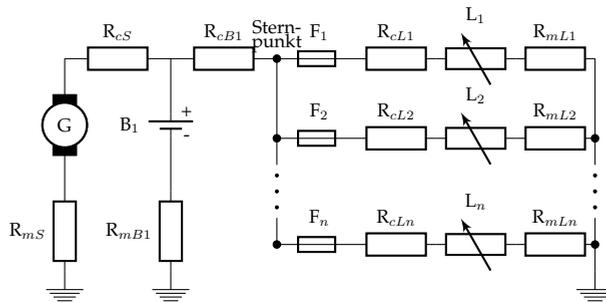
Abbildung 6.9.: Graph mit $n \times m$ Kanten und Knoten generiert feste Positionen und vorgegebene Wege für das Routing.

Die Position des Leistungsverteilers der Sterntopologie wird unabhängig von der Auflösung so gewählt, dass dieser auf der Fahrerseite ($y=1$) an der Armatur ($x=4$) zu finden ist. Abbildung 6.10 (a) zeigt das Modell des Sternentwurfs mit einer Batterie. Die Bustopologie wird als in x -Richtung gerade Schiene, die nur im Fahrzeuginneren befindliche Punkte verbindet, gewählt. In Abbildung 6.9 ergeben sich in y -Richtung folglich drei mögliche Platzierungen einer Schiene, die von Vorderrad ($x=1$) bis Kofferraum ($x=6$) reicht. Die Zahl der Leistungsverteiler auf den markierten Knotenpunkten wäre in diesem Fall sechs, weshalb die Busschiene in Abbildung 6.10 (b) aus fünf gleichen Widerständen besteht. Bei beiden Topologien wird der nächstgelegene Knoten als Massepunkt der Rückleitung über die Karosserie gewählt.

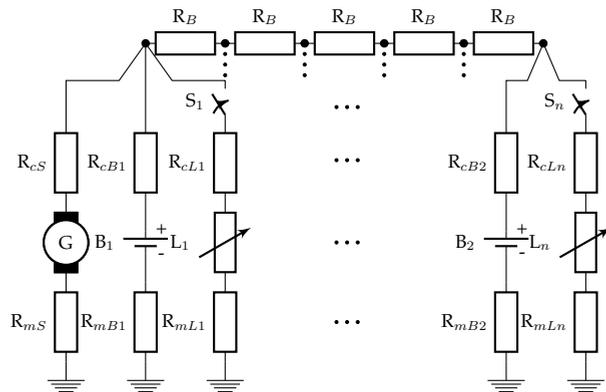
Betrachtete Positionen für die Platzierung der Energiespeicher sind ebenfalls nur im Fahrzeuginneren zu finden. Dabei werden in y -Richtung die Positionen der beiden Sitze und in x -Richtung die Bereiche Vorderrad, Vordersitz und Kofferraum untersucht. Das Beispiel in Abbildung 6.10 (b) zeigt eine am Vorderrad und eine im Kofferraum platzierte Batterie, die jeweils mit dem nächsten Verteiler der Busschiene verbunden sind.

Eine überlagerte Matlabsteuerung erlaubt das Einstellen sowohl der zu variierenden Freiheiten im Entwurf als auch der im vorigen Kapitel dargelegten Umweltbedingungen. Aufgrund der Menge an Daten und der Möglichkeit

zur einfachen Anpassung bei gewünschten Änderungen werden die in Kapitel D.2, D.3 und D.5 dargelegten Daten der Anzahl, Abhängigkeit und Position der Lasten und der Komponenten der Energieverteilung in Excel-Tabellen hinterlegt. Matlab liest diese Daten während der Initialisierung ein und speichert sie für die spätere Generierung und Parametrierung des Modells.



(a) Beispiel Entwurf mit Sterntopologie



(b) Beispiel Entwurf mit Bustopologie mit den Buswiderständen R_B und zwei Batterien B_1 und B_2

Abbildung 6.10.: Beispiel eines Stern- beziehungsweise Busentwurfs eines Verbrennungsfahrzeugs mit Generator G , Batterie B , den Leitungswiderständen R_c und $R_{m,i}$, den Lasten L sowie den Sicherungen F beziehungsweise Halbleiterschaltern S .

Neben der Festlegung des Fahrzeugs, dessen Antriebsart, des Fahrzyklus, der fahrzeugspezifischen Lasten und deren Position müssen zu Beginn die zu be-

trachtenden Topologien, die Zahl der Quellen mit zu untersuchenden Kapazitätswerten, deren zulässige Positionen sowie die Umgebungsbedingungen und die Systemspannung definiert werden. Im Anschluss können, auf Basis der Fahrdynamik, der Umweltbedingungen und den eingelesenen Abhängigkeiten der Lasten, deren Anschaltzeiten festgelegt werden. Weiterhin kann die Matlabsteuerung anhand der gewählten Einstellungen alle weiteren benötigten Größen, wie die Motordrehzahl, berechnen.

Nach dieser Initialisierung beginnt die eigentliche Simulation. Alle möglichen Kombinationen der gewählten Entwurfparameter werden von Matlab eingestellt, die daraus resultierenden Systemgrößen wie Batterieparameter, Kabellänge oder Sicherungswiderstand bestimmt, um danach automatisiert das Simscape Modell zur Simulation des zugehörigen elektrischen Netzes zu generieren. Zunächst wird jede Last abhängig von ihren Positionsdaten in das Modell eingefügt und auf Basis der hinterlegten Daten automatisch parametrisiert. Analog dazu baut Matlab, bedingt durch die gewählte Topologie, Anzahl, Art und Position der Energiespeicher und Absicherung, das entsprechende Netzwerk zur Abbildung des Kabelbaums in Simscape auf und hinterlegt die zuvor berechneten Parameter für dieses Set.

Ein solcher generischer Aufbau erlaubt es, innerhalb der implementierten Entwurfsvariationen alle Parameter individuell einzustellen. Folglich können neben den evaluierten Bedingungen auch alternative Fahrzyklen, Fahrzeugdaten oder Umgebungsbedingungen untersucht werden.

Bereits vor der Simulation können statische Optimierungsgrößen wie das Gewicht und die Kosten der erzeugten Energieversorgung abhängig von den ausgewählten Parametern berechnet werden. Die Simulation ermöglicht weiterhin die Betrachtung des zeitlichen Verhaltens der Spannung zur Bewertung der Spannungsstabilität sowie die Ermittlung des elektrischen Energieverbrauchs, um zusammen mit dem zuvor berechneten Fahrverbrauch die Betriebskosten und Emissionswerte abschätzen zu können.

Die Simulation in Simscape erfolgt mit dem ode15s^2 Solver. Dabei handelt es sich um einen von zwei, von Matlab empfohlenen, impliziten Simulink-Solvern mit variabler Schrittweite zur Lösung typischer Simscapemodelle, der auf numerischen Differentialgleichungen beruht. Im Gegensatz zu expliziten Solvern, die auf Basis des aktuellen Gradienten den Systemzustand im nächsten Zeitpunkt berechnen, bestimmen implizite Solver die Lösung zum nächsten Zeitpunkt iterativ und beziehen den Zustand im späteren Zeitpunkt in die Berechnung mit ein [The17]. Beide Solver erreichen nach [The17] durch das parallele Lösen algebraischer und differentialer Anteile der Systemgleichungen eine hohe Genauigkeit und Effizienz.

²Löst die Differentialgleichungen (ODE, Ordinary Differential Equation)

6.3. Vorgehen zum Vergleich von Entwürfen

Im vorigen Kapitel wurde dargelegt, wie eine generische, modellbasierte Design Space Exploration des Energieversorgungsnetzes innerhalb festgelegter Freiheiten im Entwurf realisiert werden kann. Sie ermöglicht es, alle entstehenden Entwurfskombinationen hinsichtlich gewählter KPIs zu untersuchen. Ein solcher generischer Ansatz birgt den Vorteil, dass anhand der erzeugten Ergebnisse sowohl Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern und den KPIs als auch zwischen den gewählten Parametern selbst aufgezeigt werden können. Dies ermöglicht es nachfolgend, Vor- und Nachteile verschiedener Kombinationen zu analysieren und eine oder mehrere optimale Parameterkombinationen hinsichtlich der für die jeweilige Anwendung priorisierten KPIs auszuwählen. Diese Entwürfe des Energieversorgungsnetzes könnten später gezielt optimiert werden.

Nachteilig ist der hohe Aufwand, der die Berechnung bei einer hohen Zahl untersuchter Kombinationsmöglichkeiten erzeugt. Betrachtet man die in Kapitel 5.3.5 dargelegte Parametervariation mit 1180 zu untersuchenden Kombinationen für die sechs in Kapitel D.1 spezifizierten Fahrzeuge und das in Kapitel 6.1.1 definierte Umgebungsmodell mit 450 Einzelfahrten, müssten insgesamt 3.186.000 Simulationen durchgeführt werden. Würde jede Simulation 30 s dauern, ergäben sich 26 550 h Rechenzeit. Da dies nicht praktikabel ist, muss die Zahl der durchzuführenden Simulationen verringert werden.

Deshalb wird zur Identifikation vorteilhafter Parameterkombinationen über die Pareto-Front aus Kapitel 5.1 das Worst-Case-Szenario genutzt. Hierbei werden mit Hilfe eines einfachen Suchalgorithmus alle diejenigen Lösungen im erzeugten Lösungsraum gesucht, für die keine andere Parameterkombination existiert, die in allen betrachteten KPIs kleinere Werte liefert. Bei mehreren Alternativen kann abhängig von der Priorisierung der KPIs der bevorzugte Entwurf gewählt werden. Für diesen erfolgt im Anschluss die weitere Untersuchung der KPIs z.B. für die variablen Umgebungsbedingungen des Pendler-Szenarios.

Die variierte Position der Busschiene zeigt kaum Einfluss auf die Ergebnisse, weshalb nicht nur für die Stern, sondern auch für die Bustopologien die Position festgehalten und nur die bessere Position auf der linken Seite im Fahrzeug ($x=2$) betrachtet wird. Links sind in allen betrachteten Konfigurationen mehr Verbraucher positioniert als rechts, weshalb die gesamte Leitungslänge und demzufolge das Gewicht und der resultierende Fahrwiderstand geringer sind, wenn der Leistungsverteiler links positioniert wird. Dies reduziert den Parameterraum um eine Dimension auf vier und die in Kapitel 5.3.5 dargelegte Parametervariation von 1180 Kombinationen auf 620.

Die restlichen vier zu variierenden Freiheitsgrade aus Kapitel 5.3.5, Topolo-

gie, Anzahl, Position und Kapazität der Batterie, führen zu 5D-Kennfeldern, die nicht direkt graphisch abbildbar sind. Deshalb wird die Kombination aus Topologie und Anzahl der Speicher als ein Entwurfsmerkmal zusammengefasst, das im Folgenden als Cluster bezeichnet wird. Es ergibt sich folglich ein Cluster mit Sterntopologie (Stern) und einer Batterie sowie vier Buscluster mit einer (1Bat), zwei (2Bat), drei (3Bat) und vier (4Bat) Batterien. Für jedes Cluster wird wiederum ein dreidimensionales Kennfeld abhängig von Position Pos_{Bat} und Kapazität C_{Bat} der gewählten Speicher erzeugt. Mit deren Hilfe kann der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die KPIs aufgezeigt werden. Ein Beispiel mit zwei Clustern, einer Sterntopologie (Stern) und einer Bustopologie mit vier Batterien (4Bat), zeigt Abbildung 6.11 (a). Der gezeigte Fahrverbrauch B_{sF} steigt mit der Kapazität und zeigt für den Stern eine starke Positionsabhängigkeit.

Die Darstellung von Abhängigkeiten zwischen zwei Optimierungsgrößen erfolgt mittels Punktwolken innerhalb eines 2D-Graphs. Die Punktwolken werden ebenfalls abhängig von den aus Topologie und Anzahl der Batterien definierten Entwurfsclustern generiert. Die Zugehörigkeit wird farblich codiert. Die Größe der Punkte des Graphen variiert mit der Anzahl, wie oft eine Größenkombination in den Clustern auftritt. Abbildung 6.11 (b) zeigt den linearen Zusammenhang zwischen Materialkosten c_{lS} und Gewicht m_{lS} des generierten Leitungssatzes für das Sterncluster und zwei Buscluster, mit zwei und mit vier Batterien.

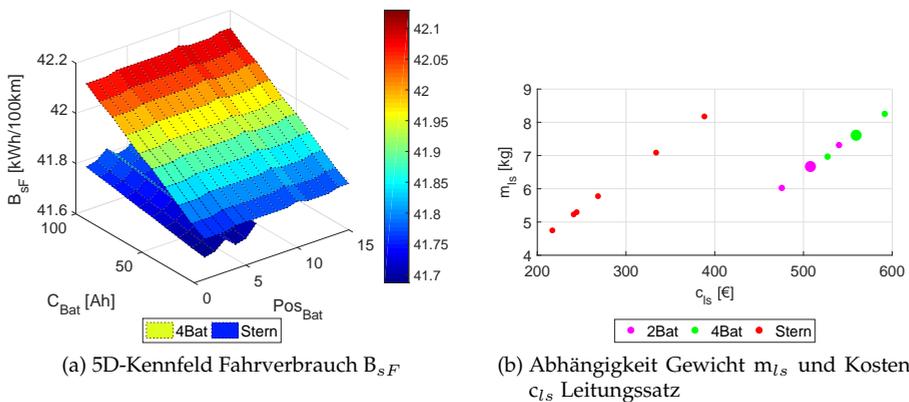


Abbildung 6.11.: Beispiel: Dreidimensionale Abbildung eines 5D-Kennfeldes und Darstellung von Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Optimierungsgrößen mit Hilfe von 2D-Punktwolken

7. Ergebnisse der vorgestellten Design Space Exploration

Dieses Kapitel analysiert die Entwürfe der Design Space Exploration (DSE) hinsichtlich der in Kapitel 5.2 definierten KPIs. Die Entwürfe entstehen aus der Variation der in Kapitel 5.3 definierten Freiheiten im Entwurf zukünftiger Energieversorgungsnetze, die Topologie sowie die Kapazität, Position und Anzahl der integrierten Speicher, innerhalb der in Kapitel 5.3.5 festgelegten Grenzen. Die dargelegten Ergebnisse der DSE erlauben folglich nicht nur das Ableiten vielversprechender Lösungen für den Entwurf zukünftiger Energieversorgungsnetze, sondern auch die gewählten KPIs hinsichtlich ihres Einflusses auf den Systementwurf und folglich ihre Zweckmäßigkeit zu untersuchen.

Zunächst erläutern Kapitel 7.1 bis 7.3 die Ergebnisse der drei definierten KPIs, Spannungsstabilität, Energieverbrauch und Betriebskosten für die DSE des definierten Elektro- und Verbrennungsmittelklassefahrzeugs (Segment C) aus Kapitel D.1 und das Winter-Szenario aus Kapitel 6.1.1. Dies erlaubt Rückschlüsse auf den Einfluss der variierten Auslegungsparameter auf die KPIs, da die restlichen Umgebungsbedingungen konstant bleiben. Ferner wird ein sogenannter Default-Entwurf definiert, um potentielle Verbesserungen ins Verhältnis setzen zu können. Dieser besitzt, in Analogie zu den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen etablierten Energieversorgungsnetzen heutiger Fahrzeuge, eine Sterntopologie mit einer Batterie, die im Frontbereich auf der Fahrerseite platziert ist (Position [1,2]). Als Kapazität werden 60 Ah gewählt.

Um optimale Lösungen ableiten zu können, wird die in Kapitel 5.1 definierte Pareto-Front aller drei KPIs der beiden Fahrzeugkonfigurationen ermittelt. Die gefundenen optimalen Kompromisse zeigt Kapitel 7.4. Dabei wird auf Abhängigkeiten zwischen den einzelnen KPIs und im Speziellen einiger ihrer einzelnen Optimierungsgrößen untereinander eingegangen.

Schließlich zeigt Kapitel 7.5, über den Vergleich zu den Ergebnissen der anderen Fahrzeugsegmente, A Kleinstwagen und J SUV beziehungsweise F Limousine, den Einfluss der fahrzeugspezifischen Eigenschaften, wie Art und Anzahl an Verbrauchern, Länge und Gesamtgewicht, auf die KPIs auf.

7.1. Parameterabhängigkeit Spannungsstabilität

Die Selektion stabiler Entwürfe erfolgt anhand der in Kapitel 5.2.1 definierten Spannungsgrenzen. Nicht stabile Entwürfe, die die Grenzen nicht einhalten, werden nicht weiter berücksichtigt. Die Bewertung der Spannungsstabilität der stabilen Entwürfe beruht auf der Standardabweichung der Spannung am Leistungsverteiler. Die simulierten Spannungen an den sechs Knotenpunkten der Bustopologien, vergleiche Abbildung 6.10, werden hierfür gemittelt, um analog zur zentralen Verteilerspannung am Sternpunkt der Sterntopologie nur einen einzelnen Spannungswert zu erhalten.

Für das simulierte Elektrofahrzeug resultieren alle Parameterkombinationen in einer stabilen Spannung. Dagegen erfordert die geschwindigkeitsabhängige Stromerzeugung des Verbrennungsfahrzeugs eine Mindestkapazität der verbauten Speicher von 60 Ah zur Einhaltung des definierten stabilen Spannungsbereichs.

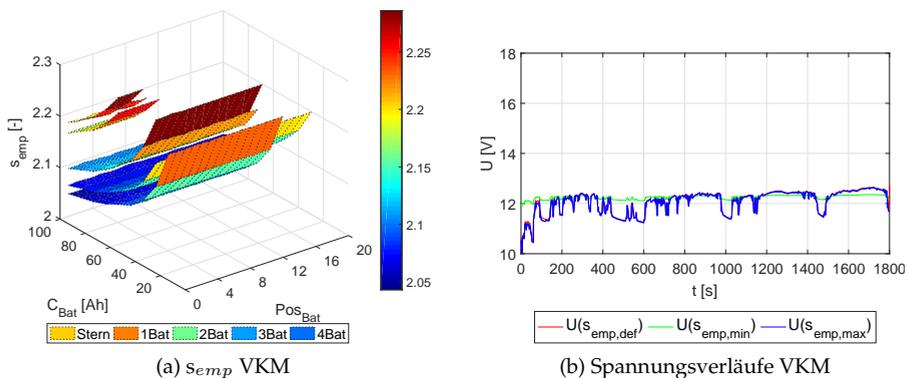


Abbildung 7.1.: Segment C: Standardabweichung aller stabilen Entwürfe und zugehörige Spannungsverläufe für Default, minimale und maximale Standardabweichung des Verbrennungsfahrzeugs

Der Verlauf der Standardabweichung des Verbrennungsfahrzeugs in Abbildung 7.1 (a) sinkt sowohl mit zunehmender Kapazität innerhalb eines Clusters als auch mit zunehmender Zahl an Batterien zwischen den Clustern und ist folglich regressiv zur insgesamt integrierten Batteriekapazität. Das Minimum liegt beim Bus-Entwurf mit vier 100 Ah-Batterien. Die mit der Kapazität steigende Stabilität der Spannung wird insbesondere durch den signifikant

geringeren Spannungseinbruch beim Start deutlich. So weist die Spannungskurve des Entwurfs mit minimaler Standardabweichung in Abbildung 7.1 (b) aufgrund der geringen Dynamik der Lastkurve, vergleiche Abbildung 6.2, im Gegensatz zum Default-Entwurf kaum noch Schwankungen auf. Die Spannung entspricht allerdings überwiegend der Batteriespannung von 12 V statt den gewünschten 14,3 V. Dies erklärt die höheren Werte der Standardabweichung im Vergleich zum Elektrofahrzeug. Dort zeigt sich die Grenze einer möglichen Beeinflussung der Standardabweichung über die Kapazität und der Einfluss der Energiequelle auf die Spannungsstabilität.

Der Kurvenverlauf der Spannung ist weiterhin unabhängig von der Topologie, wie der fast identische Verlauf des Default Entwurfs mit Sterntopologie und des Busentwurfs mit maximaler Standardabweichung in Abbildungen 7.1 (b) nahelegt. Die Standardabweichung der Sternentwürfe liegt minimal unter der der Busentwürfe mit einer Batterie und variiert zusätzlich zur Kapazität auch mit der Batterieposition. Für die Sternentwürfe des Elektrofahrzeugs in Abbildung 7.2 (a) liegen die Werte abhängig von der Position deutlich über oder unter den fast stabilen Werten aller Busentwürfe. Dies spiegelt den Einfluss des positionsbedingten Spannungsabfalls auf die Standardabweichung wider. Nur die Höhe der Kurven in Abbildung 7.2 (b) variiert mit der Leitungslänge der Versorgungsleitungen, nicht aber der von der Last bestimmte Verlauf.

Tabelle 7.1 zeigt die Werte der Default-Entwürfe und der Entwürfe mit minimaler und maximaler Standardabweichung.

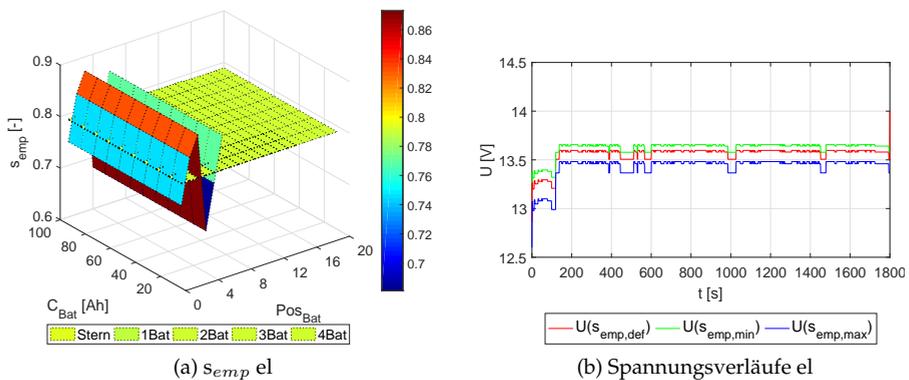


Abbildung 7.2.: Segment C: Standardabweichung aller stabilen Entwürfe und zugehörige Spannungsverläufe für Default, minimale und maximale Standardabweichung des Elektrofahrzeugs

Antrieb Fall	Default	VKM		E		
		max	min	Default	max	min
Topologie	Stern	Bus	Bus	Stern	Stern	Stern
Anzahl	1	1	4	1	1	1
Kapazität [Ah]	60	60	100	60	100	10
s_{emp}	2,256	2,286	2,043	0,746	0,874	0,681

Tabelle 7.1.: Default, maximale und minimale Standardabweichung s_{emp}

7.2. Parameterabhängigkeit Energieverbrauch

Der elektrische Energieverbrauch in Abbildung 7.3 ist für alle Busentwürfe nahezu konstant, also unabhängig von der Position und Kapazität der Batterie. Für das Verbrennungsfahrzeug ergibt sich auf 100 km eine Differenz von 124 Wh zwischen dem effizientesten und schlechtesten Busentwurf. Bei den Elektrofahrzeugen sind mit 4,3 Wh die Abweichungen sogar noch geringer. Der elektrische Energieverbrauch des Sternclusters liegt aufgrund der höheren Verluste durch lange Versorgungsleitungen für alle Parameterkombinationen deutlich über dem der Buscluster und variiert mit der Position der Batterie. Dies reflektiert den Einfluss der Leitungsverluste zwischen Quelle, Batterie und Verteiler auf den Verbrauch. Die längste Zuleitung durch die Positionierung des Speichers im Heck führt zu den höchsten Verlusten.

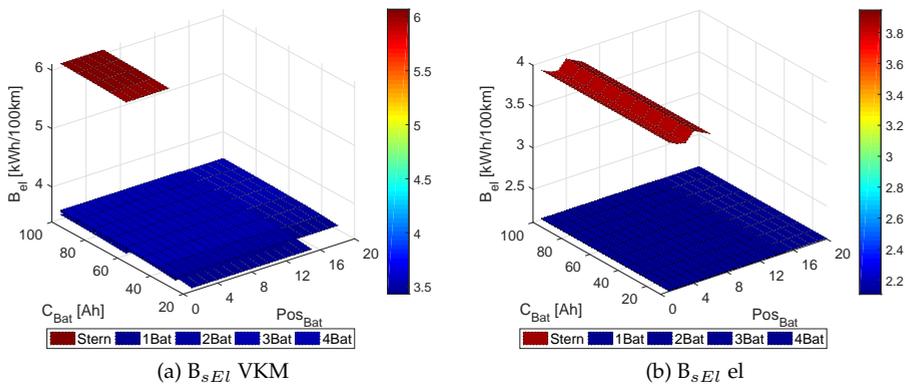


Abbildung 7.3.: Segment C: Design Space Exploration elektrischer Energieverbrauch

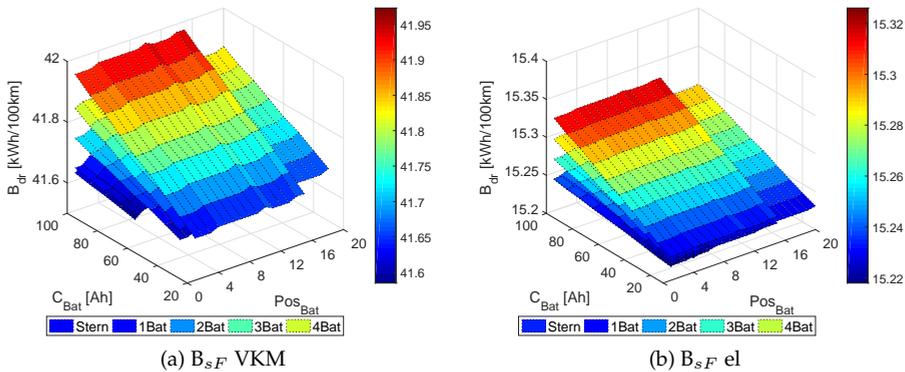


Abbildung 7.4.: Segment C: Design Space Exploration gewichtsabhängiger Fahrverbrauch für Vortrieb

Der durch den gewünschten Vortrieb entstehende Fahrverbrauch in Abbildung 7.4 ist gewichtsabhängig und nimmt folglich sowohl mit wachsender Kapazität als auch mit steigender Anzahl an Batterien zu. Allerdings sind die durch das Gewicht verursachten Unterschiede zwischen den effizientesten und schlechtesten Entwürfen im Vergleich zu den zuvor gezeigten Abweichungen des elektrischen Verbrauchs der zwei Topologien gering.

Während der sich aus diesen beiden Größen ergebende Energieverbrauch der Fahrzeuge für alle Bustopologien beider Antriebsarten minimale Unterschiede im Verbrauch zeigt, vergleiche Abbildung 7.5 (a) und (b), liegt der Verbrauch der Sterntopologien in Abbildung 7.5 (c) und (d) deutlich darüber. Folglich ist der signifikante Unterschied der Entwürfe mit minimalem und maximalem Gesamtverbrauch in Tabelle 7.2 insbesondere auf den höheren elektrischen Energieverbrauch der Sterntopologie zurückzuführen.

Weiterhin fällt auf, dass der Einfluss des elektrischen Verbrauchs auf den Gesamtverbrauch im Elektrofahrzeug aufgrund des höheren Wirkungsgrads bei der Übertragung¹ geringer ist. Beispielsweise resultiert ein Unterschied von 1,84 kWh im elektrischen Verbrauch in Tabelle 7.2 in einer Differenz von 1,99 kWh auf 100 km für das Fahrzeug, während im Verbrennungsfahrzeug ein Unterschied von 2,64 kWh zu einer Abweichung von 9,5 kWh führt. Dies entspricht einer Differenz von 1,12 l Benzin auf 100 km.

¹Der Wirkungsgrad für die Hochvoltbatterie und den DC/DC-Wandler wird jeweils mit 95% angesetzt, der des Generators mit 75% und 35% für den Verbrennungsmotor

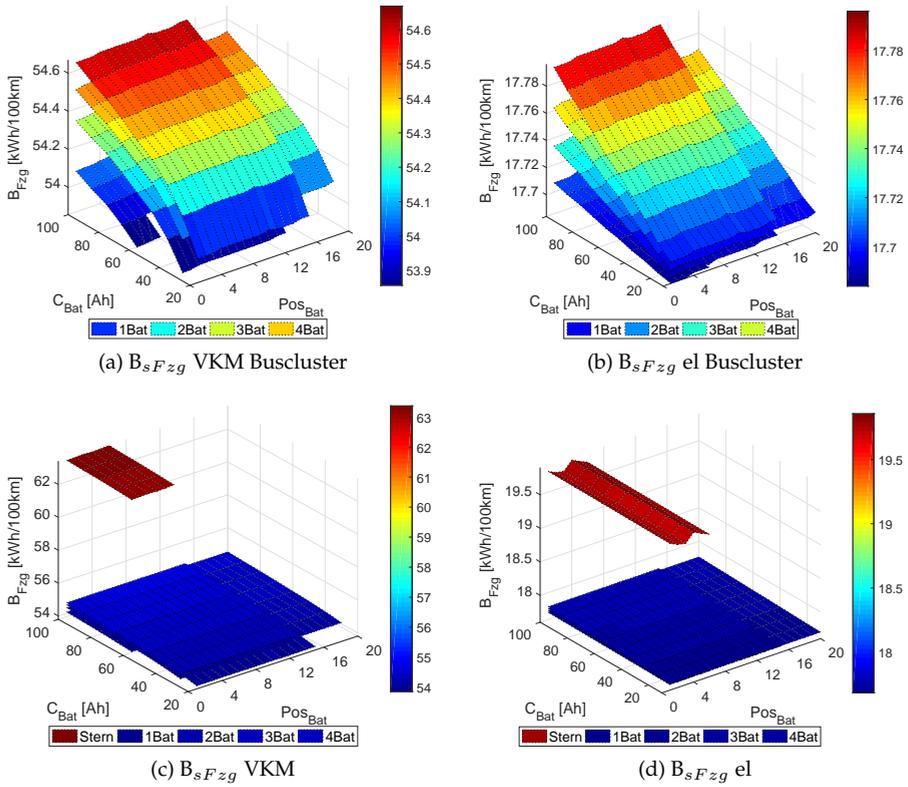


Abbildung 7.5.: Segment C: Design Space Exploration Energieverbrauch

Antrieb	VKM			E		
	Default	max	min	Default	max	min
Topologie	Stern	Stern	Bus	Stern	Stern	Bus
Anzahl	1	1	1	1	1	1
Kapazität [Ah]	60	100	60	60	100	10
$B_{sFzg} \left[\frac{kWh}{100km} \right]$	63,102	63,366	53,857	19,8	19,856	17,864
$B_{sEl} \left[\frac{kWh}{100km} \right]$	6,025	6,07	3,431	3,907	3,945	2,107
$B_{sF} \left[\frac{kWh}{100km} \right]$	41,585	41,688	41,603	15,231	15,242	15,219
m_{El} [kg]	7,813	13,311	7,979	6,773	9,005	3,758

Tabelle 7.2.: Default, maximaler und minimaler Energieverbrauch des Fahrzeugs B_{sFzg} , der beinhaltet elektrische Verbrauch B_{sEl} , Fahrverbrauch B_{sF} und das Gewicht der Energieversorgung m_{El} .

7.3. Parameterabhängigkeit Gesamtbetriebskosten

Die Kostenanteile des Energieversorgungsnetzes am Fahrzeugpreis werden nach Kapitel 5.2.3 über die Materialkosten c_{El} , die sich aus den Kosten des Leitungssatzes c_{Ls} und des Speichers c_{Ba} zusammensetzen, und die vom OEM zu erbringenden Emissionsstrafen c_{CO_2} abgeschätzt. Die Leitungssatzkosten wiederum bestehen aus den mittels Tabelle D.8 berechneten Leitungskosten c_L und den Kosten der Sicherungselemente c_{Si} aus Tabelle 7.3. Der Preis für Halbleiter basiert auf den Kosten des Power Profet Halbleiterschalters von Infineon, der Relais und Schmelzsicherungen bis zu Werten von 40 A ersetzen kann [Eck16]. Weiterhin erfolgt die Abschätzung auf Basis der größten Preisdifferenz zu Schmelzsicherungen, deren Preise abhängig von Art, Hersteller und Verkaufsmenge zwischen 0,004 € bis 0,70 € variieren. Weiterhin führen die nach [Knu+17] aktuellen Kosten von Lithium-Ionen-Speichern von 227 € pro kWh zu Zellkosten von 2,57 € für die hinterlegte Zelle mit 2,7 Ah Kapazität bei einer Leerlaufspannung von 4,2 V.

Komponente	Schmelzsicherung	Halbleiter	Batteriezelle
Stückkosten	0,004 €	5,54 € (6,21 \$)	2,57 €

Tabelle 7.3.: Angenommene Stückkosten

Abbildung 7.6 (a) zeigt die aus den angenommenen Stückkosten berechneten Leitungssatzkosten der Stern- und Busentwürfe des C-Segment Verbrennungsfahrzeugs. Diese variieren für alle Cluster mit den Positionen der Batterien und den dadurch veränderten Versorgungsleitungen, wobei der Einfluss bei den Sternentwürfen ungleich höher ausfällt. Der Leitungssatz der Busentwürfe ist aufgrund der hohen Halbleiterkosten deutlich teurer als der der Sternentwürfe. Die Batteriekosten ergeben sich aus der Summe der Zellkosten. Mögliche Kostenreduktionen durch Skaleneffekte bei vielen Zellen oder Zusatzkosten durch mehrere Speicher werden nicht berücksichtigt. Deshalb steigen die Materialkosten der Energieversorgung in Abbildung 7.6 (b) proportional zu Kapazität und Batteriezahl. Dies erhöht die Differenz zwischen Stern- und Busentwürfen bei mehreren Batterien weiter. Während für eine Batterie mit 10 Ah nur 30,84 € anfallen, erfordert der Einsatz von vier Batterien mit einer Kapazität von 100 Ah Ausgaben von 1141,1 €.

Tabelle 7.4 stellt die Default-Entwürfe den Entwürfen mit minimalen und maximalen Materialkosten des Energieversorgungsnetzes gegenüber. Die Materialkosten der Sterntopologie mit der kleinsten möglichen Kapazität sind für

alle Fahrzeuge minimal. Diese hat neben den geringeren Kosten für den Leitungssatz auch die kleinstmöglichen Speicherkosten.

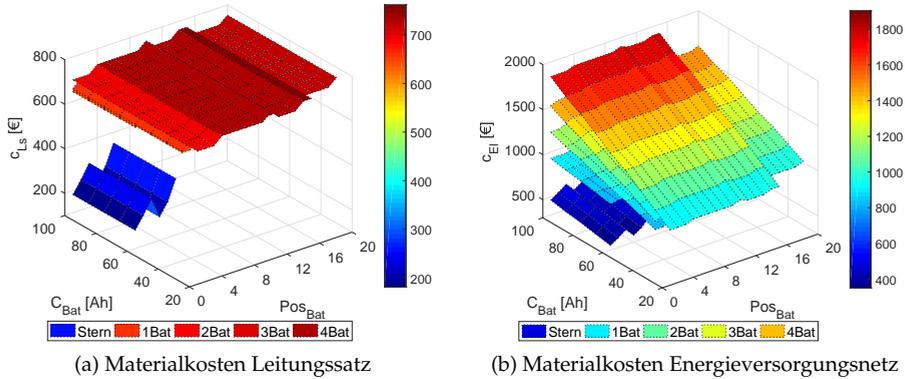


Abbildung 7.6.: Segment C: Design Space Exploration Materialkosten, VKM

Antrieb Fall	Default	VKM		E		
		max	min	Default	max	min
Topologie	Stern	Bus	Stern	Stern	Bus	Stern
Anzahl	1	4	1	1	4	1
Kapazität [Ah]	60	100	60	60	100	10
c_{El} [€]	351,04	1902,6	351,0	304,3	1732,9	165,5
c_L [€]	181,12	346,04	181,12	134,36	215,07	134,36
c_{Si} [€]	0,3	415,5	0,3	0,27	376,72	0,27
c_{Ba} [€]	169,62	1141,1	169,62	169,62	1141,1	30,84

Tabelle 7.4.: Default, maximale und minimale Materialkosten Energieversorgungsnetz c_{El} und dessen Bestandteile Leitungen c_L , Sicherungselemente c_{Si} und Batterien c_{Ba} .

Die Emissionsstrafen pro verkauftem Verbrennungsfahrzeug werden nach Kapitel 5.2.3 errechnet. Die Berechnung der zugrundegelegten Emissionen erfolgt mittels Verbrauch und den in Kapitel 3.3.2 angegebenen Parametern zur Umrechnung. Analog lassen sich für Elektrofahrzeuge, basierend auf den in [IK16] angegebenen $535 \frac{gCO_2}{kWh}$ Emissionen des deutschen Strommix, äquivalente Emissionswerte und -strafen angegeben. Den im vorigen Kapitel ermittelten Energieverbrauch zugrunde gelegt, zeigt sich in Abbildung 7.7 (b), dass auch Elektrofahrzeuge den ab 2020 geltenden Grenzwert von $95 gCO_2$

pro Kilometer nicht zwingend einhalten würden.

Die Unterschiede der minimal und maximal zu erbringenden Strafzahlungen pro Fahrzeug in Abbildung 7.7 (a) sind für die Verbrennungsfahrzeuge mit 5054€ bis 7654€ signifikant. Bleibt die Gesetzgebung unverändert, könnten folglich 2019 die höheren Materialkosten der Busentwürfe bei Verbrennungsfahrzeugen durch geringere Emissionsstrafen aufgewogen werden. Die Differenz der Strafzahlungen pro Fahrzeug zwischen dem Default-Sternentwurf und den Busentwürfen liegt unter den angenommenen Randbedingungen bei maximal 2550€ und damit über dem maximalen Preisunterschied der Materialkosten von 1551,6€. Ohne die erforderlichen Entwicklungskosten einer Umgestaltung würden die vom OEM aufzuwendenden Kosten pro Fahrzeug in diesem Fall reduziert.

Die äquivalenten Emissionsstrafen des Elektrofahrzeugs in Abbildung 7.7 (b) sinken für Sternentwürfe mit langen Versorgungsleitungen und folglich höherem Gewicht, da der elektrische Verbrauch nach Kapitel 7.2 zunimmt. In diesem Fall hat eine Gewichtsreduktion im Hinblick auf die Emissionsstrafen sogar negative Auswirkungen.

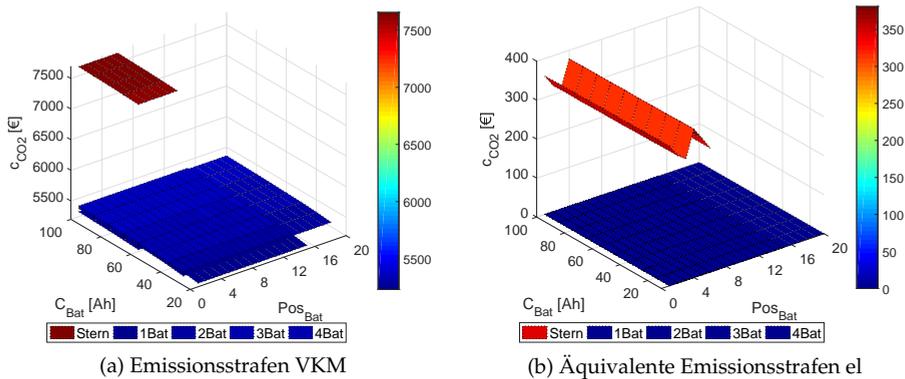


Abbildung 7.7.: Segment C: Design Space Exploration Emissionsstrafen c_{CO_2}

Die spezifischen Energiekosten pro 100 km in Abbildung 7.8 sind proportional zum Energieverbrauch und liegen demgemäß für das Sterncluster deutlich über den betrachteten Busclustern. Die teils geringen Unterschiede im Energieverbrauch führen bei der Rundung auf Centbeträge außerdem dazu, dass mehrere Entwürfe minimale Betriebskosten aufweisen. So ergeben sich nach Tabelle 7.5 im Verbrennungsfahrzeug des C-Segments Minima für

eine Bustopologie mit 60 Ah Batteriekapazität, egal ob diese auf eine oder zwei Batterien verteilt wird. Im Elektrofahrzeug sind alle Kapazitätswerte bis 30 Ah bei einem Bus mit einer Batterie sowie 10 Ah bei zwei Batterien optimal.

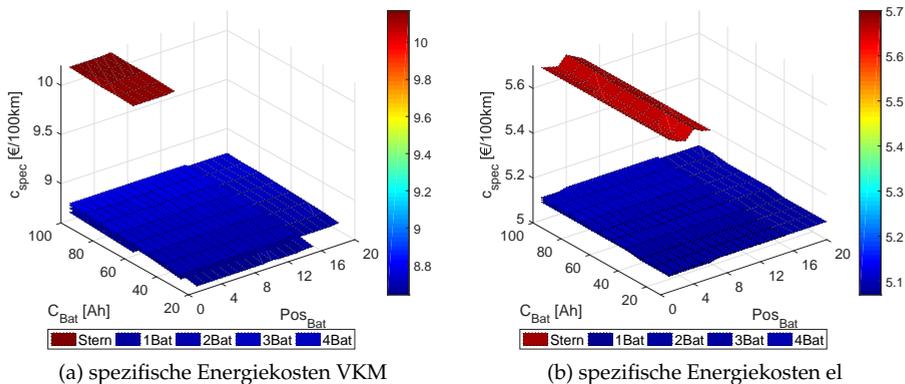


Abbildung 7.8.: Segment C: Design Space Exploration spezifische Energiekosten c_{spec} pro 100km

Antrieb Fall	Default	VKM		E		
		max	min	Default	max	min
Topologie	Stern	Stern	Bus	Stern	Stern	Bus
Anzahl	1	1	1 / 2	1	1	1 / 2
Kapazität [Ah]	60	100	60 / 30	60	80-100	10-30/ 10
$c_{spec} [\frac{\text{€}}{100km}]$	10,13	10,17	8,64	5,68	5,7	5,07
$G_{CO_2} [\frac{gCO_2}{km}]$	170,23	170,94	145,29	105,93	106,23	94,61
$c_{CO_2} [€]$	7604	7654	5054	357	379	0
$c_{TCO} [€]$	24992	25396	20639	8824	8978	8155

Tabelle 7.5.: Default, maximale und minimale spezifische Energiekosten c_{spec} , zugehörige Emissionswerte G_{CO_2} , -strafen c_{CO_2} und TCO c_{TCO} .

Zur Berechnung von Steuern und Energiekosten muss die über einen definierten Zeitraum erbrachte Fahrstrecke bekannt sein. Legt man die Lebensdauer von 150 000 km Laufleistung aus Kapitel 3.3.3 für einen Zeitraum von

fünf Jahren zugrunde, betragen die TCO^2 des Verbrennungsfahrzeugs in Abbildung 7.9 (a) etwa das zweieinhalb-fache der TCO des Elektrofahrzeugs in (b). Während die TCO der Sternentwürfe des Verbrennungsfahrzeugs die der Bustentwürfe übertreffen, gilt das für das Elektrofahrzeug aufgrund des höheren Einflusses der Materialkosten für die Bustopologie mit vier Batterien und Kapazitätswerten über 80 Ah nicht.

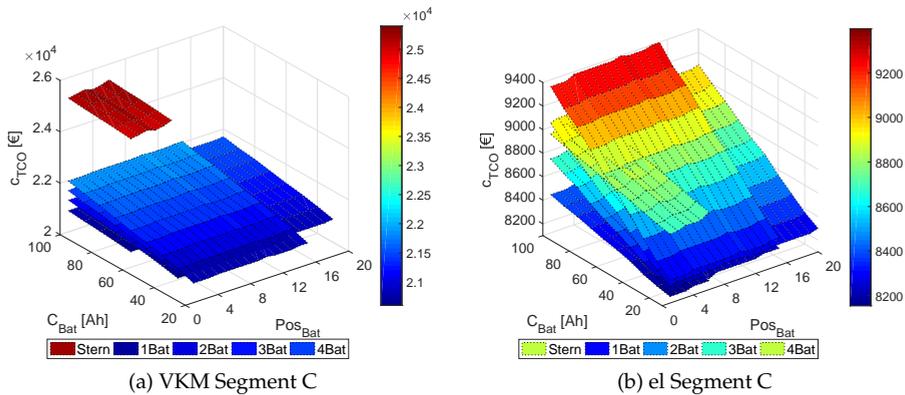


Abbildung 7.9.: Segment C: Design Space Exploration TCO c_{TCO} für 150000km Fahrt

7.4. Paretofronten der KPI

Im Folgenden wird zunächst anhand der Ergebnisse der C-Segment Fahrzeuge auf die Zusammenhänge der drei KPIs Standardabweichung der Spannung, Energieverbrauch Fahrzeug und TCO untereinander eingegangen. Im Anschluss werden die nach Kapitel 5.1 bestimmten Paretofronten der drei Größen und daraus abgeleitete optimale Alternativen der Entwürfe der Design Space Exploration des Energieversorgungsnetzes dargelegt.

In Abbildung 7.10 (a) ist die für Verbrennungsfahrzeuge mit der verbauten Batteriekapazität sinkende Standardabweichung bei leicht steigendem Energieverbrauch zu sehen. Ähnlich verhält sich die Positionsabhängigkeit der Sternentwürfe des Elektrofahrzeugs in (b). Abbildung E.14 zeigt diese Zusammenhänge für beide Topologien im Detail. Während für das Verbren-

²Auf das Energieversorgungsnetz bezogen also inklusive der Materialkosten des Versorgungsnetzes aber exklusive des Kaufpreises des gesamten Fahrzeugs

nungsfahrzeug die Busentwürfe aufgrund des durchweg niedrigeren Energieverbrauchs eine Paretofront bilden, ergeben sich für das Elektrofahrzeug aufgrund der kleineren Standardabweichung neben möglichen Busentwürfen auch für drei Batteriepositionen Pareto-optimale Sternentwürfe.

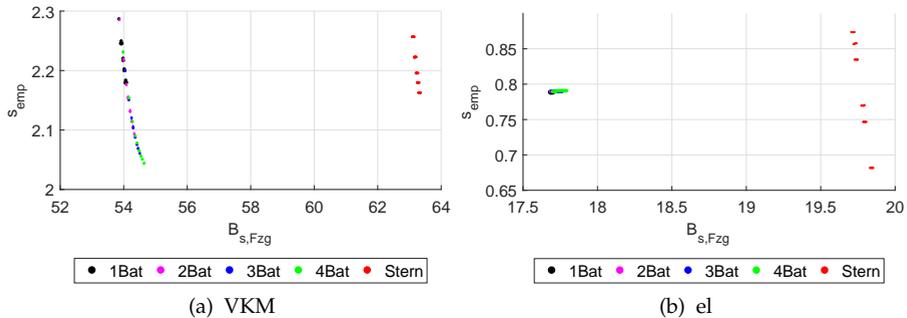


Abbildung 7.10.: Segment C: Abhängigkeit Standardabweichung und Energieverbrauch

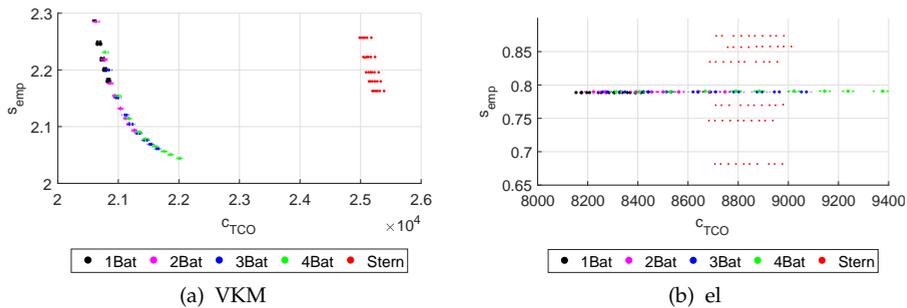


Abbildung 7.11.: Segment C: Abhängigkeit Standardabweichung und TCO

Das Verhältnis zwischen Standardabweichung und TCO des Verbrennungsfahrzeugs in Abbildung 7.11 (a) zeigt ebenfalls eine, durch die Punkte der Busentwürfe definierte, Paretofront. Abhängig von Zahl und Kapazität der Batterien verringert sich die Standardabweichung bei gleichzeitig höheren TCO. Im Elektroauto in (b) besteht kein solcher Zusammenhang. Die sechs Linien der Punkte der Sternentwürfe zeigen, wie bereits in Abbildung 7.10 (b), die in Kapitel 7.1 dargelegte Abhängigkeit der Spannungsstabilität von den möglichen Positionen der Batterie bei steigenden TCO Werten mit wachsender Zahl

und Kapazität der Batterien. Die „Paretofront“ springt von der Bustopologie mit minimalen TCO zur Sterntopologie mit minimaler Standardabweichung.

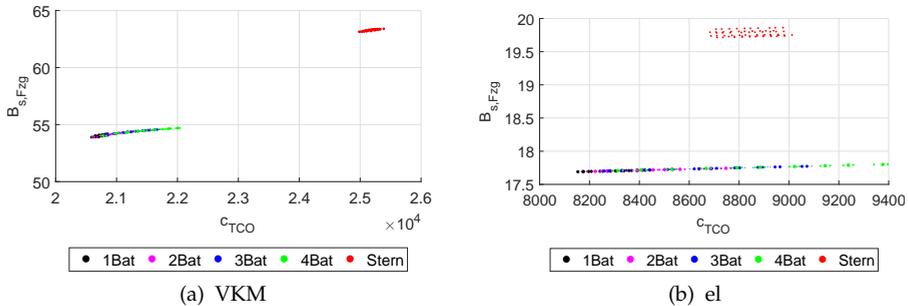


Abbildung 7.12.: Segment C: Abhängigkeit Energieverbrauch und TCO

Das Optimum bezüglich des Zusammenhangs zwischen Energieverbrauch und TCO des Verbrennungsfahrzeugs in Abbildung 7.12 (a) bildet eine Bustopologie mit einer Kapazität von 60 Ah. Dies ist auf den leicht steigenden Verbrauch mit wachsender Zahl und Kapazität der Batterien zurückzuführen. Angesichts der deutlich geringeren Emissionsstrafen und Betriebskosten dominiert selbst der schlechteste Busentwurf den besten Sternentwurf. Dagegen zeigt sich für das Elektrofahrzeug in (b), dass trotz des durchweg höheren Energieverbrauchs der Sternentwürfe nur bis zu einem gewissen Kapazitätswert die Busentwürfe unter den gegebenen Randbedingungen eine bessere TCO aufweisen. Hier ist einerseits der höhere Einfluss der Materialkosten auf die TCO zu beobachten, da für Elektrofahrzeuge aus heutiger Sicht weder Steuern noch Emissionsstrafen anfallen, und andererseits die aufgrund der geringeren Verluste bei der Energiebereitstellung aus dem HV-Netz kleineren Unterschiede im Gesamtverbrauch. Auch hier steigt der Verbrauch mit wachsender Zahl und Kapazität leicht an, weshalb das Optimum bei einer Batterie mit 10 Ah liegt.

Für die simulierten Entwürfe des Segment C Fahrzeugs stellt Abbildung 7.13 den Lösungsraum der in dieser Arbeit verwendeten KPIs in (b) und (d) den heute zur Auslegung verwendeten Optimierungsgrößen Materialkosten und Gewicht zusammen mit der Standardabweichung der Spannung in (a) und (c) gegenüber. Die sich ergebenden Pareto-optimalen Punkte der beiden Topologien sind farblich gekennzeichnet. Die zugehörigen Pareto-optimalen Parameterkombinationen zeigt Abbildung E.16.

Die Datenpunkte der Elektrofahrzeuge in (a) und (b) zeigen für beide Kos-

tengrößen die zuvor beschriebenen Linien konstanter Standardabweichung, eine für alle Busentwürfe und eine für jede betrachtete Batterieposition der Sternentwürfe. Das Gewicht in (a) steigt proportional mit den Stückkosten. Folglich sind nur ein Stern- und ein Busentwurf mit einer minimalen Batteriekapazität von 10 Ah und der Batterieposition mit der kürzesten Zuleitung Pareto-optimal. Die restlichen Stern- und Busentwürfe entfallen aufgrund höherem Gewicht, Kosten oder größerem Spannungsabfall. Die Berücksichtigung der KPIs TCO und Energieverbrauch in (b) führt dazu, dass sich die Punkte der Sternentwürfe im Verhältnis zu den Busclusterpunkten verschieben. Dadurch sind alle Bustopologien mit einer auf der linken Fahrzeugseite ($x=2$) positionierten 10 Ah Batterie Pareto-optimal.

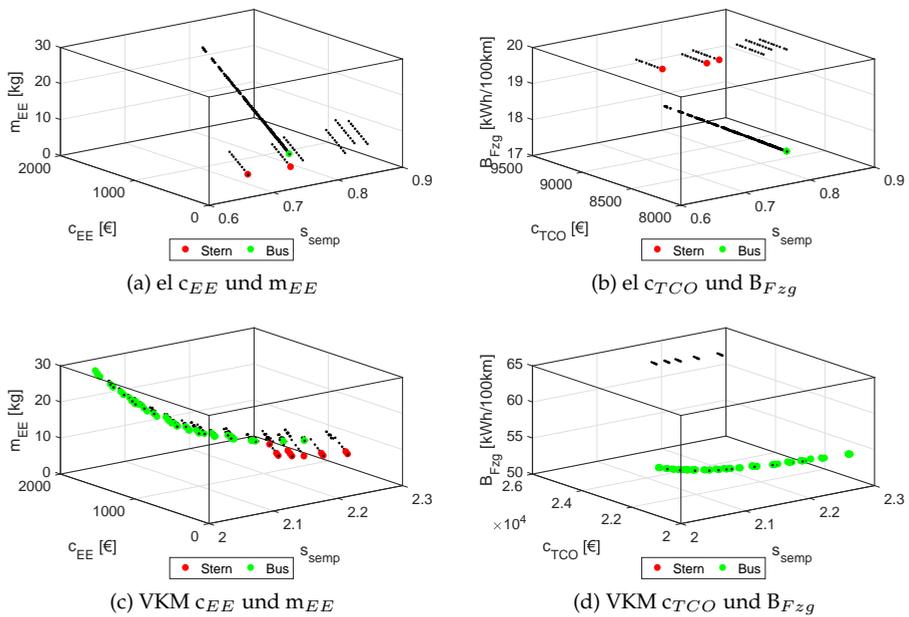


Abbildung 7.13.: Segment C: Paretofront der KPIs Spannungsstabilität mit Gewicht m_{EE} und Materialkosten c_{EE} beziehungsweise Energieverbrauch B_{Fzg} und TCO c_{TCO}

Für das Verbrennungsfahrzeug in Abbildung 7.13 bildet sich sowohl für Materialkosten und Gewicht in (c) als auch für TCO und Energieverbrauch in (d) eine vom regressiven Kurvenverlauf zwischen Standardabweichung und

Kosten abhängige Pareto-Front von günstigen Entwürfen hin zu teuren mit geringerer Standardabweichung. Die Materialkosten der Sternentwürfe in (c) sind durchweg kleiner als die der Busentwürfe, weshalb diese bei gleicher Standardabweichung und Gewicht vorgezogen werden. Dies führt dazu, dass insbesondere Busentwürfe mit mehreren Batterien für einen großen Kapazitätsbereich und verschiedene Batteriepositionen Teil der Pareto-Front sind, vergleiche Abbildung E.16 (c).

Für den Energieverbrauch in (d) gilt das Gegenteil. Die Sternentwürfe entfallen bei der Berücksichtigung der TCO und des Energieverbrauchs vollständig und werden durch effizientere Busentwürfe ersetzt. Dieser Effekt tritt aufgrund des vergleichsweise hohen Energieverbrauchs der Sternentwürfe bereits bei den zusätzlich zu den Materialkosten berücksichtigten Emissionsstrafen auf, siehe Abbildung E.19. Die Pareto-optimalen Kombinationen für beide Lösungsräume sind in Tabelle E.9 und E.10 aufgelistet.

7.4.1. Abhängigkeiten einzelner Optimierungsgrößen

Abbildung 7.14 (a) zeigt den für Verbrennungsfahrzeuge zuvor angesprochenen, von der Batteriekapazität abhängigen, regressiven Zusammenhang zwischen Materialkosten und Standardabweichung noch einmal im Detail.

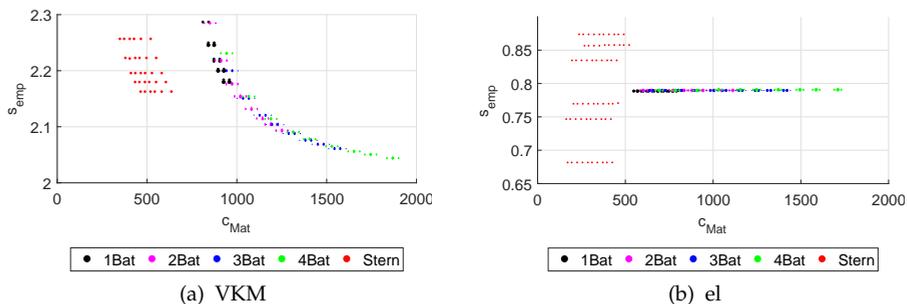


Abbildung 7.14.: Segment C: Abhängigkeit zwischen Standardabweichung und den Materialkosten des Energieversorgungsnetzes

Die Sternclusterpunkte der fünf stabilen Kapazitätswerte verschieben sich im Vergleich zu den TCO in Abbildung 7.11 nach links. Die Punkte der Positionen mit minimalen Materialkosten sind Teil der Pareto-Front. Die analo-

ge Verschiebung der Linien konstanter Spannungsstabilität des Elektrofahrzeugs in (b) führt dazu, dass alle Sternentwürfe durchweg günstiger sind als der günstigste Busentwurf. Damit ist kein Busentwurf mehr optimal, sondern der Sternentwurf mit minimalen Kosten und Standardabweichung. Da das Gewicht proportional zu den Materialkosten ist, ist dessen Verhältnis zur Standardabweichung analog, wobei sich die Linien erneut verschieben.

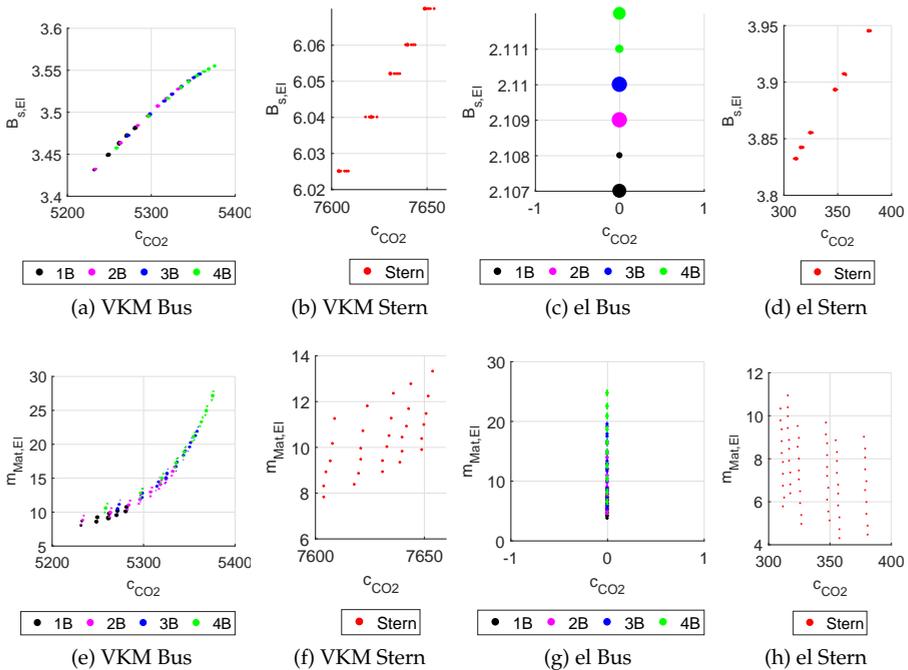


Abbildung 7.15.: Segment C: Abhängigkeit zwischen Emissionsstrafen und elektrischem Verbrauch (oben) sowie Gewicht (unten)

Die Emissionsstrafen in Abbildung 7.15 steigen für die Buscluster des Verbrennungsfahrzeug proportional zum Energieverbrauch in (a) und exponentiell zum Gewicht in (e). Während die Emissionsstrafen des Sternclusters in (b) ebenfalls linear mit dem elektrischen Verbrauch zunehmen, ist die gewichtsbedingte Zunahme in (f) nur minimal. Die Streuung der Punkte in (b) beziehungsweise die Linienbildung in (f) zeigt die Überlagerung der Ergebnisse durch die jeweils andere Größe. Weiterhin beeinflussen die mit dem

Gewicht veränderten zulässigen Emissionsgrenzwerte das Ergebnis. Die Punkte der Sternentwürfe des Elektrofahrzeugs in (d) und (h) zeigen dieselben Abhängigkeiten, wobei hier für die Entwürfe mit höherem elektrischen Verbrauch in (d) die Emissionsstrafen in (h) mit sinkendem Gewicht leicht zunehmen. Folglich würde in diesen Fällen eine über Gewichtsreduktion erzielte Verminderung der Emissionen zu höheren Emissionsstrafen führen. Für die Buscluster würden keine Strafen anfallen.

7.5. Veränderung der Ergebnisse durch fahrzeugspezifische Eigenschaften

Die bisher diskutierten Mittelklassefahrzeuge unterscheiden sich von den definierten Kleinwagen des A-Segments, dem Verbrennungs-SUV des J-Segments sowie der Elektrolimousine des F-Segments in folgenden Punkten:

- Zahl und Art der verbauten Lasten
- Fahrzeugabmessungen, -gewicht und cw-Wert
- Anzahl an Gänge und deren Übersetzung

Letztere beeinflusst die Drehzahl und damit den maximalen Ausgangsstrom des Generators im Verbrennungsfahrzeug, während die verbauten Lasten die Dynamik und Höhe des Lastgangs und damit den elektrischen Verbrauch verändern. Die restlichen Parameter ändern den Fahrwiderstand. Außerdem ist der Graph aus Kapitel 6.2 und damit Positionen und Routingwege von der Fahrzeuglänge- und breite abhängig.

Zur Garantie der Spannungsstabilität liegt die Mindestkapazität im A-Segment Verbrennungsfahrzeug ebenfalls bei 60 Ah, siehe Tabelle 7.6. Für das J-Segment beträgt sie trotz des größeren Ausgangsstroms des Generators, vergleiche Kapitel 6.2, aufgrund der höheren Last 70 Ah.

	Segment A/C				Segment J			
Batterieanzahl	1	2	3	4	1	2	3	4
Kapazität [Ah]	60	30	20	20	70	40	30	20

Tabelle 7.6.: Mindestkapazität zur Einhaltung der Spannungsgrenzen

Die in Kapitel 7.1 beschriebene Abhängigkeit der Standardabweichung der Verbrennungsfahrzeuge von der Kapazität bleibt unabhängig von den veränderten Fahrzeugeigenschaften bestehen, ebenso die positionsbedingte Veränderung der Standardabweichung der Sternentwürfe. Allerdings verändert die Fahrzeuglänge den Einfluss der Position. Im A-Segment Verbrennungsfahrzeug in Abbildung 7.16 (a) liegt die Standardabweichung der Sternentwürfe, wie bereits im C-Segment, minimal unter der der Busentwürfe mit einer Batterie. Im J-Segment in (c) dagegen ist sie bedingt durch die große Fahrzeuglänge abhängig von der Batterieposition größer oder kleiner als die Werte der Busentwürfe.

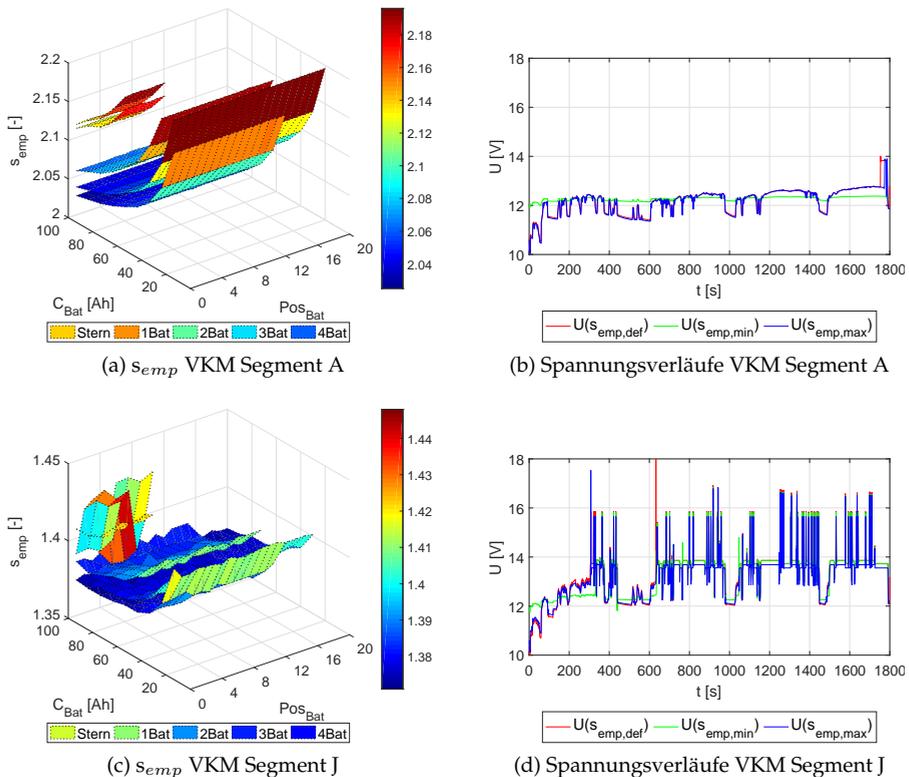


Abbildung 7.16.: Standardabweichung aller stabilen Entwürfe und ausgewählte Spannungsverläufe der Verbrennungsfahrzeuge Segment A und J

Trotz des höheren Lastniveaus und einer aufgrund der integrierten elektrischen Bremse größeren Dynamik der Lastkurve, vergleiche Abbildung D.1, schwankt im J-Segment durch den Einsatz eines leistungsfähigeren Generators das Spannungsniveau der Kurven in Abbildung 7.16 (d) um 14,3 V und nicht um 12 V. Folglich verringert sich die Standardabweichung im Vergleich zu den anderen Verbrennungsfahrzeugen signifikant. Der höhere Ausgangsstrom des DC/DC-Wandlers des F-Segments beeinflusst dagegen den Kurvenverlauf nicht. Allein der Lastgang bestimmt das Niveau der Standardabweichung. Für die Elektrofahrzeuge in Abbildung E.2 ist deshalb eine Zunahme der Standardabweichung mit größerer Dynamik der Lastkurve zu beobachten.

Die Abhängigkeiten des Energieverbrauchs sind für alle Segmente gleich, wobei der elektrische Verbrauch in Abbildung E.3 mit der Zahl aktiver Verbraucher und der Fahrverbrauch in Abbildung E.4 mit dem Gewicht deutlich zunimmt. Der Verbrauch des J- beziehungsweise F-Segment Fahrzeugs liegt folglich signifikant über dem Verbrauch des A- und C-Segments der jeweiligen Antriebsart.

Die ermittelten Verbrauchswerte der Entwürfe liegen nach Tabelle 7.7³ außer für das Elektrofahrzeug des F-Segments deutlich über den angegebenen Normwerten. Allerdings übertrifft nur der Verbrauch des Verbrennungsfahrzeugs im A-Segment und des Elektrofahrzeugs im C-Segment mit bis zu 60% die in [Tie+16] angegebene Diskrepanz von durchschnittlich 42% zwischen den realen und den Normemissionen deutlich.

Antrieb Segment		VKM			E		
		A	C	J	A	C	F
B_N	$[\frac{kWh}{100km}]$	38,62	45,49	80,68	15,1	12,7	22
B_{sFzg}	$[\frac{kWh}{100km}]$	53,5- 62,9	54- 63,3	93,2- 107,2	16,6- 19	16,6- 20,3	20,8- 23,8
B_{sF}	$[\frac{kWh}{100km}]$	41,3	41,8	78,2	14,3	15,3	17,9
B_{sEl}	$[\frac{kWh}{100km}]$	3,4-6	3,4-6	4,2-8	2-4	2,1-4,2	2,5-5

Tabelle 7.7.: Vergleich zwischen Normverbrauch und Verbrauchswerte DSE

³Der angegebene Normverbrauch der Verbrennungsfahrzeuge entspricht 4,5 l im A, 5,3 l im C und 9,4 l im J-Segment auf 100 km. Der simulierte Verbrauch variiert für das A-Segment zwischen 6,23 l und 7,33 l, für das C-Segment zwischen 6,29 l und 7,72 l und für das J-Segment zwischen 10,86 l und 12,5 l.

Die jeweiligen Abhängigkeiten der einzelnen Kostengrößen aus Kapitel 7.3 sind unabhängig von den Fahrzeugparametern. Allerdings liegen die Materialkosten im J und F-Segment aufgrund der größeren Fahrzeuglänge und Anzahl an Verbrauchern deutlich über denen der anderen Segmente, genauso wie die spezifischen Energiekosten und die Emissionsstrafen der Verbrennungsvariante aufgrund des viel größeren Energieverbrauchs. Die TCO der Segment A und C Fahrzeuge sind fast identisch. Die höheren Emissionsstrafen und insbesondere die um zwei Drittel höheren spezifischen Betriebskosten des Segment J Verbrennungsfahrzeugs vergrößern den Abstand zu den TCO des Elektrofahrzeugs des F-Segments auf fast das Vierfache. Die TCO des J-Segment Fahrzeugs liegen weiterhin analog zum Energieverbrauch auch signifikant über denen der anderen Verbrennungsfahrzeuge.

Interessant ist außerdem, dass die zu erbringenden Strafzahlungen des Segment A Fahrzeugs in Tabelle E.5 mit 6237 € bis 8628 € deutlich über denen des C-Segments mit 5232 € bis 7659 € liegen. Grund hierfür ist der aufgrund des geringeren Gewichts niedrigere zulässige Emissionsgrenzwert im A-Segment, obwohl der Energieverbrauch und damit die Emissionen fast identisch sind. Die Reduktion des gewichtsabhängigen Roll- und Beschleunigungswiderstands wird durch den größeren Luftwiderstand fast ausgeglichen. Sogar für die Elektrovariante wären bei analogen Strafen Zahlungen zwischen 913 € und 2118 € fällig. Dies stellt das Konzept eines solchen Kleinstwagens in Frage, da diese insbesondere von ihren geringen Verkaufspreisen profitieren.

8. Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse in Kapitel 7 zeigen, dass eine Veränderung der Auslegungskriterien des Energieversorgungsnetzes aufgrund der in Kapitel 2 dargelegten Trends auch eine Überarbeitung des bestehenden Aufbaus, vergleiche Abbildung 2.2, nahelegt. Weiterhin sind für Verbrennungs- und Elektrofahrzeuge deutliche Unterschiede in den Abhängigkeiten der KPIs von den variierten Parametern zu beobachten.

Kapitel 8.1 leitet zunächst aus den gezeigten Ergebnissen mögliche optimale Entwürfe ab und vergleicht sie mit der in Kapitel 1.1 aufgestellten These. Im Anschluss diskutiert Kapitel 8.2 den Einfluss verschiedener Randbedingungen auf die DSE. Der Lastgang kann sowohl über die Wahl der Verbraucher als auch über eine Veränderung der Umgebungsbedingungen beeinflusst werden. Das Pendler-Umgebungsmodell aus Kapitel 6.1 ermöglicht es, Veränderungen der KPIs unter variablen Umgebungsbedingungen aufzuzeigen. Außerdem wird der Einfluss der Fahrdynamik, der Kabelauslegung und der Sicherungselemente bewertet.

Der Einfluss einzelner Optimierungsgrößen der definierten KPIs auf die Auslegung des Energieversorgungsnetzes analysiert Kapitel 8.3. Zunächst wird dabei auf die Spannungsstabilität eingegangen, anschließend auf die Veränderungen bei der Verwendung des Energieverbrauchs des Fahrzeugs statt des Gewichts und schließlich auf den Einfluss der TCO im Vergleich zu den bisher optimierten Stückkosten. Dabei werden sowohl die verwendeten Materialkosten als auch die potentiellen Emissionsstrafen diskutiert. Bei allen Punkten werden mögliche Fehler durch die vereinfachte Betrachtung des Energieversorgungsnetzes in der DSE in die Analyse miteinbezogen.

Im Anschluss gibt Kapitel 8.4 ein Fazit und beantwortet die gestellten Forschungsfragen.

8.1. Abgeleitete mögliche optimale Entwürfe

Die modellbasierte, generische DSE ermöglicht das Auffinden optimaler Entwürfe allein unter Berücksichtigung zuvor definierter Freiheiten im Entwurf

hinsichtlich festgelegter KPIs zur Bewertung. Dabei werden die etablierten Optimierungsgrößen Stückkosten und Gewicht unter Berücksichtigung der Trends aus Kapitel 2 zu den KPIs Betriebskosten und Energieverbrauch erweitert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz einer Bustopologie mit mehreren verteilten Speichern statt der etablierten Sterntopologie mit einem Speicher insbesondere in Verbrennungsfahrzeugen nicht nur die Sicherheit durch einen nach Kapitel 3.3.6 fail-operational Entwurf mit mehreren unabhängigen Energiequellen erhöht, sondern aufgrund der höheren Effizienz des elektrischen Netzes zu einer trotz des höheren Gewichts deutlichen Reduktion des Energieverbrauchs führt. Dies senkt einerseits die Emissionsstrafen und führt andererseits zu geringeren spezifischen Energiekosten. Trotz höherer Stückkosten bleiben die TCO der Busentwürfe deshalb insgesamt unter dem Wert des besten Sternentwurfs, vergleiche Abbildung 7.12 (a). Dies bestätigt die in Kapitel 1.1 aufgestellte These, dass neue Architekturen nicht nur die Sicherheit erhöhen können, sondern sogar zusätzliche wirtschaftliche Vorteile für OEM und Fahrzeughalter bieten.

Im Gegensatz dazu sind bei den simulierten Elektrofahrzeugen beide Topologien mit einer kleinen Batterie mit nur 10 Ah Kapazität Pareto-optimal. Die geringere Standardabweichung der Sterntopologie geht mit einem höheren Verbrauch und TCO einher. Allerdings ist es aufgrund der heute nach Kapitel 2.4.2 mittels Plattformen und Baukastenkomponenten minimierten Entwicklungs- und Investitionskosten unwahrscheinlich, dass das Niedervoltnetz von Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen bei OEMs, die beide Antriebsvarianten anbieten, individuell entwickelt wird und sich folglich zukünftig grundlegend unterscheidet.

Setzt man zur mittels fail-operational sicheren Energieversorgung Entwürfe mit mehreren Energiespeichern im Verbrennungsfahrzeug voraus, kann minimal eine Bustopologie mit zwei 30 Ah-Batterien gewählt werden. Unter Berücksichtigung der diskutierten Einschränkung des Lösungsraums durch ein ähnliches Niedervoltnetz beider Antriebsarten wäre für das Elektrofahrzeug aus Kostensicht eine Bustopologie mit zwei 10 Ah-Batterien optimal.

Abbildung 8.1 setzt die berechneten Werte der KPIs dreier, aus den gefundenen Pareto-optimalen Alternativen gewählten, Busentwürfe mit zwei Batterien unterschiedlicher Kapazität ins Verhältnis zu den Ergebnissen des Default-Stern-Entwurfs. Der Entwurf mit minimaler Batteriekapazität, 30 Ah im Verbrennungsfahrzeug und 10 Ah im Elektrofahrzeug, ist hinsichtlich der TCO optimal. Im Verbrennungsfahrzeug wäre allerdings der Entwurf mit zwei 60 Ah Batterien der beste Kompromiss der drei KPIs, da sich hier neben den TCO und dem Verbrauch auch die Standardabweichung verbessert.

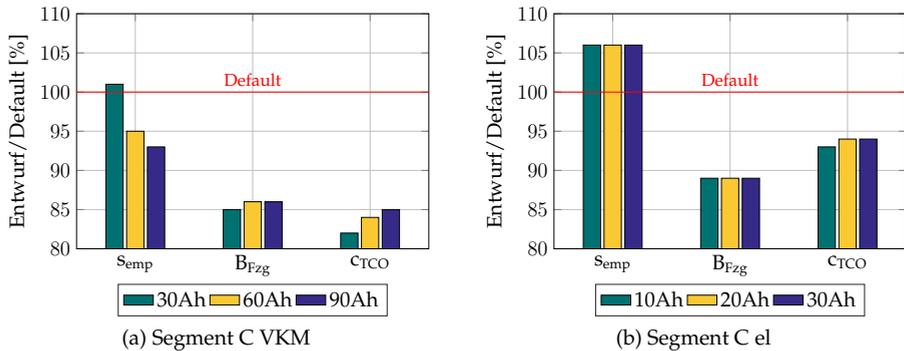


Abbildung 8.1.: Veränderung der KPIs dreier Busentwürfe mit zwei Batterien im Vergleich zum Default-Entwurf

8.2. Einfluss der gewählten Randbedingungen

8.2.1. Einfluss des generierten Lastgangs

Nach Kapitel 6.1.2 berücksichtigt die Simulation umgebungsbedingte Anschaltzeiten der Nebenverbraucher, nicht aber eine Veränderung der Lastströme während dieser Zeit oder einstellbare Leistungsstufen. Weiterhin werden nach Kapitel 6.1 aufgrund eines fehlenden genormten Streckenprofils für den WLTP weder vom Streckenverlauf abhängige Lasten, wie die elektrische Lenkung, zugeschaltet noch mögliche Fahrerpräferenzen berücksichtigt. Aus diesem Grund ist der Lastgang und damit der Energieverbrauch bei realen Fahrten voraussichtlich sowohl dynamischer als auch durch weitere zugeschaltete Lasten höher als die Werte aus Kapitel 7. Eine größere Last resultiert in höheren Verlusten, die die ermittelten Effizienzunterschiede erhöhen. Außerdem steigert ein höherer Verbrauch über die Betriebskosten die TCO. Dadurch steigt die Differenz zwischen den Punkten in Abbildung 7.12. Eine solche Verschiebung beeinflusst jedoch nur die absoluten Werte, nicht aber die Position und damit den Vergleich der Entwürfe selbst.

Dies gilt auch für die Standardabweichung, wie die Ergebnisse in Kapitel 7.5 nahelegen. Die umgebungsbedingte Simulation der drei Fahrzeugsegmente resultiert in Lastgängen unterschiedlicher Dynamik. Diese erhöhen zwar ebenfalls die Dynamik der Standardabweichung, beeinflussen jedoch nicht die Abhängigkeiten von den betrachteten Auslegungsparametern und folglich den Vergleich und damit die Auswahl der Entwürfe. Während sich die er-

forderliche Mindestkapazität oder Generatorleistung ändert, bleiben die zur Bewertung herangezogenen Unterschiede der Standardabweichung trotz den Vereinfachungen der Simulation erhalten.

8.2.2. Einfluss variabler Umgebungsbedingungen

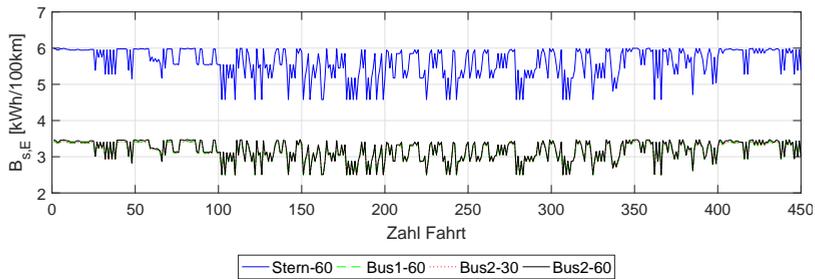
Der Einfluss der, von den Umgebungsbedingungen abhängigen, elektrischen Verbraucher auf die betrachteten KPIs und ihre Optimierungsgrößen kann mit Hilfe des in Kapitel 6.1 definierten Pendlerszenarios bestimmt werden. Abbildung 8.2 bildet die Auswirkungen der zugehörigen Variation des Lastganges innerhalb eines Jahres auf den Energieverbrauch ab. Auffällig ist die große Abhängigkeit des Verbrauchs des Elektrofahrzeugs in (b) vom Jahresverlauf. Grund für den hohen Verbrauch im Winter ist die elektrische Zusatzheizung. Das simulierte Verbrennungsfahrzeug in Abbildung 8.2 (a) zeigt keine solch auffällige Abhängigkeit zwischen dem Verbrauch und der Jahreszeit, da im Winter die Heizungssysteme den Verbrauch, ähnlich wie im Sommer die Klimaanlage, erhöht.

Der zuvor im Winterszenario gezeigte höhere elektrische Verbrauch der Sternentwürfe bleibt für beide Antriebsvarianten im Jahresverlauf erhalten. Dabei ändert sich die Differenz zwischen den beiden Topologien, da die, die Differenz erzeugenden, Übertragungsverluste ebenfalls mit der Last variieren. So beträgt der elektrische Verbrauch des Sternentwurfs zwischen 1 kWh und 6,2 kWh auf 100 km. Der Verbrauch des Busentwurfs ist mit 0,5 kWh bis 3,1 kWh deutlich geringer. Der Verlauf für Stern- und Busentwurf des Verbrennungsfahrzeugs variiert zwischen 4,6 kWh und 6 kWh beziehungsweise 2,5 kWh und 3,5 kWh auf 100 km.

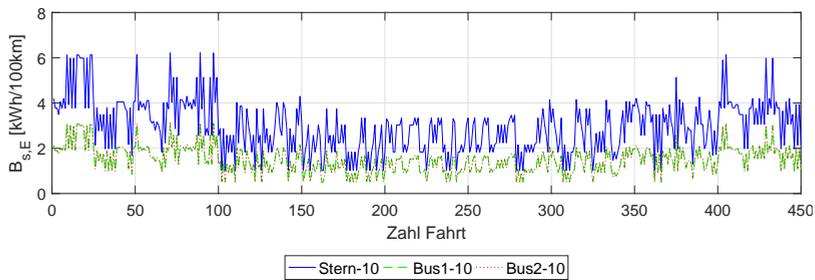
Die Spannweite der äquivalent angenommenen Emissionsstrafen des Elektrofahrzeugs in Abbildung 8.3 (b) zeigt, dass die Busentwürfe unter den angenommenen Umgebungsbedingungen, im Gegensatz zum Sternentwurf, die Grenzwerte ganzjährig einhalten. Im Verbrennungsfahrzeug in (a) liegen die Emissionsstrafen des Sternentwurfs ebenfalls unabhängig von den Umgebungsbedingungen ganzjährig deutlich über denen der drei Busentwürfe, vergleiche auch Abbildung F.2.

Die TCO in Abbildung 8.4 werden ebenfalls auf fünf Jahre berechnet, liegen aber aufgrund der insgesamt nur 52 183 km gefahrenen Strecke unter denen des Worst-Case-Szenarios in Kapitel 7.3. Die Spannweite der TCO beruht auf den Schwankungen des Energieverbrauchs im Jahresverlauf und ist für Entwürfe des Verbrennungsfahrzeugs in (a) im Vergleich zu den topologiebedingten deutlichen Unterschieden gering. Die TCO werden folglich nicht

signifikant durch variable Umgebungsbedingungen und die daraus resultierenden Lastschwankungen beeinflusst. Für das Elektrofahrzeug in (b) gilt das Gegenteil. Die Unterschiede der Topologien sind vergleichsweise gering, aber die Spannweite möglicher TCO im Jahresverlauf entsprechend der Variation des Energieverbrauchs groß. Die Unterschiede zwischen den TCO der Bustopologien zeigen den Einfluss der Materialkosten der Batterie.



(a) VKM



(b) el

Abbildung 8.2.: Segment C: Verlauf des elektrischen Verbrauchs der Pendelfahrten innerhalb eines Jahres

Die Standardabweichung in Abbildung 8.5 zeigt für beide Fahrzeuge eine große Spannweite. Dies überrascht nicht, da nach Kapitel 7.1 der Lastgang das Niveau der Standardabweichung prägt. Für das Elektrofahrzeug in (b) sind alle Entwürfe vergleichbar, wohingegen die Bustopologie mit zwei 60 Ah Batterien des Verbrennungsfahrzeugs in (a) den beschriebenen positiven Einfluss einer höheren Kapazität zeigt und etwas unter den Werten der drei anderen Entwürfe liegt.

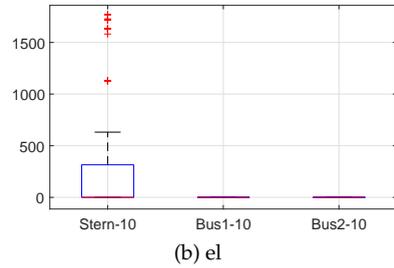
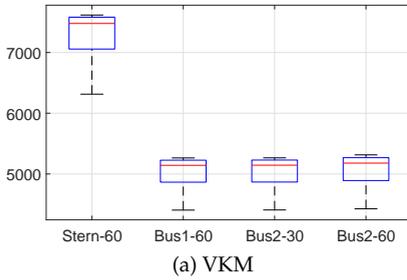


Abbildung 8.3.: Segment C: Spannweite der potentiellen Emissionsstrafen der Pendelfahrten eines Jahres

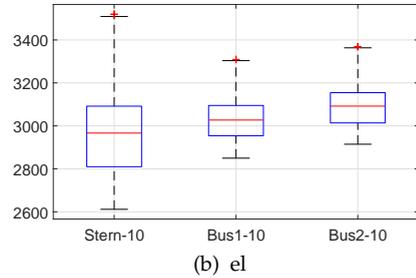
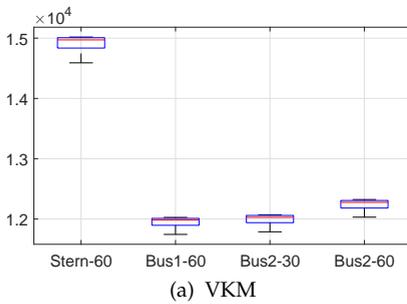


Abbildung 8.4.: Segment C: TCO Spannweite der Pendelfahrten eines Jahres

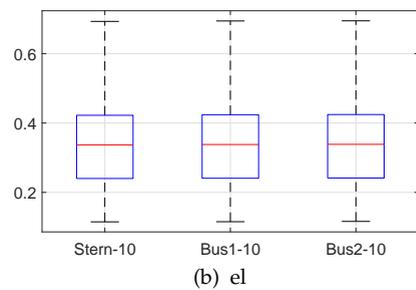
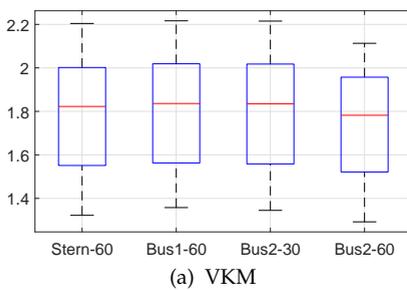


Abbildung 8.5.: Segment C: Spannweite Standardabweichung der Pendelfahrten eines Jahres

8.2.3. Einfluss Fahrzyklus

Abbildung 8.6 zeigt das Verhältnis der maximalen und minimalen Unterschiede des WLTP und NEFZ-Fahrzyklusses im Jahresverlauf des Pendlerszenarios für Busentwürfe mit zwei Batterien mit jeweils 10 Ah für das Elektrofahrzeug beziehungsweise 30 Ah für das Verbrennungsfahrzeug. Das Verhältnis der im Jahresverlauf maximalen und minimalen Differenz wird gewählt, um die Spannweite aufzuzeigen, zwischen denen sich die Werte abhängig von den Umgebungsbedingungen bewegen.

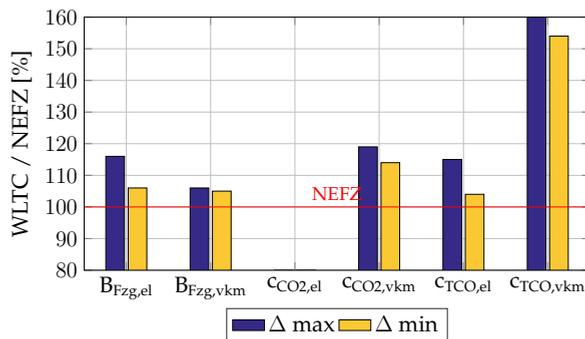


Abbildung 8.6.: Verhältnis des maximalen und minimalen Unterschieds des WLTP zum NEFZ für einen Busentwurf mit zwei Batterien

Der Wechsel vom NEFZ zum WLTP zur Ermittlung der Normverbräuche und -emissionen erhöht nach Abbildung 8.6 den Energieverbrauch und damit die ermittelten TCO beider Antriebsvarianten über die Betriebskosten. Weiterhin steigen die berechneten Emissionen und damit die Emissionsstrafen für das Verbrennungsfahrzeug im gezeigten Verhältnis in Abbildung 8.6 um bis zu 20%. Diese Werte liegen im Bereich der in [Tie+16] angegebenen Reduktion der Differenz zwischen Norm- und realem Verbrauch um bis zu 26% durch den Wechsel des Testzyklus, weshalb angenommen wird, dass die Simulation des Fahrverbrauchs hinreichend genau ist. Weiterhin zeigt die parallele Betrachtung beider Antriebsvarianten in Abbildung 8.6, dass der simulierte Verbrauchsunterschied für das Elektrofahrzeug zwar größer ausfällt als für das Verbrennungsfahrzeug, dessen Rückwirkung auf die TCO jedoch aufgrund der hohen Effizienz des Antriebsstranges und fehlenden Emissionsstrafen deutlich geringer ist.

8.2.4. Einfluss Kabelauslegung

Die Leitungsquerschnitte werden nach Kapitel 5.3.4 basierend auf der zulässigen Stromdichte, die sich aus der maximalen Übertragungsleistung berechnet, sowie dem erlaubten Spannungsabfall ermittelt. Tabelle 8.1 zeigt die sich abhängig von den Leitungslängen ergebenden Querschnitte für die Verbindung zwischen Quelle, Batterie und Leistungsverteiler sowie der Busschiene. Insbesondere bei hohen Strömen sind allerdings die zulässigen Dauerströme nach [Jai15] kleiner als $10 \frac{A}{mm^2}$. Werden die Querschnitte mit Hilfe der in Tabelle D.8 angegebenen maximal zulässigen Stromwerte aus [Jai15] berechnet, ergeben sich die deutlich höheren Kabelquerschnitte in Tabelle 8.2. Deshalb wird für diese Querschnitte der Einfluss der Kabelauslegung mithilfe eines reduzierten Parametersatzes der DSE bewertet, wobei alle Verbindungen, auch die zu den Lasten, anhand der Literaturangaben neu bestimmt werden.

Antrieb		VKM			E		
Segment		A	C	J	A	C	F
A_L Quelle	[mm ²]	16	16-20	25-35	16	16-20	25-35
A_L Batterie	[mm ²]	70	70-95	70-120	35	35-50	50-70
A_L Bus	[mm ²]	70	95	120	35	40	70

Tabelle 8.1.: Kabelquerschnitte basierend auf den Randbedingungen der DSE

Antrieb		VKM			E		
Segment		A	C	J	A	C	F
A_L Quelle	[mm ²]	40	40	95	40	40	95
A_L Batterie	[mm ²]	120	120	120	120	120	120
A_L Bus	[mm ²]	120	120	120	120	120	120

Tabelle 8.2.: Kabelquerschnitte basierend auf den Literaturwerten des maximal zulässigen Stroms

Der Vergleich der maximalen Unterschiede ausgewählter Optimierungskriterien der anhand der Literaturwerte generierten Entwürfe im Verhältnis zu den passenden Entwürfen der DSE des C-Segments in Abbildung 8.7 zeigt für beide Antriebsvarianten eine deutliche Verringerung der Standardabweichung. Grund hierfür ist der geringere Spannungsabfall auf den Übertragungsleitungen der Quellen, der in einer höheren Spannung am Leistungsverteiler resultiert. Hier zeigt sich der Nachteil der Einschränkung der Stan-

dardabweichung auf die Spannung am Leistungsverteiler, die nur die Spannungsabfälle an den Zuleitungen, nicht aber die der Leitungen und Absicherungen der Lasten bewertet. Diese können sich nach [Geh+09] deutlich von der Spannung am Leistungsverteiler unterscheiden.

Allerdings ist für eine sinnvolle Bewertung der Spannungen an den einzelnen Lasten die Simulation ihrer tatsächlichen Dynamik erforderlich. Weiterhin kann die Spannungsstabilität an den Lasten auch durch weitere, von den untersuchten Freiheiten unabhängige, Maßnahmen gezielt erhöht werden. Beispiele sind die Installation eines Kondensators parallel zu kritischen Lasten, wie [Koh+10] zeigt, oder eine automatisierte Lastabschaltung in kritischen Betriebspunkten [Ruf+13]. Deshalb wird die implementierte grundsätzliche Analyse der Spannungsstabilität über die Standardabweichung am Leistungsverteiler für die generische DSE als ausreichend erachtet.

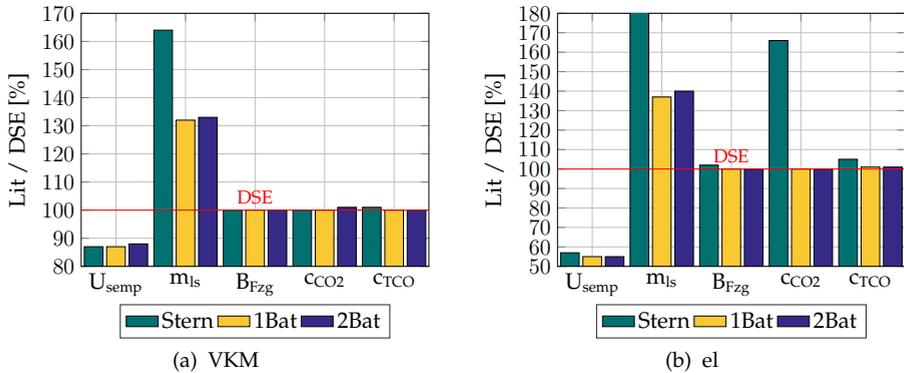


Abbildung 8.7.: Veränderung verschiedener Optimierungsgrößen bei größeren Zuleitungsquerschnitten der Energiequellen Segment C

Trotz des deutlich höheren Gewichts des Leitungssatzes aller untersuchten Entwürfe in Abbildung 8.7 bleibt ihr Energieverbrauch unter den gegebenen Umgebungsbedingungen des Worst-Case-Szenarios für die Busentwürfe konstant und nimmt für den Sternentwurf minimal zu. Der höhere Fahrverbrauch wird durch geringere elektrische Verluste kompensiert. Allerdings resultiert die leichte Verbrauchszunahme des Sternentwurfs des Elektrofahrzeugs in Abbildung 8.7 (b) in um zwei Gramm höheren CO_2 -Emissionen, die aufgrund des geringeren Proportionalitätsfaktors zur gewichtsbedingten Umrechnung der erlaubten Grenzwerte in Formel 3.2 nicht durch das höhe-

re Gewicht ausgeglichen werden können. Deshalb steigen die äquivalent berechneten Emissionsstrafen für den Sternentwurf des Elektrofahrzeugs deutlich. Die gestiegenen Materialkosten der Leitungen erhöhen außerdem die TCO des Sternentwurfs beider Fahrzeuge leicht.

Die Ergebnisse der restlichen Fahrzeuge in Abbildung F.4 sind vergleichbar, wobei die Gewichtszunahme der Fahrzeuge des Segments J und F durch die größere Fahrzeuglänge höher ausfällt. Allerdings sind auch hier der Energieverbrauch und die TCO nahezu identisch.

Der geringe Einfluss einer alternativen Leitungsauslegung auf die KPIs Energieverbrauch und TCO zeigt, dass die verwendete vereinfachte Bestimmung der Kabelquerschnitte für die durchgeführte Bestimmung der KPIs mittels DSE ausreichend ist. Die absoluten Werte der Standardabweichung verändern sich aufgrund der Bestimmung am Leistungsverteiler zwar deutlich, jedoch ohne die Ergebnisse des Vergleichs in Kapitel 7.1 zu beeinflussen.

8.2.5. Einfluss Sicherungskomponenten

Die Sicherungselemente werden nach Kapitel 5.3.4 abhängig von der Topologie fest vorgegeben, wobei nach Kapitel 6.1.6 die Schmelzsicherungen des Sternclusters anhand ihrer Widerstandswerte von den Halbleiterschaltern der Buscluster unterschieden werden, ohne Abschaltgeschwindigkeiten oder Alterungsverhalten zu berücksichtigen. Während der Widerstand der Halbleiterschalter $1\text{ m}\Omega$ beträgt, bewegt sich der Widerstand der Schmelzsicherungen zwischen $0,2\text{ m}\Omega$ und $55,6\text{ m}\Omega$, abhängig vom zulässigen Maximalstrom auf der zu sichernden Leitung.

Der Vergleich eines Sternentwurfs der DSE mit einem Entwurf mit Halbleiterschaltern statt Schmelzsicherungen in Abbildung 8.8 zeigt eine erhöhte Standardabweichung, da die simulierten Widerstandswerte der Schmelzsicherungen bei hohen Abschaltströmen unter denen der Halbleiter liegen. Das geringere Gewicht der Halbleiter reduziert das Leitungssatzgewicht, allerdings steigt aufgrund der höheren Widerstände der Energieverbrauch des Elektrofahrzeugs in (b) leicht. Dies würde bei analogen Strafen durch die gleichzeitige Reduktion des Gewichts zu einer signifikanten Zunahme der zu entrichtenden Strafen führen. Außerdem erhöhen die höheren Stückkosten der Halbleiter die TCO. Die gewählte Simulation der Sicherungselemente über die Widerstände bietet in Kombination mit der Bewertung der Spannung am Leistungsverteiler folglich leichte Vorteile für die Sternentwürfe.

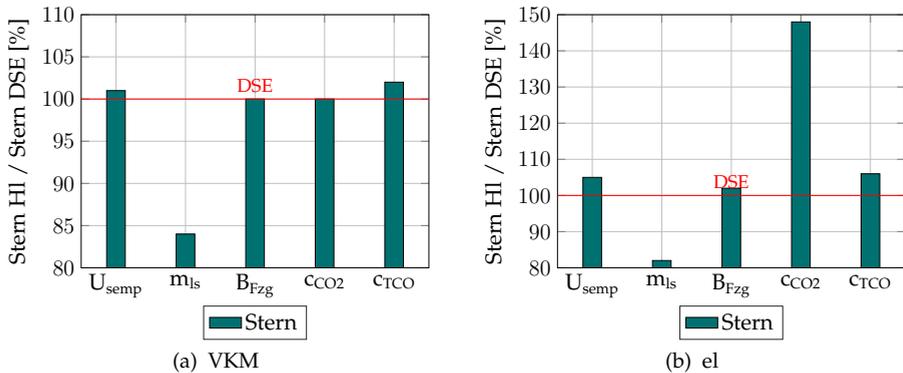


Abbildung 8.8.: Veränderung verschiedener Optimierungsgrößen bei der Verwendung von Halbleitern im Sterncluster Segment C

8.3. Einfluss einzelner Optimierungsgrößen

8.3.1. Einfluss der Spannungsstabilität

Die zur Analyse der Spannungsstabilität verwendete Standardabweichung am Leistungsverteiler berücksichtigt nur von der Topologie und Position der Speicher abhängige Unterschiede der Spannungsabfälle an den Zuleitungen, nicht aber die der Leitungen und Absicherungen der Lasten. Deshalb variiert die Standardabweichung mit der Position der Batterie des Sternclusters. Entwürfe mit kurzen Verlegewegen, sprich geringeren Materialkosten und Gewicht, weisen auch eine geringere Standardabweichung auf. Im Elektrofahrzeug werden deshalb sowohl die Wahl der Batterieposition als auch der Topologie über die Standardabweichung beeinflusst.

Im Verbrennungsfahrzeug prägt dagegen die maximale Leistung der Energiequelle und die gewählte Speicherkapazität die Standardabweichung. Grund hierfür ist die geschwindigkeitsabhängige Stromerzeugung, die den Verlauf der Spannung zusätzlich zum Lastgang prägt. Zur Einhaltung der vorgegebenen Spannungsgrenzen ist in der DSE eine Mindestkapazität von 60 Ah bis 70 Ah erforderlich. Diese liegt deutlich über der bereits stabilen 10 Ah-Batterie der Elektrofahrzeuge. Die durch größere Batteriekapazitäten reduzierte Standardabweichung der Verbrennungsfahrzeuge führt jedoch zu höheren Materialkosten, Gewicht, Verbrauch und TCO. Damit widersprechen sich die Kriterien gegenseitig und es muss abgewogen werden, welche Spannungs-

schwankungen zur Reduktion der Kosten und des Verbrauchs akzeptabel sind.

Da die Position der Leistungsverteiler nicht variiert wird, bleiben die Spannungsabfälle über den Leitungen der Verbraucher konstant, weshalb die Berücksichtigung der Spannung am Leistungsverteiler zur Untersuchung der Batterieparameter ausreicht. Allerdings sind die Versorgungskabel der Lasten beim Anschluss an den Busverteiler kürzer und der Widerstand der Halbleiterschalter ist gering. Deshalb stellt sich beim Vergleich zwischen den Stern- und Busentwürfen mit einer Batterie in Abbildung 7.1 die Frage, ob bei der Berücksichtigung der Standardabweichung an den Lasten nicht die Busentwürfe kleinere Werte als die Sternentwürfe aufweisen. Eine solche Erweiterung würde jedoch eine weitere Differenzierung im Umgang mit den Ergebnissen erfordern. Entweder könnten nur Pareto-optimale Entwürfe zugelassen werden oder die Standardabweichungen der einzelnen Lasten müssten über die Einteilung der Gruppen aus Tabelle 2.3 priorisiert werden. Weiterhin ermöglichen die Standardabweichungen an den verbauten Lasten nach Kapitel 8.2.4, unter Berücksichtigung der tatsächlichen Lastdynamik, die Evaluierung weiterer Maßnahmen zusätzlich zu den betrachteten Freiheiten im Entwurf. Dies ist bei einer späteren gezielten Auslegung und Optimierung unerlässlich, nicht jedoch für die grundsätzliche Analyse der DSE.

8.3.2. Einfluss des Energieverbrauchs

Die Erweiterung des Gewichts hin zur Verwendung des Gesamtverbrauchs als KPI in Kapitel 5.2.2 zeigt, dass der gewichtsbedingte Anstieg des Fahrverbrauchs der Entwürfe im Vergleich mit den Unterschieden im elektrischen Verbrauch gering ist. Da die Variation der Sicherungen in Kapitel 8.2.5 den Energieverbrauch nicht wesentlich beeinflusst, ist die große Differenz zwischen den Topologien ausschließlich auf die Leitungsverluste zurückzuführen. Folglich reduziert die Verteilung über die Busschiene, bei der alle Komponenten mit dem nächsten Verteilerknoten verbunden werden können, nicht nur die Leitungslängen, sondern auch die Verluste gegenüber einer zentralen Verteilung über den Sternpunkt deutlich, trotz der Einschränkung des maximal zulässigen Spannungsabfalls über den gewählten Querschnitt. Damit lässt sich der Gesamtverbrauch über die Wahl der Topologie entscheidend reduzieren, wobei der Einfluss des elektrischen Verbrauchs auf den Gesamtverbrauch im Verbrennungsfahrzeug aufgrund des schlechten Wirkungsgrads der Stromerzeugung größer ist als im Elektrofahrzeug.

Die berechnete Reduktion der Verbrennungsfahrzeuge liegt im erwarteten Bereich der Einführung einer 48 V-Spannungsebene, die nach [BKD15] den

elektrischen Verbrauch, bei gleichzeitig höherer Spannungsstabilität, um bis zu 21% senken soll. Hier stellt sich die Frage, ob diese Verbrauchsreduktion den erforderlichen Entwicklungsaufwand und höhere Materialkosten rechtfertigt, wobei nach [Chr09] schon eine Verbrauchssenkung um 0,3-0,7% die Integration eines zusätzlichen Kondensators im 12 V-Netz begründet.

Bereits Kapitel 7.5 weist darauf hin, dass die ermittelten Verbrauchswerte die Normwerte deutlich übersteigen. Grund hierfür ist einerseits die Berücksichtigung des WLTP statt des NEFZ, der den Normverbräuchen zugrunde liegt, wie Tabelle 8.3 anhand der C-Segment Busentwürfe aus Kapitel 8.2.3 darlegt. Allerdings liegt für das C-Segment Elektrofahrzeug bereits der ermittelte Fahrverbrauch ohne zusätzliche elektrische Lasten und unter der Berücksichtigung des NEFZ über dem angegebenen Normwert. Hier stellt sich die Frage, wie die angegebenen Normwerte ermittelt wurden, da für das Verbrennungsfahrzeug¹ selbst der Fahrverbrauch des WLTP noch unter dem Normverbrauch liegt.

Andererseits berücksichtigt die Simulation nicht nur Dauerverbraucher, die nicht abgeschaltet werden können. Allerdings liegt nach Kapitel 8.2.1 der simulierte Verbrauch voraussichtlich trotzdem unter den realen Werten, da dynamische Lasten nicht zugeschaltet werden. Außerdem wird aufgrund der Annahme einer neuen IKT-Plattform nur eine geringe Anzahl an Steuergeräten integriert. Die elektrische Last führt dazu, dass für das C-Segment Fahrzeug selbst der simulierte Verbrauch der deutlich effizienteren Bustopologie unter Berücksichtigung des NEFZ in Tabelle 8.3 im gesamten Jahresverlauf über den Normwerten liegt. Dabei fällt auf, dass die hinterlegten Abhängigkeiten der Lasten nach Tabelle 8.3 im WLTP zu einem geringeren elektrischen Verbrauch pro 100 km führen.

Antrieb	Fahrzyklus	VKM		E	
		NEFZ	WLTP	NEFZ	WLTP
B_N	$\left[\frac{kWh}{100km} \right]$	45,49	-	12,7	-
B_{sFzg}	$\left[\frac{kWh}{100km} \right]$	47,6-50,8	50,6-54	13,7-17,9	15,9-19
B_{sF}	$\left[\frac{kWh}{100km} \right]$	35	41,7	12,8	15,3
B_{sEl}	$\left[\frac{kWh}{100km} \right]$	3,5-4,4	2,5-3,4	0,8-4,4	0,5-3,1

Tabelle 8.3.: Vergleich zwischen den Verbrauchswerten eines Busentwurfs des C-Segments für NEFZ und WLTP im Jahresverlauf

¹Der Normverbrauch beträgt 5,31 auf 100 km. Der simulierte Verbrauch variiert für den NEFZ zwischen 5,551 und 5,921 und für den WLTP zwischen 5,91 und 6,291.

Interessant ist hierbei, dass die Verbrauchswerte des F-Segment Fahrzeugs in Tabelle 7.7 trotz des WLTP und der elektrischen Verbraucher für die Sternentwürfe nur leicht über und für die Busentwürfe sogar unter den Normwerten liegen und die Simulation in diesem Fall die Werte sehr gut nachbildet. Folglich kann nicht bewertet werden, inwieweit die simulierten Werte dem tatsächlichen Verbrauch entsprechen und ob dieser realitätsnah abgebildet wird.

8.3.3. Einfluss der Betriebskosten

Die hohe Differenz zwischen dem Energieverbrauch der Bus- und Sternentwürfe führt dazu, dass bei der Berücksichtigung der TCO Busentwürfe bevorzugt werden, trotz der höheren Materialkosten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Kostenaufwände der Energieträger bei hoher Fahrleistung deutlich über den heute optimierten Stückkosten liegen. Sie bilden damit die entscheidenden Kostenanteile der TCO. Allerdings sind auch die Stückkosten der Verbrennungsfahrzeuge über die Emissionsstrafen, welche zu den Entwicklungskosten zählen, vom Energieverbrauch des Fahrzeugs abhängig. Die hohe Differenz der TCO² der Verbrennungs- und Elektrofahrzeuge, abhängig vom Segment zwischen 16 000 € bis 35 000 €, ist auf den höheren Energieverbrauch sowie die Steuern und Emissionsstrafen unter den vorgestellten Randbedingungen zurückzuführen. Diese Differenzen sind teilweise größer als die Preisunterschiede der Grundmodelle der für die Simulation verwendeten Fahrzeugmodelle aus Kapitel D.1. Folglich lägen sogar die gesamten TCO der Elektrofahrzeuge, nicht nur die auf das Energieversorgungsnetz bezogenen, unter denen der Verbrennungsfahrzeuge. Damit würde sich unter den gegebenen Randbedingungen der Simulation der Einsatz der Elektro- statt der Verbrennungsfahrzeuge, beispielsweise innerhalb einer Car-Sharing-Flotte, wirtschaftlich rechnen.

Einfluss der angenommenen Materialkosten

Bei der späteren Auslegung sind für die Leitungen weitere Randbedingungen, wie Temperaturen im Bauraum, Isolation und ähnliches, zu berücksichtigen, die andere Kabeltypen als den verwendeten aus Tabelle D.8 erfordern und damit die Stückkosten der Entwürfe verändern könnten. Für die Analyse grundsätzlicher Vor- und Nachteile verschiedener Energiebordnetzentwürfe

²Auf das Energieversorgungsnetz bezogen also inklusive der Materialkosten des Versorgungsnetzes aber exklusive des Kaufpreises des gesamten Fahrzeugs

wird ein Kabeltyp allerdings als hinreichend genau angesehen, da die spezifischen Bauraumanforderungen alle Entwürfe betreffen würden.

Die Aufteilung der Materialkosten ausgewählter Entwürfe der DSE in Abbildung 8.9 auf Leitungen, Sicherungselemente und Batteriezellen zeigt, dass die große Kostendifferenz der beiden Topologien den Kosten der Halbleitersicherungen geschuldet ist. Langfristig ist es denkbar, dass ein steigender Einsatz von Halbleiterschaltern deren Kosten senkt und folglich die Differenz zwischen den Stern- und Busentwürfen kleiner wird. Für Li-Ionen-Speicher erwartet [Fin16] bis 2020 eine weitere Senkung des Preises auf bis zu 150 € pro kWh. Dies lässt die Wirtschaftlichkeit der Busentwürfe mit mehreren Batterien weiter steigen.

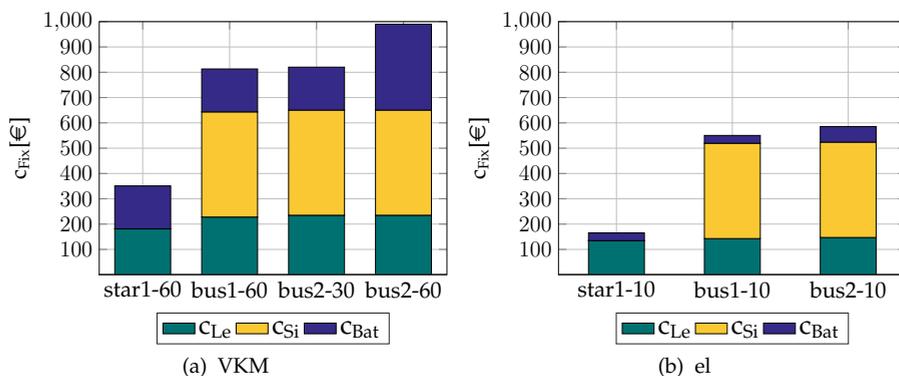


Abbildung 8.9.: Zusammensetzung der Stückkosten Segment C

Einfluss der berechneten Emissionsstrafen

Die hohen Werte der ermittelten Emissionsstrafsätze des Verbrennungsfahrzeugs in Kapitel 7.3 sind drei Gründen geschuldet:

1. Verringerung des Grenzwerts von $130 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$ im Jahr 2016 auf $95 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$
2. Ermittlung der Verbrauchswerte mit dem WLTP führt nach Kapitel 8.2.3 verglichen mit dem NEFZ zu 15% bis 20% höheren Strafen
3. Berücksichtigung des elektrischen Verbrauchs umgebungsbedingt zugeschalteter Verbraucher zusätzlich zu den Dauerverbrauchern

Damit werden die in Kapitel D.6 angesprochenen hohen Differenzen zwischen den Normangaben und dem tatsächlichen Verbrauch gezielt vermieden, um mit möglichst realistischen Werten das hohe Potenzial des zukünftigen Einflusses der Emissionsstrafen auf die Fahrzeugentwicklung aufzuzeigen. So liegen, entsprechend des Energieverbrauchs in Kapitel 8.3.2 im C-Segment, die im Jahresverlauf ermittelten Emissionen mit 155 bis 170 $\frac{gCO_2}{km}$ um 26% bis 38% über den heute angegebenen Normemissionen von 123 $\frac{gCO_2}{km}$. Diese Werte entsprechen der in [Tie+16] beschriebenen Diskrepanz zwischen realem Verbrauch und Normwerten und zeigen den potenziell großen Einfluss der Nebenverbraucher auf die Messwerte. Für Stickoxide werden deshalb bereits sogenannte „Real Drive Emission“ Tests zur Überprüfung der gemessenen Laborwerte im realen Straßenverkehr durchgeführt, bei denen Nebenverbraucher, Umgebungsbedingungen und der Verkehr in die Messung mit eingehen [SB16]. Hier stellt sich die Frage, ob solche zusätzlichen Messungen zukünftig auch zur Überprüfung der CO₂-Emissionen eingesetzt werden und wenn ja, welche Grenzwerte dabei gelten.

Eine minimale Abschätzung der Emissionen kann mit Hilfe des reinen Fahrverbrauchs erfolgen. Fehlt der elektrische Verbrauch bei der Ermittlung der Emissionen, schwindet die Differenz zwischen den Topologien. Die Emissionen des C-Segment Fahrzeugs im WLTP betragen für alle Entwürfe etwa 113 $\frac{gCO_2}{km}$. Die Emissionsstrafen würden sich von den gezeigten 5267€ bis 7623€ in Abbildung 7.7 auf minimal 2157€ pro Fahrzeug reduzieren und lägen damit weiterhin deutlich über den geschätzten Materialkosten. Damit führen die Emissionsstrafen mit Kosten von mehreren tausend Euro pro Fahrzeug zukünftig bei unveränderter Gesetzeslage zu einer signifikanten Erhöhung der Stückkosten von Verbrennungsfahrzeugen. Dabei generiert die Berücksichtigung elektrischer Lasten bei der Messung Vorteile zugunsten der effizienteren Busentwürfe. Die TCO verringern sich analog um den entsprechenden Betrag. Dies reduziert zwar den Unterschied zwischen den beiden Topologien sowie den Antriebsarten, aber da der auf dem deutlich geringeren Verbrauch beruhende Unterschied der Energiekosten bestehen bleibt, sind die TCO der Busentwürfe weiterhin geringer als die der Sternentwürfe. Die DSE hat weiterhin gezeigt, dass nach Kapitel 7.4.1 eine über das Gewicht des Energieversorgungsnetzes erreichte Verbrauchsreduktion aufgrund der gewichtsabhängigen Berechnung der zulässigen Grenzwerte sogar zu höheren Strafzahlungen führen kann. Diese Strafzahlungen stehen aktuell keinen, oder zukünftig bei der Anwendung derselben Emissionsregeln nur geringen Strafen im Elektrofahrzeug gegenüber. Der heute vorherrschende starke Preisunterschied zwischen beiden Antriebstypen könnte, wie zu Beginn des Kapitels angesprochen, dadurch dezimiert oder umgekehrt werden.

Beispiel Flottenverbrauch

Heute werden die Emissionsstrafen nicht, wie angegeben, für jedes Fahrzeug einzeln angesetzt, sondern, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, ein Flottengrenzwert abhängig von den Absatzzahlen des OEMs berechnet. Im Jahr 2020 werden die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen nach [Eur14] auf Basis von 95% der verkauften Pkw bestimmt, wobei jeder Pkw mit spezifischen CO₂-Emissionen von weniger als $50 \frac{gCO_2}{km}$ als zwei Pkw zählt. Weiterhin werden die Emissionen der Elektrofahrzeuge heute mit $0 \frac{gCO_2}{km}$ angesetzt. Legt man die fiktive Fahrzeugflotte aus den sechs in dieser Arbeit betrachteten Fahrzeugen mit den Absatzzahlen aus Tabelle 8.4 für Europa zugrunde, ergibt sich daraus nach Kapitel 3.3.2 ein erlaubter Flottengrenzwert von $107,1 \frac{gCO_2}{km}$.

Antrieb	VKM			E		
Segment	A	C	J	A	C	F
Absatz	50000	300000	316000	20000	40000	30000

Tabelle 8.4.: Angenommene Absatzzahlen der sechs Fahrzeugmodelle

Unter Berücksichtigung des minimalen Fahrverbrauchs der DSE ergäben sich mit diesen Annahmen eine Flottenemission von $123,9 \frac{gCO_2}{km}$ und damit Strafzahlungen von mindestens 1,2 Milliarden Euro für das Jahr 2020. Dies entspricht einem Fünftel der Entwicklungskosten des Volkswagen Konzerns im Jahr 2016 [Vol17]. Dies zeigt den zukünftig hohen Einfluss der Emissionsstrafen auf die Entwicklung.

Verwendet man stattdessen die Ergebnisse des Energieverbrauchs der DSE zur Berechnung, ergeben sich für die Default-Sternentwürfe Emissionen von $175,7 \frac{gCO_2}{km}$, die in Strafen von 4,8 Milliarden Euro resultieren, beziehungsweise $152,8 \frac{gCO_2}{km}$ für die Busentwürfe mit zwei 60 Ah Batterien und Strafen von 3,2 Milliarden Euro. Dies zeigt, dass abhängig davon wie viele elektrische Verbraucher bei der Messung berücksichtigt werden, ein Energieversorgungsnetz mit hoher Effizienz zu einer deutlichen Verringerung der zu entrichtenden Strafen führen kann.

8.4. Fazit

Der Energieverbrauch des Gesamtfahrzeugs und die davon abhängigen TCO sind zentrale Auslegungskriterien zukünftiger Energiebordnetze. Die Optimierung des Energieverbrauchs erlaubt, neben dem vom Gewicht bestimmten Fahrwiderstand, auch den elektrischen Verbrauch bei der Auslegung zu berücksichtigen. Es zeigt sich, dass im Vergleich zum elektrischen Verbrauch der Einfluss des Gewichts des Energieversorgungsnetzes auf den Gesamtverbrauch gering ist. Die Umgestaltung des Energieversorgungsnetzes von einer Sterntopologie hin zu einer effizienteren Bustopologie verspricht deshalb deutliche Einsparungen, wobei das zusätzliche Gewicht bei der Integration von mehr als einem Speicher den Verbrauch nur geringfügig erhöht.

Die abgeschätzten Stückkosten der Busentwürfe sind durch die hohen Halbleiterkosten deutlich höher als die der Sternentwürfe, wobei es möglich ist, dass sich der Unterschied langfristig durch Skaleneffekte reduziert. Weiterhin könnte diese Differenz, abhängig von der Zahl aktiver elektrischer Verbraucher bei der Ermittlung der Emissionswerte, bereits durch den Unterschied der Emissionsstrafen ausgeglichen werden. Spätestens die Berücksichtigung der Energiekosten des Betriebs führt im Verbrennungsfahrzeug dazu, dass die Busentwürfe wirtschaftlich den Sternentwürfen vorzuziehen sind, da bereits bei der geringen Laufleistung von 52 183 km im Pendlerszenario die Differenz der TCO über der der Stückkosten liegt. Folglich begünstigt eine Veränderung der Optimierungskriterien eine Veränderung des Energieversorgungsnetzes.

Im Elektrofahrzeug ist dies bei den angenommenen Kosten nur für höhere Laufleistungen oder einen durchweg hohen elektrischen Verbrauch des Niederspannungsnetzes der Fall. Die heute verbreiteten Baukastenansätze in der Entwicklung lassen es allerdings unwahrscheinlich erscheinen, dass sich das Niederspannungsnetz bei OEMs, die beide Antriebsvarianten herstellen, in seinen Grundzügen unterscheidet. Deshalb wird angenommen, dass sich das Energieversorgungssystem trotz der geringeren Vorteile der Busentwürfe analog zum Verbrennungsfahrzeug verändert.

Die Spannungsstabilität als Randbedingung legt die erforderliche Mindestkapazität der integrierten Speicher bei gegebener Energiequelle fest. Weiterhin werden bei Sterntopologien Entwürfe mit kurzen Versorgungsleitungen bevorzugt. Mit der hinterlegten Dynamik des Lastgangs konnte allerdings, ausgenommen von der höheren Kapazität, kein Vorteil in der Verteilung auf mehrere Speicher detektiert werden. Deshalb wird ein Energieversorgungsnetz mit Bustopologie und zur sicheren, fail-operational Energieversorgung zwei an der Busschiene verteilten Energiespeichern mit Kapazitäten über der Mindestkapazität als optimal angesehen. Die Ergänzung um weitere Spei-

cher, zum Beispiel Kondensatoren parallel zu dynamischen Hochleistungsverbrauchern mit kurzen Lastspitzen, erfordert die Einbeziehung präziser Lastmodelle zur Abbildung des Lastgangs.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass mit Hilfe der realisierten DSE nachvollziehbare und realistische Werte zur Bewertung des Energieversorgungsnetzes generiert werden können. Die gewählten KPIs verbessern sich durch eine Umgestaltung des Energieversorgungsnetzes hin zu einer Bustopologie mit zwei Speichern signifikant, während sich die heute üblichen Optimierungskriterien Stückkosten und Gewicht verschlechtern. Die dargelegte generische DSE auf Basis festgelegter Freiheiten zeigt weiterhin die Vorteile einer solchen modellbasierten Analyse auf. Einerseits können die zu untersuchenden Freiheiten und damit der Entwurfsraum individuell angepasst werden. Andererseits erlaubt die flexible Anpassung der Simulationsumgebung veränderte Randbedingungen und Freiheiten einfach zu evaluieren und beispielsweise gleichzeitig mehrere Fahrzeuge und verschiedene Antriebskonzepte in die Untersuchung mit einzubeziehen, um nicht nur das Optimum für ein Fahrzeug, sondern zum Beispiel für eine ganze Plattform zu finden.

9. Zusammenfassung und Ausblick

9.1. Zusammenfassung

Diese Arbeit bewertet anhand einer modellbasierten Design Space Exploration ausgewählte Entwürfe des Energieversorgungsnetzes zukünftiger IKT-Plattformen hinsichtlich der Bewertungskriterien TCO und Energieverbrauch unter Berücksichtigung der Spannungsstabilität. Dabei bestätigt sich die aufgestellte These. Eine Umgestaltung der etablierten Stern- hin zu einer Bustopologie mit zwei Batterien erhöht nicht nur über eine fail-operational Auslegung mittels zweier unabhängiger Energiequellen die Versorgungssicherheit, sondern senkt den Energieverbrauch und damit die Betriebskosten deutlich, trotz eines größeren Gewichts und höherer Stückkosten. Sie ist folglich die TCO betrachtet wirtschaftlich sinnvoll.

Das im Zuge dieser Arbeit geführte Experteninterview zeigt auf, dass die fortschreitende Elektrifizierung und Digitalisierung aufgrund des ansteigenden elektrischen Verbrauchs mit steigender Dynamik, der wachsenden Vernetzung neuer Funktionen und damit rasant zunehmenden Datenmenge eine Umgestaltung zukünftiger E/E-Architekturen nahelegt. Sicherheitskritische elektrische Komponenten und Funktionen erfordern eine sichere fail-operational Versorgung mit Daten und Energie. Trends wie die Vernetzung nach außen (V2X), elektrisches und hochautomatisiertes Fahren sowie die flexible Erweiterung der Funktionalität über Apps verstärken diese Entwicklung.

Eine erweiterbare IKT kann über die Trennung von Hardware und Software mit Hilfe einer Laufzeitumgebung realisiert werden. In einer solchen serviceorientierten Plattform basiert der Entwurf des physikalischen Netzes nicht länger auf den Funktionen, da diese zur Zeit der Entwicklung nicht vollständig definiert sein müssen. Die Systementwicklung kann das logische Netzwerk nicht länger direkt abbilden, sondern erfüllt vielmehr dessen Anforderungen, wie erforderliche Rechenleistung oder Energiebedarf. Deren Gestaltung jedoch, wie die Anzahl an Steuergeräten, welche die Rechenleistung bereitstellen, ist frei wählbar.

Eine solche systemweite Trennung von Funktion und Hardware vorausgesetzt, wird ein ausgewählter Satz verschiedener Entwürfe des Energieversorgungsnetzes untersucht. Die Randbedingung der Auslegung bildet hierbei der dynamische Lastgang der Verbraucher, wobei aufgrund der neuen IKT-Plattform einerseits eine deutlich reduzierte Anzahl an Steuergeräten und andererseits eine direkte Versorgung aller Lasten angenommen wird. Die Freiheiten Topologie sowie Kapazität, Anzahl und Position der verbauten Speicher werden variiert und das daraus abgeleitete Energieversorgungsnetz modellbasiert untersucht.

Die Modellierung in Simscape erlaubt neben der Simulation des elektrischen Netzes basierend auf den Strömen und Potenzialen jeder Komponente auch die, mit Hilfe einer überlagerten Matlabsteuerung, generische Erzeugung der betrachteten Entwürfe basierend auf den gewählten Freiheiten im Entwurf. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung der zu untersuchenden Freiheiten und Randbedingung bei der Evaluierung. Die physikalische Mehrdomänenbeschreibung gestattet dabei neben dem elektrischen auch das thermische Verhalten der Batterien zu simulieren. Die restlichen Komponenten, Leitungen, Sicherungen und Lasten, werden mit Hilfe von ohmschen Widerständen unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur simuliert. Die zur Simulation des dynamischen Lastgangs generierten Umgebungsszenarien beinhalten sowohl Umgebungsdaten, Wetter, Temperatur oder Lichtverhältnisse, als auch Nutzerdaten über einen genormten Fahrzyklus. Dadurch erlaubt das Modell gleichzeitig statische und dynamische Optimierungsgrößen des sich ergebenden multikriteriellen Optimierungsproblems zu betrachten.

Zunächst erfordert die Integration sicherheitskritischer, elektrischer Verbraucher und Funktionen ein stabiles Versorgungsnetz, weshalb die Spannungsstabilität als zu erfüllende Randbedingung vorausgesetzt wird. Dabei wird nicht nur die Einhaltung der Grenzwerte überprüft, sondern die Dynamik des Spannungsverlaufs verschiedener Entwürfe über die Standardabweichung am Leistungsverteiler verglichen. Während im Elektrofahrzeug eine Batteriekapazität von 10 Ah bereits zu einer stabilen Spannung führt, ist in den betrachteten Verbrennungsfahrzeugen aufgrund des von der Geschwindigkeit bestimmten Versorgungsstroms des Generators, abhängig von den integrierten Lasten, eine Mindestkapazität von 60 Ah bis 70 Ah erforderlich, um während der Simulation nicht die Grenzwerte zu unterschreiten. Weiterhin wird zur stabilen fail-operational Versorgung die Integration zweier unabhängiger Speicher vorausgesetzt. Dies schränkt den Lösungsraum weiter ein.

Ferner wird erwartet, dass vollautomatisierte Fahrzeuge als ideale Roboter-Taxis in Zukunft den wachsenden Car-Sharing-Trend in Städten weiter erhöhen. Während heute die Stückkosten das primäre Optimierungskriterium des Energieversorgungsnetzes darstellen, ist für solche Fahrzeuge stattdessen

eine Total-Cost-of-Ownership Optimierung erforderlich, da diese den Preis pro Kilometer Fahrleistung festlegt. Hierfür müssen zusätzlich zum Verkaufspreis die Energiekosten im Betrieb berücksichtigt werden, wobei deren Verhältnis sich bei einer hohen Fahrzeugauslastung zugunsten der Energiekosten verschiebt. Außerdem führen sinkende Emissionsgrenzwerte bei gleichzeitigem Wechsel hin zu einem dynamischeren Testzyklus, dem WLTP, dazu, dass die Erfüllung der Emissionsziele zunehmend kritisch wird. Selbst Elektrofahrzeuge würden, den aktuellen deutschen Strommix vorausgesetzt, die ab 2020 geltenden Emissionsziele nicht zwingend erfüllen.

Mögliche Emissionsstrafen können eine signifikante Erhöhung der Stückkosten pro Fahrzeug zur Folge haben. Deshalb steigt der Druck, die Verluste und das Gewicht des Energieversorgungsnetzes zu senken, um die Emissionsgrenzen einhalten zu können. Da diese zwei Kriterien sich in der Auslegung des Leitungssatzes widersprechen, wird stattdessen der Verbrauch des Fahrzeuges insgesamt als drittes Bewertungskriterium herangezogen.

Damit zeigt diese Arbeit das Potenzial einer parallelen Veränderung beider Aspekte der E/E-Architektur, der IKT und Energieversorgung, auf und ermittelt, wie dadurch entstehende Freiheiten in der Auslegung des Energieversorgungsnetzes zukünftig wichtige KPIs beeinflussen und deren Erfüllung begünstigen können.

Es lässt sich feststellen, dass zwar die Herstellungskosten einer Bustopologie deutlich über denen einer Sterntopologie liegen, allerdings sind die Einsparungen durch einen halbierten elektrischen Verbrauch und die dadurch geringeren TCO pro Fahrzeug größer. Insbesondere bei den simulierten Verbrennungsfahrzeugen zeigt sich, dass aufgrund der hohen Verluste bei der Stromerzeugung der Einfluss der elektrischen Last auf den Verbrauch größer ist, als eine über das Gewicht erzielte Verringerung des Fahrwiderstands. Hinzu kommt, dass eine Gewichtsreduktion durch die gewichtsabhängige Ermittlung der zulässigen Grenzen sogar zu höheren Emissionsstrafen führen kann. Abhängig davon, wie viele elektrische Lasten bei der Ermittlung der Normemissionen zugeschaltet sind, ergeben sich für eine Bustopologie ähnliche oder geringere Strafen als für die bestehende Sterntopologie. Die Differenz der Strafen beträgt in der DSE unter Berücksichtigung des elektrischen Verbrauchs bis zu 2500 € pro Fahrzeug. Damit können höhere Herstellungskosten und der zusätzliche Entwicklungsaufwand ausgeglichen werden.

Zusammenfassend legt die generische DSE dar, dass die Umgestaltung des Energieversorgungsnetzes von einer Stern- hin zu einer Bustopologie unter Berücksichtigung der TCO einen auf dem geringeren Verbrauch basierenden wirtschaftlichen Vorteil bietet und die Spannungsstabilität und Versorgungssicherheit über die Integration eines zweiten Speichers verbessert wird.

9.2. Ausblick

Diese Arbeit zeigt das Potenzial einer Umgestaltung des Energieversorgungssystems parallel zur IKT-Architektur hinsichtlich zukünftiger Bewertungskriterien auf. Ansatzmöglichkeiten für Folgearbeiten sind die Erweiterung der DSE um weitere Freiheiten in der Auslegung und die Präzision des Modells zur Generierung der Entwürfe des Energieversorgungsnetzes.

9.2.1. Mögliche Erweiterung

Ein Ansatz zur Erweiterung der hier vorgestellten generischen Modellierung ist die Ergänzung um eine Ringtopologie statt des betrachteten Busses. Während bei einem Fehler auf der Busschiene die sichere Versorgung davon abhängt, wo die Energiequellen positioniert sind, kann bei einem Ring der Fehler isoliert abgeschaltet werden. Man erhält eine Busschiene und die Quellen versorgen weiterhin die restlichen Lasten [Gra+16].

Weiterhin kann die Betrachtung dezentraler Quellen um weitere Speicher und die Kombination variabler Kapazitäten ergänzt werden. Hochdynamische Lasten mit kurzen, hohen Lastspitzen könnten über parallele Kondensatoren, die über einen zentralen Speicher nachgeladen werden, dezentral bedarfsgerecht versorgt werden [LE14]. Die genaue Simulation des dynamischen Verhaltens erlaubt eine präzise Anpassung der dafür benötigten Leitungsquerschnitte, um Überdimensionierung zu reduzieren.

Die systemweite Garantie der Spannungsstabilität erfordert weiterhin die Einbeziehung der Spannungsverläufe an den Lasten selbst, um feststellen zu können, ob beispielsweise solche Speicher parallel zu Hochleistungsverbrauchern erforderlich sind.

Eine weitere Ergänzung des Modells ist die Einbeziehung eines 48 V-Systems zusätzlich zum 14,3 V-System zur Untersuchung möglicher Aufteilungen zwischen den beiden Spannungsebenen.

Schließlich beruht diese Arbeit auf der angenommenen Änderung der IKT und den dadurch entstehenden neuen Freiheiten in der Systementwicklung auch des Energieversorgungsnetzes. Hier könnte eine Einbeziehung der IKT in die Betrachtung weitere Optimierungsmöglichkeiten eröffnen, insbesondere hinsichtlich der zukünftig erwarteten fail-operational Auslegung wie beispielsweise eine Absicherung mittels Power over Ethernet statt der zusätzlichen Verlegung von Versorgungskabeln zur Erreichung von Redundanz.

Die KPIs müssten in diesem Fall um ein Kriterium zur Bewertung der fail-operational Gestaltung erweitert werden. Weiterhin kann statt der isolierten Betrachtung der Spannungsstabilität nach [DS16] über die gewichtete Summe

mehrerer normierter Optimierungsgrößen eine Architekturkennzahl zur Bewertung der Robustheit generiert werden. Sind genaue Routingwege oder die einsetzbaren Sicherungselemente mit und ohne Fehlererkennung bekannt, berechnet [DS16] diese Kennzahl aus den Optimierungsgrößen Fehlererkennung, Verfügbarkeit von Funktionen, Anzahl in kritischen Bauräumen befindlicher Komponenten, Spannungsstabilität, ungewollter Standstrom und Wartungsaufwand.

9.2.2. Mögliche Verfeinerung

Ein Ansatz zur Verfeinerung der hier vorgestellten generischen Modellierung ist die Ergänzung um genaue Komponentenmodelle der Lasten und Sicherungselemente. Statt der verwendeten temperaturabhängigen Widerstände würden dynamische Lastmodelle den erwarteten Lastgang exakt nachbilden. Dies erlaubt eine präzise Abschätzung des Energieverbrauchs und der TCO sowie eine Garantie der Spannungsstabilität. Weiterhin kann mit der Simulation des Zeit- und Alterungsverhaltens der Sicherungselemente die Leitungsauslegung präzisiert werden, um Überdimensionierung zu vermeiden und die Unterschiede in der Auslegung bei abweichender Sicherung genauer zu untersuchen.

Während in dieser Arbeit eine vereinfachte Struktur des Energiebordnetzes über einen Graphen zur Abschätzung der Leitungslänge zugrunde gelegt wurde, könnten zukünftig die tatsächlichen Routingwege und Positionierung von Verteilern und Komponenten miteinbezogen werden.

Die Einbeziehung variabler Umgebungsszenarien in die Entwicklung könnte dabei die Grundlage zukünftiger präziser Analysen des Systemverhaltens bilden, um einerseits die Sicherheit zu garantieren und andererseits Überdimensionierung zu reduzieren.

Anhang

A. Glossar

Automotive Function

Eine Automotive Function steht für eine kundenerlebbare Funktion. Ein Beispiel wäre Lenken. Eine Automotive Function besteht folglich aus allen zur Darstellung der Funktion benötigten Hard- und Softwarekomponenten, Sensoren, Aktoren, Steuergeräten und Applikationen.

Autonomes oder vollautomatisiertes Fahren

Diese Arbeit orientiert sich an den in [SAE16] definierten Begrifflichkeiten zur Beschreibung des Automatisierungsgrads eines Fahrzeugs. Die Ebenen null, keine Automatisierung, bis zwei, teilweise Automatisierung, erfordert vom Fahrer die Überwachung der Umgebung und Kontrolle über das System. In Ebene drei (bedingt automatisiert) und vier (hochautomatisiert) übernimmt das Fahrzeug in definierten Fahrmodi die Fahraufgabe, wobei in Ebene vier der Fahrer als Rückfallebene entfällt. Im vollautomatisierten Fahren auf Ebene 5 entfällt der Fahrer vollständig.

Backbone

Aus dem Englischen für Rückgrad abgeleitete Bezeichnung für ein System von Leitungen zur Energie- oder Datenübertragung, das den Großteil der Energie oder Daten überträgt.

Customer Specific System Platform

Fahrzeugspezifische Ableitung der Core-Plattform. Sie beinhaltet nur die für die Anforderungen eines speziellen Fahrzeugtyps und -konfiguration benötigten Elemente der Core-Plattform. Damit bindet sie einen Teil der Variabilität der Core-Plattform sowohl in Soft- als auch in Hardware.

Echtzeitfähigkeit

Ein Echtzeitsystem garantiert, dass eine vorgegebene Latenzzeit eingehalten wird. Bei harten Echtzeitanforderungen führt die Überschreitung der erlaubten Zeitschranke zu schwerwiegenden Ausfällen [ST12].

Eingebettetes System

Ein eingebettetes (embedded) System bezeichnet eine Kombination aus Hard- und Softwarekomponenten, das mit Hilfe von Sensoren seine Umgebung erfasst und diese über Aktoren regelt, steuert oder überwacht [Bak+10]. Es übernimmt, für den Anwender zumeist unsichtbar, genau definierte Mess-, Steuer-, Regelungs- oder Überwachungsaufgaben in einem elektrischen Gerät oder System [Bor14]. Der Nutzer nimmt nur die dem Gesamtsystem zur Verfügung gestellten Funktionen wahr.

Der Unterschied zu einem herkömmlichen Computer besteht darin, dass dieser abhängig von der installierten Software verschiedene Aufgaben ausführen kann, während die Aufgaben des eingebetteten Systems vordefiniert sind. Aufgrund bestehender Anforderungen, wie hohe Verfügbarkeit, Robustheit und Echtzeitfähigkeit, da zu späte Reaktionen oder unerwartetes Verhalten zu sicherheitskritischen Situationen führen können, ist die Komplexität heutiger eingebetteter Systeme sehr groß [FGP04].

E/E-Architektur

Die Gesamtheit der eingebetteten Systeme im Automobil wird häufig unter dem Begriff E/E-Architektur zusammengefasst. Hierzu gehören nicht nur die benötigten Soft- und Hardware-Komponenten, sondern auch ihre Betriebsarten, diesbezügliche Abhängigkeiten und das dynamische Systemverhalten. Weiterhin beinhaltet der Begriff E/E-Architektur auch die Information über das Packaging und das Routing [ST12].

Sie beschreibt folglich die Struktur und das Zusammenspiel aller E/E-Systeme. Dies beinhaltet die funktionale, logische, Kommunikations- und Energetische-Vernetzung, ihre Schnittstellen und die Topologien [Jä12].

Energieversorgungsnetz

Das Energieversorgungsnetz dient zur Versorgung aller Verbraucher mit ausreichend Energie und Leistung. Es beinhaltet Bauteile wie Generatoren, Batte-

rien, Kondensatoren, Sicherungen, Relais und die zur Vernetzung benötigten Kabel.

Derivat

Als Derivat werden Modifikationen eines Modells bezeichnet. Derivate müssen nicht mehr viel mit diesem Basismodell gemeinsam haben. Sie sind aber auch keine komplette Neuentwicklung z.B. Versionen als Cabrio, Coupé, Kombi, aber auch Einzelanfertigungen oder Prototypen, die nicht in Serie gehen.

Design Space Exploration

Die systematische Untersuchung des Entwurfsraums (Design Space Exploration) erlaubt es, basierend auf einer Auswahl an Variablen vor der Implementierung einen Satz alternativer Entwürfe zu finden und zu untersuchen [KJS10]. Damit kann der Einfluss von Entwurfsentscheidungen abgeschätzt, eine Auswahl und Optimierung vorgenommen oder zulässige Konfigurationen gefunden werden [KJS10].

IKT im Fahrzeug

In [Sta04] werden unter der Bezeichnung Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) Einrichtungen und technische Hilfsmittel verstanden, die Informationen auf elektronischem Wege übertragen und zur Kommunikation nutzen können. Unter diese Definition fallen z.B. Computer oder Mobiltelefone.

Im Fahrzeug ist die IKT in Form von Elektronik zu finden und trägt entscheidend zur Wettbewerbsfähigkeit bei [For12]. Sie umfasst die funktionale-, logische- und Kommunikations-Vernetzung. Hierzu gehören alle Software-Komponenten, zugehörige Hardware, Steuergeräte, Sensoren sowie Aktoren und die zur Datenübertragung eingesetzten Bussysteme.

IKT-Architektur

Dieser Begriff wird im Zuge dieser Arbeit als äquivalent einer neuartigen Dienste-orientierten IKT im Fahrzeug verwendet, die mit Hilfe einer Middleware Softwarefunktionen von der ausführenden Hardware trennt. Sie umschreibt Steuergeräte ihre Software und Kommunikation.

Kabelbaum

Der Kabelbaum oder Leitungssatz beinhaltet alle Leitungen zur Energie- und Signalverteilung innerhalb eines Fahrzeugs.

Key Performance Indicator

Nach [Spr17] bezeichnen Key Performance Indicators (KPIs) Leistungskennzahlen, mit deren Hilfe Erfolg, Leistung oder Auslastung eines Betriebs, einer einzelnen organisatorischen Einheit oder Maschine gemessen werden können, wobei abhängig von der Sichtweise verschiedene Größen als KPIs dienen. Da die definierten zentralen Bewertungskriterien eines Energieversorgungsnetzes einerseits mehrere einzelne Optimierungsgrößen beinhalten können und andererseits den Vergleich verschiedener Entwürfe untereinander ermöglichen sollen, wird zur eindeutigen Bezeichnung dieser Kennzahlen der Begriff KPIs herangezogen.

Middleware (Diensteschicht)

Anwendungsneutrale Software zwischen Applikationen und Betriebssystem, die die Kommunikation zwischen verschiedenen Applikationen ermöglicht. Sie abstrahiert das dafür benötigte Netzwerk und die Hardware.

Multiplizität

Mehrfaches Vorkommen der gleichen Komponente.

Packaging

Räumliche Verteilung von Komponenten auf die zur Verfügung stehenden Bauräume.

Routing

Vernetzung von Komponenten entlang definierter Verlegewege.

Segment (Fahrzeug-)

In dieser Arbeit wird auf die Definition der verschiedenen Fahrzeugsegmente in [Com03] zurückgegriffen. Das A-Segment umfasst Kleinwagen wie smart, B Kleinwagen wie Ford Fiesta, C Mittelklasse wie 1er BMW, D obere Mittelklasse wie 3er BMW, E Oberklasse wie 5er BMW, J SUV wie Mercedes GLS bis zu Luxusautos im F-Segment wie die S-Klasse.

Technologie

In diesem Zusammenhang verwendet, um unterschiedliche Ausführungen von Komponenten mit derselben Funktion zu umschreiben. Beispiele sind Halogen- oder LED-Scheinwerfer, Kupfer- oder Aluminiumleitungen sowie Blei-Säure- oder Lithium-Ionen-Batterien.

Vehicle to X

Vehicle-to-everywhere (V2X) fasst die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander (Vehicle to Vehicle, V2V) und mit der Infrastruktur (Vehicle to Infrastructure, V2I) zusammen.

X-by-Wire

Anwendungen bei denen Systeme mit mechanischer Kraftübertragung durch elektronisch gesteuerte Systeme ersetzt werden. Beispielsweise entfällt bei Steer-by-Wire die Lenkstange. Sensoren im Lenkrad geben den Lenkbefehl an Aktoren auf der Achse weiter.

B. Experteninterview

B.1. Leitfaden

1. Welche Erfahrung haben Sie im Bereich der Bordnetzentwicklung von Fahrzeugen? (z.B. Entwickler, Projektleiter, Auftraggeber, Qualitätssicherung mit folgenden Aufgaben ...)

Status Quo E/E-Architektur:

2. Was sind Ihrer Meinung nach die wichtigsten Merkmale im heutigen Aufbau des Fahrzeugbordnetzes? (Aufbau Energiebordnetz/ Systemarchitektur/ Funktionsarchitektur ...)
3. Wie sieht Ihrer Meinung nach der Bordnetzentwicklungsprozess heutiger Fahrzeuge aus?
4. Unterscheidet sich die Entwicklung von heutigen Bordnetzen für konventionelle Fahrzeuge von der von Elektrofahrzeugen? Wenn ja, wieso?
5. Welchen Anforderungen werden an Bordnetze heute gestellt?
6. Anhand welcher Kriterien werden Bordnetze heute optimiert? Wie würden Sie diese Kriterien priorisieren? (5 sehr wichtig – 1 unwichtig)

Trends E/E-Architektur:

7. Das Bordnetz ist heute in verschiedene Funktionsbereiche, die Domänen, unterteilt. Ist diese Unterteilung auch in Zukunft sinnvoll?
8. Das Niedervolt-Bordnetz besitzt heute eine allgemeine 12V-Spannungsebene und interne, kleinere Spannungen von z.B. 3,5V und 5V. Ist dies auch in Zukunft sinnvoll?
9. Ist das zentrale Sicherungskonzept zukunftsfähig?
10. Heute besitzt das Niedervolt-Bordnetz einen Energiespeicher, in der Oberklasse auch zwei. Sehen Sie hier Optimierungschancen durch den Einsatz verteilter Speicher?

11. Was sind für Sie die wichtigsten Herausforderungen, die das Bordnetz der Zukunft meistern muss?
12. Was sind für Sie die größten Hürden, die es bis dahin zu überwinden gilt?
13. Welche neuen Anforderungen werden somit an die Funktionalität von zukünftigen Bordnetzen gestellt?

Mögliche zukünftige E/E-Architekturen:

14. Brauchen wir für zukünftige Bordnetze neue Kommunikationsarchitekturen?
15. Führen neue Kommunikationsarchitekturen auch zu neuen Energieordnetztopologien?
16. Haben Sie eine Vision, wie für Sie das zukünftige Bordnetz gestaltet sein müsste?
17. Was bedeutet ihrer Meinung nach eine revolutionäre Weiterentwicklung gegenüber einer evolutionären Weiterentwicklung?
18. Haben evolutionäre Weiterentwicklungen Nachteile gegenüber revolutionären Technologiebrüchen? Wenn ja, wieso?
19. Wird das Bordnetz ihrer Meinung nach heute evolutionär oder radikal entwickelt?
20. Bietet der Einsatz von Ethernet im Bordnetz Vorteile gegenüber heutigen Strukturen? Welche? Wo ergibt es Sinn konventionelle Busse einzusetzen? Wo Ethernet?
21. Können aus anderen Branchen Anforderungen und Trends in den Entwicklungsprozess des Fahrzeugbordnetzes adaptiert werden? Wenn ja, aus welchen Branchen, welche Trends?

B.2. Zusammensetzung Experten

Anhand der ersten Frage können die befragten Personen in Gruppen abhängig von ihren jeweiligen Tätigkeitsfeldern oder in Bezug auf die angegebenen Kompetenzen eingeteilt werden. Abbildung B.1 zeigt die sich ergebende Spreizung der Verantwortlichkeiten und Kompetenzen. Bei letzterem handelt es sich um Minimalwerte, die auf Basis der angegebenen Erfahrungen aus

Frage eins rekonstruiert wurden. Da die Experten nicht explizit nach ihren Erfahrungen in den dargelegten Bereichen befragt wurden, können sie auch über mehr als die angegebenen Kompetenzen verfügen.

Die breite Auswahl an Tätigkeits- und Kompetenzfeldern stellt sicher, dass die Ergebnisse, trotz der kleinen Zahl an Interviews, einen guten Überblick über beherrschende Trends und Herausforderungen der E/E-Architektur zur Zeit der Befragung liefern. Die abweichenden Zahlenwerte in Abbildung B.1 zu den Angaben in [BGS16] sind auf die präzisere Unterscheidung von Erfahrungen rechts und die Beschränkung auf die höchste innegehabte Position links zurückzuführen.

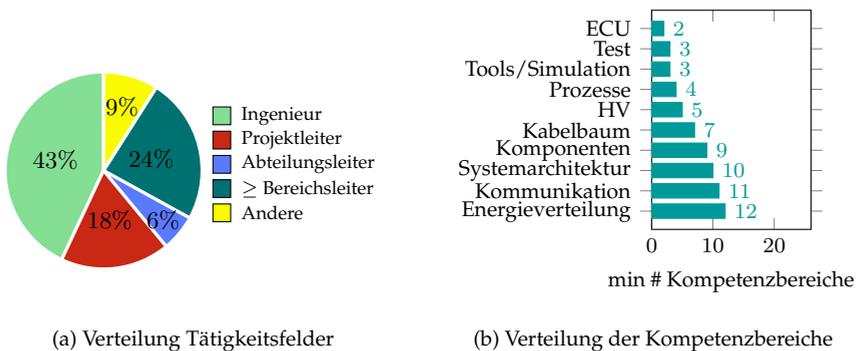


Abbildung B.1.: Hintergrund-Verteilung der befragten Experten [BAS16]

B.3. Datenanalyse

Die erhobenen Daten wurden anonymisiert in einer Ergebnismatrix pro Frage gesammelt. Dabei wurden in jeder Matrix Cluster gebildet, die im Laufe der Interviews iterativ erweitert wurden. Tabelle B.1 zeigt den Ausschnitt einer solchen Matrix. Dieselbe Aussage wird durch ein „x“ markiert, bei Abweichungen werden entsprechende Stichwörter ergänzt. Dies ermöglicht das einfache Verbinden ähnlicher Aussagen für die Analyse, ohne die Ergebnisse einzelner Interviews zu verfälschen, da beispielsweise „kleine Querschnitte“ bei Bedarf später auch in ein eigenes Cluster überführt werden könnte. In [BGS16] sind die auf Basis dieser Matrizen qualitativ aufbereiteten Ergeb-

nisse des Inverviews dargelegt, wobei versucht wurde, die Vielfalt der Aussagen und Ideen vollständig abzubilden.

Anhand der Ergebnisse des Experteninterviews lassen sich wichtige Auslegungskriterien heutiger und zukünftiger E/E-Architekturen identifizieren. Im Gegensatz zur Auswertung in [BGS16] wird die Zugehörigkeit der Antworten zu einzelnen Fragen aufgelöst. Einzig der Bezug der erhobenen Daten auf existierende oder zukünftige E/E-Architekturen bleibt bestehen. Folglich bilden Fragen zwei bis sechs und Fragen sieben bis 16 jeweils eine Gruppe.

Die Ergebnisse werden im Anschluss quantitativ aufbereitet. Dies führt zu den in Tabelle B.2 angegebenen Prozentangaben. Die veranschaulichte Korrektur bei der Unterscheidung von Prozentanteilen der Gruppen dient dazu, dass durch die höhere Anzahl befragter OES Experten entstandene Ungleichgewicht zu bereinigen. Dabei wird der Prozentanteil aller Antworten mit dem Anteil der jeweiligen Gruppen multipliziert.

Kategorie	Kosten	Gewicht	FuSi	Security	Echtzeit
OEM	x	x	x		
OES	gering	kleiner Quer- schnitt		Daten- sicher- heit	
Forschung	x	x	x		x

Tabelle B.1.: Beispiel Ergebnismatrix zur Sammlung heutiger Anforderungen: Kosten wurden von allen Experten genannt. Die Aussage "kleine Querschnitte" wird dem Gewicht zugeordnet. Die Kategorien Security und Echtzeit wurden den Aussagen entsprechend ergänzt.

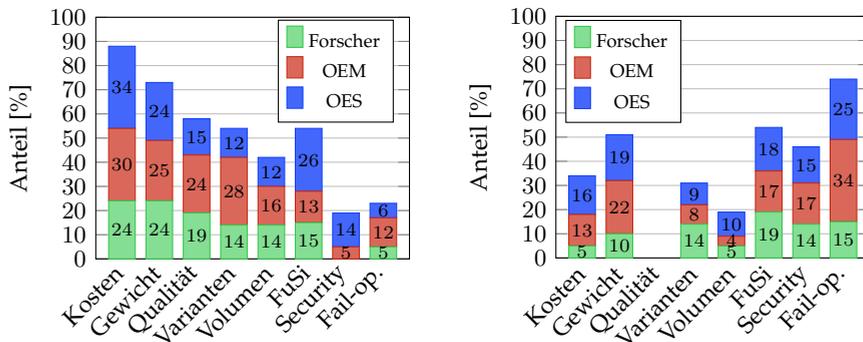
	Gesamt	Forschung	OEM	OES
Interviews	26	7	8	11
Antworten	15	5	4	6
Anteil gesamt	57.7%	19.2%	15.4%	23.1%
Anteil Gruppe		71.4%	50.0%	54.5%
Angepasste Werte	-	23.4%	16.4%	17.9%

Tabelle B.2.: Beispielrechnung für die Berechnung der Prozentangaben für den Trend „autonomes Fahren“

B.4. Ergebnisse: Anforderungen

Im folgenden wird die Gewichtung verschiedener Anforderungen an existierende und zukünftige E/E-Architekturen gezeigt. Diese ergibt sich aus der Zahl der Nennungen im Verhältnis zur Gesamtzahl der Interviews, wie in B.2 aufgeführt. Die Zuordnung zu den jeweiligen Gruppen zeigt die korrigierten Werte. Die Angaben sind in allgemeine sowie nur die IKT beziehungsweise Energieversorgung im speziellen betreffende Anforderungen gegliedert.

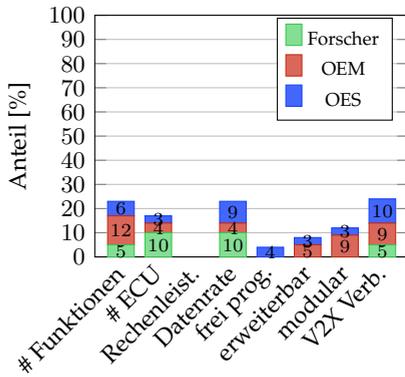
Die Angabe für Gewicht in Abbildung B.2 fasst die entsprechenden Aussagen (19%) und die Forderung nach einer optimalen Dimensionierung des Kabelbaums zusammen. Letztere wird in Abbildung B.4 noch einmal explizit aufgeführt. Abweichungen zu den Zahlenwerten in [BAS16] sind auf Rundungsfehler durch die Angabe ganzzahliger, gruppenspezifischer Werte zurückzuführen.



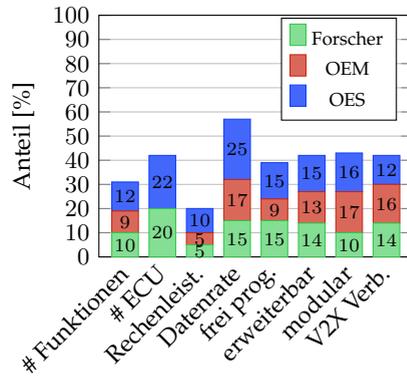
(a) Heutige Anforderungen

(b) Erwartete zukünftige Anforderungen

Abbildung B.2.: Allgemeine Anforderungen der Experten an die E/E-Architektur: links heute, rechts erwartet für die Zukunft

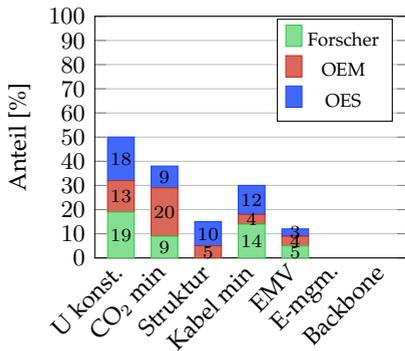


(a) Heutige Anforderungen

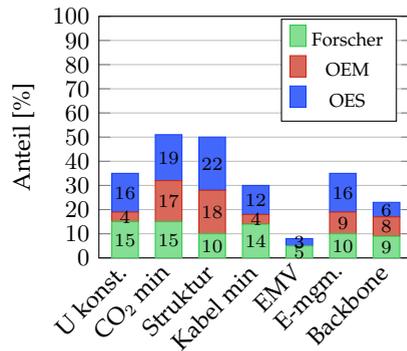


(b) Erwartete zukünftige Anforderungen

Abbildung B.3.: Anforderungen der Experten an die IKT: links heute, rechts erwartet für die Zukunft



(a) Heutige Anforderungen



(b) Erwartete zukünftige Anforderungen

Abbildung B.4.: Anforderungen der Experten an die Energieversorgung: links heute, rechts erwartet für die Zukunft

C. Elektrische Verbraucherdaten

Elektrische Verbraucher im Bordnetz können wie in Tabelle 2.3 Anhand ihrer Funktion, ihres Betriebsverhaltens oder ihres Leistungsbedarfs in unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden. In der Literatur sind viele abweichende Angaben hinsichtlich des Leistungsbedarfs von Komponenten verfügbar. Selbst innerhalb derselben Quelle können Angaben zu Leistungswerten eine große Varianz aufweisen wie die folgenden Tabellen zeigen.

Die Tabellen C.1 und C.2 zeigen Angaben zu Komponenten der Grundlast. Zur Grundlast werden nach [Fab06] alle Senken gezählt, die zwingend im Fahrzeug verbaut werden müssen und folglich in jedem Fahrzeug zu finden sind. Im Anschluss fasst Tabelle C.3 Leistungswerte sicherheitsrelevanter Komponenten zusammen. Diese erhöhen entweder die Sicherheit im Fahrzeug wie ABS oder verursachen bei einem Ausfall eine nicht zulässige Gefährdung wie die Bremse. Die Tabellen C.4 und C.5 führen Komfortverbraucher auf. Innovative Hochleistungsverbraucher mit einer hohen Last, einer hohen Dynamik oder beidem werden dabei kursiv dargestellt.

Die Quellen [Bor14], [Hes11], [Bue08] und [Rei10] sind nicht aufgeführt, da sie sich auf [Rob14] beziehen beziehungsweise letztere auf derselben Datenbasis basiert. Bei nicht öffentlich zugänglichen Referenzen wird die gefundene Zweitquelle referenziert. Die Angaben von [Fab06] sind meist in Ampere, hier erfolgt die Berechnung der Leistung mit einer angenommenen Systemspannung von 14 V.

Verbraucher	#	Quelle	P_{max} [W]	P_{ϕ} [W]	Betrieb
Beleuchtung gesamt		[WR06]	600		Langzeit
Beleuchtung gesamt		[Hei06]	600		Langzeit
Abblendlicht	2	[Rob14]	55	35	Langzeit
				45	
				55	
Abblendlicht	2	[Fab06]		70	Langzeit
Abblendlicht	2	[Hoc13]		55	Langzeit
Abblendlicht	2	[Koh14]	100	50	Langzeit
Blinklicht	4	[Rob14]	22	20	Kurzzeit
Blinklicht	4	[Hoc13]		21	Kurzzeit
Blinklicht	4	[Koh14]		20	Kurzzeit
Bremslicht	2	[Rob14]	42	11	Kurzzeit
			21	18	
Bremslicht	2	[Hoc13]		21	Kurzzeit
Bremslicht	2	[Koh14]		20	Kurzzeit
Deckenlicht	2	[Rob14]	10	5	Kurzzeit
Fernlicht	2	[Rob14]		60	Langzeit
Fernlicht	2	[Fab06]		84	Langzeit
Fernlicht	2	[Koh14]	60	50	Langzeit
Instrumentenlicht	x	[Rob14]	22	20	Langzeit
				2	
Kennzeichenlicht	2	[Rob14]		10	Langzeit
Nebellicht	2	[Rob14]	110	20	Kurzzeit
			55	35	
Nebellicht	2	[Hoc13]	55	35	Kurzzeit
Schlusslicht	1	[Rob14]	21	2	Kurzzeit
Rücklicht	2	[Rob14]	30	25	Langzeit
				5	
Rücklicht	2	[Koh14]		15	Langzeit
Rückfahrlicht	1	[Rob14]		21	Langzeit
Standlicht	4	[Rob14]	8	7	Langzeit
			5	3	
Standlicht	4	[Fab06]		56	Langzeit
Tagfahrlicht	2	[Rob14]		13	Langzeit
Tagfahrlicht	2	[Hoc13]		100	Langzeit

Tabelle C.1.: Grundlast Verbraucher: Beleuchtung

Verbraucher	#	Quelle	P_{max} [W]	P_{ϕ} [W]	Betrieb
Scheibenwischer Front	1	[Rob14]	150	80	Langzeit
			50	10	
Scheibenwischer Front	1	[Fab06]	210	70	Langzeit
Scheibenwischer Front	1	[Hoc13]	90	60	Langzeit
Scheibenwischer Heck	1	[Rob14]	65	30	Kurzzeit
Scheibenreinigung	1	[Rob14]	100	50	Kurzzeit
Kühlwasserpumpe	x	[WR06]	1.200	500	Langzeit
			600	100	
			500		
Kühlwasserpumpe	x	[Hei06]		300	Dauer
Kraftstoffpumpe	1	[Fab06]		140	Dauer
Kraftstoffpumpe	1	[Rob14]	250	250	Dauer
			70	50	
Kraftstoffpumpe	1	[Hoc13]	70	50	Dauer
Kraftstoffeinspritzung	1	[Rob14]	70	50	Dauer
Kraftstoffeinspritzung	1	[Hoc13]	70	50	Dauer
Starter	1	[Rob14]	3.000	800	Kurzzeit
Starter	1	[Hoc13]	3.000	800	Kurzzeit
Kühlergebläse	1	[Rob14]	500	100	Dauer
			120	30	
Kühlergebläse	1	[WR06]	650	50	Dauer
			1.000	500	
			500		
Lüfter Motor	1	[Koh14]		1.200	Dauer
Lüfter Motor	1	[Hei06]	800	500	Dauer
Sauglüfter	1	[Fab06]	1.000		Dauer
Zündung	1	[Rob14]	20	20	Dauer
Zündung	1	[Hoc13]	20	20	Dauer
Katalysator Vorheizung	1	[WR06]	2.000	2.000	Langzeit
Ventilsteuerung elektrohydraulisch	1	[WR06]	400	200	Dauer
Motormanagement	1	[Rob14]	200	175	Dauer
Motormanagement	1	[Hei06]	100	100	Dauer
Motormanagement	1	[Hoc13]	10	10	Dauer
Steuergeräte	x	[Fab06]	70		Dauer

Tabelle C.2.: Grundlast Verbraucher: Motoren, elektrische Pumpen, Lüfter und Steuerung

Verbraucher	#	Quelle	P_{max} [W]	P_{ϕ} [W]	Betrieb
ABS	1	[Hei06]		600	Kurzzeit
ESP	1	[Koh14]	7.800	3.000	Kurzzeit
Hörner / Fanfaren	1	[Rob14]	40	25	Kurzzeit
Hörner / Fanfaren	1	[Hoc13]	100	25	Kurzzeit
<i>Bremse elektrisch</i>	1	[Fab06]		1.400	Kurzzeit
<i>Bremse elektrisch</i>	1	[WR06]	2.500		Kurzzeit
<i>Bremse elektrisch</i>	1	[Hei06]	2.000	250	Kurzzeit
<i>Bremse</i>	1	[WR06]	4000		Kurzzeit
<i>elektromagnetisch</i>					
<i>Bremse</i>	1	[WR06]	1.000-	50	Kurzzeit
<i>elektromechanisch</i>			3.000	200	
			2.000		
Lenkhilfe elektrisch	1	[Hoc13]	1.000	200	Kurzzeit
Lenkhilfe (Servo)	1	[WR06]	900	200	Kurzzeit
<i>Electric Power Steering</i> (EPS)	1	[Fab06]	1.400	28	Kurzzeit
<i>Electric Power Steering</i> (EPS)	1	[WR06]	1.500		Kurzzeit
<i>Electric Power Steering</i> (EPS)	1	[Koh14]	7.800	3.000	Kurzzeit
<i>Electric Power Steering</i> (EPS)	1	[Hei06]	1.000	1.000	Kurzzeit
<i>Lenkhilfe</i> <i>elektromechanisch</i>	1	[WR06]	1.500	100	Kurzzeit

Tabelle C.3.: Sicherheitsrelevante Verbraucher

Verbraucher	#	Quelle	P_{max} [W]	P_o [W]	Betrieb
Radio	1	[Rob14]	30	15	Langzeit
Audioverstärker	1	[Fab06]		20	
Audioverstärker	1	[Koh14]	4200	350	Langzeit
Navigationssystem	1	[Rob14]		1800	Langzeit
Entertainment: Radio, GPS, Fernseher	x	[Fab06]		15	Langzeit
Infotainment	x	[Hoc13]	100	140	Langzeit
Fensterheber	4	[Rob14]	150		Kurzzeit
Fensterheber	4	[WR06]	700		Kurzzeit
Spiegelverstellung	2	[Rob14]		20	Kurzzeit
Türmodul	2	[Koh14]		360	
Türmodul	2	[Hei06]	400	400	
Schiebedach	1	[Rob14]		100- 150	Kurzzeit
Sitzverstellung	2	[Rob14]		100- 150	Kurzzeit
Sitzverstellung	2	[WR06]		1.000	Kurzzeit
Sitzmodul hinten	1	[Koh14]		600	Kurzzeit
Sitzmodul vorne	1	[Koh14]		960	Kurzzeit
Zigarettenanzünder	1	[Rob14]	100		Kurz-/ Langzeit
Zigarettenanzünder	1	[Hoc13]	100		Kurz-/ Langzeit
<i>Wankstabilisierung: Electronic Body Control</i>	1	[Hoc13]	3.000	100	Kurzzeit
<i>Wankstabilisierung: Electronic Roll Control</i>	1	[Hoc13]	2.000	1.000	Kurzzeit
<i>Wankstabilisierung aktives Fahrwerk</i>	1	[WR06]	2.000	150	Kurzzeit
<i>(Wankstabilisierung) aktives Fahrwerk</i>	1	[WR06]	12.000		Kurzzeit
<i>aktive Dämpfung (Wankstabilisierung)</i>	1	[WR06]	4.000	150	Kurzzeit
	1	[Hei06]	3.000	3.000	Kurzzeit

Tabelle C.4.: Komfort Verbraucher: Infotainment Telematik und sonstiges

Verbraucher	#	Quelle	P_{max} [W]	P_o [W]	Betrieb
<i>Frontscheibenheizung</i>	1	[Rob14]	2.000		Kurzzeit
<i>Frontscheibenheizung</i>	1	[Fab06]		1.300	Kurzzeit
<i>Frontscheibenheizung</i>	1	[WR06]	1.500	120	Kurzzeit
			1000	400	
<i>Frontscheibenheizung</i>	1	[Hei06]	1.000	500	Kurzzeit
<i>Heckscheibenheizung</i>	1	[Rob14]	120	120	Kurzzeit
			200	60	
<i>Heckscheibenheizung</i>	1	[Fab06]	350	280	Kurzzeit
<i>Heckscheibenheizung</i>	1	[WR06]	1.500		Kurzzeit
<i>Heckscheibenheizung</i>	1	[Koh14]		960	Kurzzeit
<i>Heizung Innenraum</i>	1	[Fab06]		1.700	Langzeit
<i>Heizung Innenraum</i>	1	[Hoc13]	60	20	Langzeit
<i>Heizsysteme, (Hochleistungs-)</i>	1	[WR06]	2.000	700	Langzeit
			3.000		
<i>Lenkradheizung</i>	1	[Rob14]		50	Kurzzeit
<i>Sitzheizung (je Sitz)</i>	2	[Rob14]		200	Langzeit
<i>Sitzheizung (je Sitz)</i>	2	[Fab06]		140	Langzeit
<i>Sitzheizung</i>	2	[WR06]	500		Langzeit
<i>Sitzheizung</i>	2	[Hei06]	180	15	Langzeit
<i>Spiegelheizung</i>	2	[Fab06]		56	Kurzzeit
<i>Klimaanlage</i>	1	[Hoc13]	600	80	Langzeit
<i>Kühlbox</i>	1	[Koh14]		240	Langzeit
<i>Klimaanlage</i>	1	[WR06]	3.500		Langzeit
<i>Klimakompressor</i>	1	[WR06]	4.000	1.000	Langzeit
			4.000	2.500	
<i>Lüfter Innenraum</i>	1	[Rob14]	120	50	Langzeit
<i>Lüfter Innenraum</i> /	1	[Rob14]	500	100	Dauer
<i>Klima je</i>					
<i>Gebläse Innenraum</i>	1	[Fab06]		462	Langzeit
<i>Kopfraumbelüftung (je Sitz)</i>	2	[Fab06]		280	Langzeit
<i>Klimagebläse</i>	1	[Koh14]		600	Langzeit
<i>Klimagebläse Fond</i>	1	[Koh14]		480	Langzeit
<i>Gebläse Heizung Innenraum</i>	1	[Hei06]	500	200	Langzeit

Tabelle C.5.: Komfort Verbraucher: Heizung und Klima (elektrisch)

D. Randbedingungen für die Modellierung

D.1. Fahrzeugdaten

Segment			Kleinstwagen A	Mittelklasse C	Limousine F
Fahrzeug			e smart	e Golf	Tesla S
Quelle			[sma16]	[Vol16]	[Tes16a]
Grundpreis	c_{Fzg}	[€]	21940	35900	84470
Gewicht	m_{Fzg}	[kg]	900	1585	2000
Höhe	h_{Fzg}	[mm]	1555	1473	1445
Breite	b_{Fzg}	[mm]	1663	1799	1964
Länge	l_{Fzg}	[mm]	2695	4270	4979
cw-Wert	cw	[-]	0,37	0,27	0,24
Reifentyp		[-]	155/ 60R15	205/ 55R16	245/ 45R19
Verbrauch	M_{Fzg}	$[\frac{kWh}{100km}]$	15,1	12,7	22,04
Emission CO ₂	E_{Fzg}	$[\frac{gCO_2}{km}]$	—	—	—
Batterie		[Ah]	17,6	24,2	60
Übersetzung Getriebe	i_G	[-]	12	9,76	12
Übersetzung Achse	i_A	[-]	1	1	1
Wirkungsgrad Motor	η_{Mot}	[-]	0,95	0,95	0,95
Wirkungsgrad DCDC-Wandler	η_{Mot}	[-]	0,95	0,95	0,95
Wirkungsgrad Getriebe	η_G	[-]	0,9	0,9	0,9

Tabelle D.1.: Fahrzeugdaten Elektrofahrzeuge als Grundlage der DSE

Segment			A: Kleinst- wagen	C: Mittel- klasse	J: SUV
Fahrzeug			smart	Golf	GLS400
Quelle			[sma16]	[Vol16]	[MB16]
Grundpreis	c_{Fzg}	[€]	10545	17850	77028
Gewicht	m_{Fzg}	[kg]	885	1225	2435
Höhe	h_{Fzg}	[mm]	1555	1473	1850
Breite	b_{Fzg}	[mm]	1663	1799	1934
Länge	l_{Fzg}	[mm]	2695	4270	5130
cw-Wert	cw	[-]	0,37	0,27	0,36
Reifentyp		[-]	155/ 60R15	205/ 55R16	265/ 60R18
Verbrauch	M_{Fzg}	$[\frac{kWh}{100km}]$	38,62	45,49	80,68
Emission CO ₂	E_{Fzg}	$[\frac{gCO_2}{km}]$	93	123	218
Hubraum		$[cm^3]$	599	1395	2996
Übersetzung Getriebe	i_G	[-]	3,77, 2,09, 1,32, 0,91, 0,90, 0,76	3,769, 2,087, 1,324, 0,919, 0,902, 0,757	5,35, 3,24, 2,25, 1,64, 1,21, 1, 0,86, 0,72, 0,6
Übersetzung Achse	i_A	[-]	3	3,45, 3,45, 3,45, 3,45, 2,76, 2,76	3,27
Wirkungsgrad Motor	η_{Mot}	[-]	0,35	0,35	0,35
Wirkungsgrad Generator	η_{Mot}	[-]	0,75	0,75	0,75
Wirkungsgrad Getriebe	η_G	[-]	0,9	0,9	0,9

Tabelle D.2.: Fahrzeugdaten Verbrennungsfahrzeuge als Grundlage der DSE

D.2. Auswahl an Senken

Verbraucher	P_{max} [W]	P_{ϕ} [W]	A #	C #	J #	F #
Beleuchtung						
Abblendlicht	55	45	2	2	2	2
Blinklicht	20	20	4	4	6	6
Bremslicht	20	20	2	2	2	2
Fernlicht	60	50	2	2	2	2
Innenraumlicht	10	5	2	2	2	2
Instrumentenlicht	2	2	6	10	10	10
Kennzeichenlicht	10	10	2	2	2	2
Nebellicht	55	35	2	2	2	2
Nebelschlusslicht	21	2	1	1	1	1
Parklicht	8	7	4	4	4	4
Rückfahrlicht	21	21	1	1	1	1
Rücklicht	5	5	2	2	2	2
Tagfahrlicht	13	13	2	2	2	2
Motoren, Pumpen, Lüfter, Steuerung						
Kühlwasserpumpe	600	100	1	1	1	1
Scheibenreinigung	100	50	1	1	1	1
Scheibenwischer Front	50	10	1	1	1	1
Scheibenwischer Heck	65	30	1	1	1	1
Steuergerät	10	10	3	5	7	7
Sicherheit						
ABS	600	600	1	1	1	1
elektrische Lenkhilfe	900	200	1	1	1	1
ESP	7800	3000	1	1	1	1
Hörner u. Fanfaren	40	25	1	1	1	1
Komfort: Infotainment, Telematik, Luxusfunktionen						
Audioverstärker	4200	1800	0	0	1	1
Fensterheber	150	150	2	4	4	4
Radio	20	20	1	1	1	1
Sitzverstellung	150	100	0	2	2	2
Spiegelverstellung	20	20	2	2	2	2
Zigarettenanzünder	100	100	1	1	1	1

Verbraucher	P_{max} [W]	P_{ϕ} [W]	A #	C #	J #	F #
Komfort: Heiz- und Klimasysteme						
Heckscheibenheizung	600	120	0	1	1	1
Klimakompressor	600	80	1	1	0	0
Lenkradheizung	50	50	0	0	1	1
Lüfter Innenraum	600	200	1	1	1	1
Sitzheizung	180	15	2	2	2	2
Spiegelheizung	56	56	2	2	2	2
innovative Hochleistungssysteme						
Bremse elektrisch	2000	250	0	0	1	1
Electric Body Control	3000	100	0	0	1	1
Electric Power Steering	7800	3000	0	0	1	1
Electric Roll Control	2000	1000	0	0	1	1
Frontscheibenheizung	1000	500	0	0	1	1
Klimakompressor	4000	1000	0	0	1	1
Turbolader	2000	100	0	0	1	1
spezifisch E						
Hochleistungs-Heizsysteme	2000	700	1	1	1	1
spezifisch VKM						
Katalysatorvorheizung	2000	2000	1	1	1	1
Kraftstoffeinspritzung	70	50	1	1	1	1
Kraftstoffpumpe	70	50	1	1	1	1
Kühlerventilator	800	500	1	1	1	1
Motormanagement	100	100	1	1	1	1
Navigationssystem	15	15	0	1	1	1
Starter	3000	800	1	1	1	1
Ventilsteuerung elektrohydraulisch	400	200	1	1	1	1
Zündung	20	20	1	1	1	1

Tabelle D.3.: Liste verwendeter Energiesenken abhängig vom Fahrzeugsegment A: Kleinwagen, C: Mittelklasse, J: SUV, F: Luxusklasse. Angabe der angenommenen Anzahl, des maximalen P_{max} und durchschnittlichen P_{ϕ} Leistungsbedarfs.

Verbraucher	Abhängigkeiten des Betriebs							
	d	n	r	f	T	F	s	D
Grundlast: Beleuchtung								
Abblendlicht	1	0	1	1	0	0	0	0
Blinklicht	0	0	0	0	0	0	1	0
Bremslicht	0	0	0	0	0	1	0	0
Fernlicht	1	0	1	1	0	0	0	0
Innenraumlicht	0	0	0	0	0	1	0	0
Instrumentenlicht	1	0	1	1	0	0	0	0
Kennzeichenlicht	1	0	1	1	0	0	0	0
Nebellicht	0	0	0	1	0	0	0	0
Nebelschlusslicht	0	0	0	1	0	0	0	0
Parklicht	1	0	1	1	0	1	0	0
Rückfahrlicht	0	0	0	0	0	0	0	0
Rücklicht	1	0	1	1	0	0	0	0
Tagfahrlicht	0	1	0	0	0	0	0	0
Grundlast: Motoren, Pumpen, Lüfter, Steuerung								
Kühlwasserpumpe	0	0	0	0	0	0	0	1
Scheibenreinigung	0	0	0	0	0	0	0	0
Scheibenwischer Front	0	0	1	0	0	0	0	0
Scheibenwischer Heck	0	0	1	0	0	0	0	0
Steuergerät	0	0	0	0	0	0	0	1
Sicherheit								
ABS	0	0	0	0	0	1	0	0
elektrische Lenkhilfe	0	0	0	0	0	0	1	0
ESP	0	0	0	0	0	0	1	0
Hörner u. Fanfaren	0	0	0	0	0	0	0	0
Komfort: Infotainment, Telematik, Luxusfunktionen								
Audioverstärker	0	0	0	0	0	0	0	0
Fensterheber	0	0	0	0	0	0	0	0
Radio	0	0	0	0	0	0	0	0
Sitzverstellung	0	0	0	0	0	1	0	0
Spiegelverstellung	0	0	0	0	0	0	0	0
Zigarettenanzünder	0	0	0	0	0	0	0	0

Verbraucher	Abhängigkeiten des Betriebs							
	d	n	r	f	T	F	s	D
Komfort: Heiz- und Klimasysteme								
Heckscheibenheizung	0	0	0	0	1	0	0	0
Klimakompressor	0	0	0	0	1	0	0	0
Lenkradheizung	0	0	0	0	1	0	0	0
Lüfter Innenraum	0	0	0	1	1	0	0	0
Sitzheizung	0	0	0	0	1	0	0	0
Spiegelheizung	0	0	0	0	1	0	0	0
innovative Hochleistungssysteme								
Bremse elektrisch	0	0	0	0	0	1	0	0
Electric Body Control	0	0	0	0	0	0	1	0
Electric Power Steering	0	0	0	0	0	0	1	0
Electric Roll Control	0	0	0	0	0	0	1	0
Frontscheibenheizung	0	0	0	0	1	0	0	0
Klimakompressor	0	0	0	0	1	0	0	0
Turbolader	0	0	0	0	0	0	0	0
spezifisch E								
Hochleistungs-Heizsysteme	0	0	0	0	1	0	0	0
spezifisch VKM								
Katalysatorvorheizung	0	0	0	0	0	0	0	0
Kraftstoffeinspritzung	0	0	0	0	0	0	0	1
Kraftstoffpumpe	0	0	0	0	0	0	0	1
Kühlerventilator	0	0	0	0	0	0	0	1
Motormanagement	0	0	0	0	0	0	0	1
Navigationssystem	0	0	0	0	0	0	0	0
Starter	0	0	0	0	0	0	0	0
Ventilsteuerung elektro- hydraulisch	0	0	0	0	0	0	0	0
Zündung	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabelle D.4.: Abhängigkeiten der verwendeten Energiesenken im Betrieb: vom Wetter (Regen r, Nebel f, Temperatur T), der Tageszeit (Tag d, Nacht n), dem Fahrer F, der Strecke s, Dauerverbraucher D

Komponente	T>25	T>20	T>15	T>10	T>5	T>0	T<0
Hochleistungs- Heizsysteme	0	0	0	0	120	300	1
Heckscheiben- heizung	0	0	0	0	0	120	300
Klimakompressor	1	0	0	0	0	0	0
Lenkradheizung	0	0	0	0	1	1	1
Lüfter Innenraum	1	1	1	0	1	1	1
Sitzheizung	0	0	0	0	1	1	1
Spiegelheizung	0	0	0	0	1	1	1
Frontscheiben- heizung	0	0	0	0	0	120	300
Klimakompressor	1	0	0	0	0	0	0

Tabelle D.5.: Modellierte Temperaturabhängigkeit der Senken: ausgeschaltet 0, immer eingeschaltet 1, bei Fahrtantritt für 120 s oder 300 s zugeschaltet.

D.3. Positionierung Senken im Fahrzeug

Verbraucher	#	Position m Breite					Position n Länge								
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	
Grundlast: Beleuchtung															
Abblendlicht	2	x	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0
Blinklicht	4	x	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0	0	x
Bremslicht	2	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	x
Deckenlicht	2	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0
Fernlicht	2	x	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0
Instrumentenlicht	10	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0
Kennzeichenlicht	2	0	0	x	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	x
Nebellicht	2	x	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0
Schlusslicht	1	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x
Rücklicht	1	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	x
Rückfahrlicht	1	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	x
Standlicht	4	x	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0	0	x
Tagfahrlicht	2	x	0	0	0	x	x	0	0	0	0	0	0	0	0

Verbraucher	#	Position m Breite					Position n Länge							
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8
Grundlast: Motoren, Pumpen, Lüfter, Steuerung														
Scheibenwischer Front	1	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0
Scheibenwischer Heck	1	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x
Scheibenreinigung	1	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0
Kühlwasserpumpe	1	0	x	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0
Steuergeräte	7	0	x	x	x	0	0	x	x	x	x	0	x	0
Sicherheit														
ABS	1	0	0	0	x	0	0	x	0	0	0	0	0	0
ESP	1	0	0	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0
Hörner / Fanfaren	1	0	0	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0
Lenkhilfe	1	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0
Komfort: Infotainment, Telematik, Luxusfunktionen														
Radio	1	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0
Audioverstärker	1	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0
Navigationssystem	1	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0
Fensterheber	4	x	0	0	0	x	0	0	0	0	x	x	0	0
Spiegelverstellung	2	x	0	0	0	x	0	0	0	x	0	0	0	0
Sitzverstellung	2	0	x	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0
Zigarettenanzünder	1	0	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0
Komfort: Heiz- und Klimasysteme														
Heckscheibenheizung	1	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x
Lenkradheizung	1	0	x	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0
Sitzheizung je Sitz	2	0	x	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0
Spiegelheizung	2	x	0	0	0	x	0	0	0	0	x	0	0	0
Klimaanlage	1	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0
Lüfter Innenraum	1	0	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0
innovative Hochleistungssysteme														
Frontscheibenheizung	1	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0
Klimakompressor	1	0	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0
Turbolader	1	0	0	0	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0
Bremse elektrisch	2	x	0	0	0	x	0	x	0	0	0	0	0	0
Electric Power Steering	1	0	x	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0
Electronic Body Control	4	x	0	0	0	x	0	x	0	0	0	0	x	0
Electronic Roll Control	4	x	0	0	0	x	0	x	0	0	0	0	x	0

Verbraucher	#	Position m Breite					Position n Länge							
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8
spezifisch E														
Hochleistungs-Heizsysteme	1	0	0	0	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0
spezifisch VKM														
Starter	1	0	0	0	x	0	0	x	0	0	0	0	0	
Kühlergebläse	1	0	x	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	
Zündung	1	0	x	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	
Katalysatorvorheizung	1	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x	
Ventilsteuerung elektrohydraulisch	1	0	x	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	
Motormanagement	1	0	x	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	
Kraftstoffeinspritzung	1	0	x	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	
Kraftstoffpumpe	1	0	x	0	0	0	0	x	0	0	0	0	0	

Tabelle D.6.: Positionierung der Energiesenken: Fünf mögliche Koordinaten in der Fahrzeugbreite, Fahrertür 1, Fahrersitz 2, Schaltbereich 3, Beifahrersitz 4, Beifahrertür 5, und acht mögliche Koordinaten in der Fahrzeuglänge, Front 1, Vorderrad 2, Frontscheibe 3, Armatur 4, Vordersitz 5, Rücksitz 6, Kofferraum 7 und Heck 8

D.4. Weitere Lastgänge Winterszenario

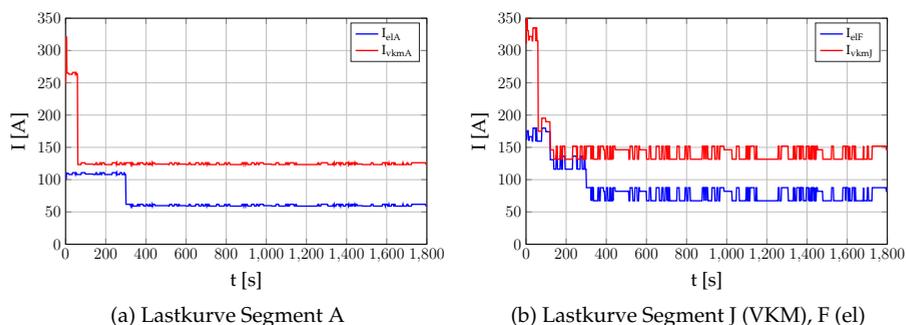


Abbildung D.1.: Lastkurven Winter-Szenario der Segmente A, J und F

D.5. Auswahl Energieverteilung

Sicherung [A]	Spannungs- abfall [mV]	Widerstand [mΩ]	Schmelzzeiten t_{min} / t_{max}		
			$3,5 I_n$ [s]	$2,0 I_n$ [s]	$1,35 I_n$ [s]
2	171	55,6			
3	153	33,75			
5	129	17,75			
7,5	135	10,85	0,08 /	0,15 / 5	0,75 / 1800
10	108	7,42	0,5		
15	98	4,58			
20	96	3,21			
25	86	2,36			
30	87	1,85			
40	75	1,42			
50	73	1,1			
60	77	0,89	0,2 / 7	2 / 60	60 / 1800
70	61	0,64			
80	62	0,54			
100	87	0,562			
125	80	0,423			
150	92	0,352			
175	86	0,294			
200	83	0,257	0,3 / 5	1 / 15	120 / 1800
225	82	0,222			
250	82	0,201			
300	74	0,167	0,5 / 5	1/15	-

Tabelle D.7.: Parameter Schmelzsicherungen [Lit16]

Querschnitt	Widerstand pro Meter (20°C)	Gewicht	Kosten	maximaler Strom
[mm ²]	$[\frac{\Omega}{m}]$	$[\frac{kg}{km}]$	$[\frac{€}{m}]$	[A]
0,13	136	2	0,1	1,5
0,22	84,8	3	0,15	2,5
0,35	54,4	5	0,25	4
0,5	37,1	9	0,45	6
0,75	24,7	12	0,6	8
1	18,5	15	0,75	12
1,25	14,9	15	0,75	14
1,5	12,7	20	1	16
2	9,42	26	1,3	20
2,5	7,6	32	1,6	24
3	6,15	38	1,9	30
4	4,71	49	2,45	40
5	3,94	60	3	45
6	3,14	69	3,45	50
8	2,38	90	4,5	56
10	1,82	113	5,65	80
12	1,52	144	7,2	90
16	1,16	181	9,05	100
20	0,955	221	11,05	110
25	0,743	288	14,4	120
30	0,647	325	16,25	130
35	0,527	361	18,05	140
40	0,473	438	21,9	150
50	0,368	521	26,05	160
60	0,315	644	32,2	180
70	0,259	716	35,8	200
95	0,196	918	45,9	260
120	0,153	1220	61	300

Tabelle D.8.: Leitungsparameter mit maximal zulässigen Stromstärken für Kabelquerschnitte nach [Jai15]

D.6. Vergleich genormter Fahrzyklen zur Emissionsmessung

Der Vorteil genormter Fahrzyklen ist die beliebige Reproduzierbarkeit von Simulationen und Labortests mit konstanten Randbedingungen und der dadurch mögliche Vergleich von Fahrten untereinander. Bisher diente in Europa der NEFZ als Testzyklus zur standardisierten Ermittlung des Fahrzeugverbrauchs und der Emissionen. Er besteht aus vier identischen Stadtzyklen und einem Autobahnzyklus mit gleichförmigen Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen sowie langen konstanten Fahrten und einer hohen Totzeit. Allerdings zeigt Tabelle D.9, dass die auftretenden Beschleunigungswerte deutlich unter den Werten anderer Zyklen liegen. Das statische Profil ist ebenfalls nicht realitätsnah.

Die laut [Tie+16] zunehmende Ausnutzung von Schlupflöchern im Testablauf durch OEMs auf der einen Seite und die auf dieses unrealistische, statische Geschwindigkeitsprofil angepasste Optimierung der Fahrzeuge zur Einhaltung der vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte auf der anderen Seite haben in den letzten Jahren zu einer rapide wachsenden Diskrepanz zwischen angegebenem Normverbrauch und tatsächlichen Verbrauchs- und Emissionswerten von Fahrzeugen geführt. Während im Jahr 2002 der reale Verbrauch etwa 9% über dem gemessenen lag, betrug diese Differenz im Jahr 2015 nach [Tie+16] durchschnittlich etwa 42%, wobei die größten Abweichungen im Premiumsegment auftraten. Nach [Ste+15] führen die langen Totzeiten und vielen Stopps im NEFZ zu einem unrealistisch hohen Einfluss verbrauchs-optimierender Maßnahmen wie Start-Stopp-Automatik, Direkteinspritzung und Downsizing, die in diesem Fahrzeugsegment üblich sind. Von der Einführung des dynamischeren WLTP wird eine Reduktion der Diskrepanz der Verbrauchswerte auf etwa 23% im Jahr 2020 erwartet. Dies liegt 26% unter dem für den NEFZ erwarteten Wert [Tie+16], zeigt aber auch, dass das Profil die Realität ebenfalls nicht abbildet.

Vorteile des WLTP gegenüber dem NEFZ sind neben einer geringeren Totzeit und einer verminderten Anzahl an Stopps, die höheren Beschleunigungswerte, die Abdeckung eines größeren Beschleunigungsspektrums sowie gesteigerte Anteile mit Beschleunigung und Verzögerung, also ein deutlich dynamischeres Geschwindigkeitsprofil [Ste+15]. Nachteilig ist laut [ZRF17] die schlechtere Reproduzierbarkeit durch schnelle Wechsel zwischen Bremsen und Beschleunigen und die Berechnung von Schaltpunkten abhängig von der benötigten Antriebsleistung bei manuellem Getriebe, die zu unfahrbaren Betriebspunkten führen kann, während die Gangwahl beim NEFZ fest vorgegeben wird und stattdessen zu unrealistischen Drehzahl- und Lastbereichen

führen.

Der Common Artemis Driving Cycle (CADC) gilt als realitätsnaher Fahrzyklus. Er ist in die Bereiche Stadt, Land und Autobahn unterteilt und beruht auf aus realen Fahrprofilen extrahierten Fahrsequenzen [Bra12]. Die maximal auftretenden Beschleunigungswerte aller drei Bereiche liegen über denen des WLTP, die Verzögerungswerte sogar deutlich. Dies gilt analog für die in Tabelle D.9 ebenfalls gezeigten Werte einer realen Testfahrt aus [Bra12].

In Europa sollen zukünftig zusätzlich insbesondere die Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionen außerhalb des Labors mittels Messungen bei realen Fahrten (Real Drive Emissions, RDE) bestimmt werden. Diese müssen bestimmte Anteile an Stadt-, Überland- und Autobahnfahrten beinhalten und mindestens 16 km betragen [SB16]. Der Vergleich der Lastpunkte von realen Fahrten mit denen der genormten Fahrzyklen NEFZ und WLTP in [SB16] zeigt, dass ein deutlich größeres Spektrum an Lastpunkten abgefahren wird. Weiterhin beeinflussen Nebenverbraucher und Umgebungsbedingungen wie der Verkehr, die Straße und das Wetter die Ergebnisse.

Parameter	v_{max}	\bar{v}	a_{max}		\bar{a}		s_{ges}	t_{ges}
Einheit	$[\frac{km}{h}]$	$[\frac{km}{h}]$	$[\frac{m}{s^2}]$	$[\frac{m}{s^2}]$	$[\frac{m}{s^2}]$	$[\frac{m}{s^2}]$	[km]	[min]
NEFZ	120	33,6	1,04	-1,39	0,53	-0,82	11,03	19,67
WLTC	131,3	46,6	1,67	-1,5	0,41	-0,45	23,27	30
FTP75	91,2	34,1	1,5	-1,5	0,55	-0,62	17,77	31,2
CADC	57,7	17,7	2,86	-3,14	0,77	-0,79	4,87	16,55
urban								
CADC	111,5	57,5	2,36	-4,08	0,5	-0,53	17,27	18,03
road								
CADC	131,8	96,9	1,92	-3,36	0,41	-0,5	28,74	17,8
motor 130								
Testfahrt	117,7	33,8	2,41	-4,95	0,45	-0,52	47,21	80,66

Tabelle D.9.: Vergleich charakteristischer Merkmale verschiedener genormter Fahrzyklen und einer realen Testfahrt aus [Bra12]. Verglichen werden die maximal vorkommende sowie die durchschnittliche Geschwindigkeit v_{max} bzw. \bar{v} , die maximale und mittlere Beschleunigung a_{max} bzw. \bar{a} , der zurückgelegte Weg s_{ges} und die Zyklusdauer t_{ges} .

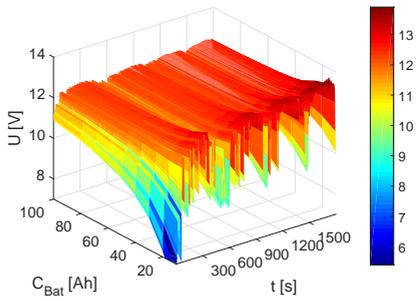
E. Weitere Ergebnisse der Design-Space-Exploration

E.1. Spannungsstabilität

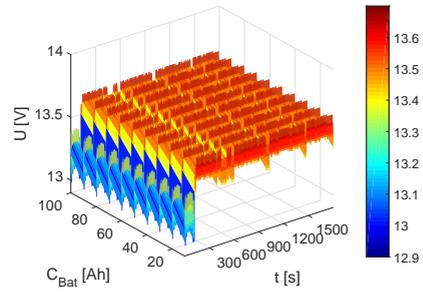
Abbildung E.1 zeigt die Spannungsverläufe über der Zeit aller betrachteten Stern- und Busentwürfe mit einer und zwei Batterien der Segment C Fahrzeuge, auch der instabilen. Die mit der Kapazität steigende Stabilität des Verbrennungsfahrzeugs links wird durch den signifikant geringeren Spannungseinbruch beim Start für höhere Kapazitätswerte oder Entwürfe mit mehreren Batterien deutlich. Dagegen zeigt der gezackte Verlauf der Sterntopologie des Elektrofahrzeugs in (b) die von der Position bestimmte Variation des Spannungsniveaus, während die Busentwürfe alle ähnliche Verläufe vorweisen.

Antrieb Fall	Default	VKM		E		
		max	min	Default	max	min
Topologie	Stern	Bus	Bus	Stern	Stern	Stern
Anzahl	1	3	4	1	1	1
Kapazität [Ah]	60	20	100	60	100	10
s_{emp}	2,173	2,196	2,025	0,71	0,815	0,653

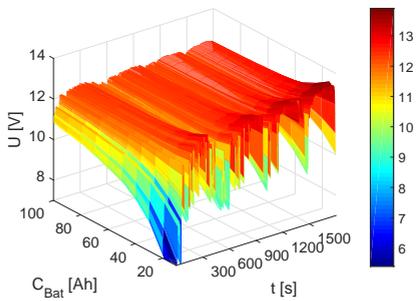
Tabelle E.1.: Segment A: Default, maximale und minimale Standardabweichung s_{emp}



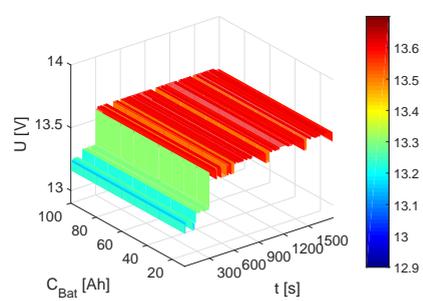
(a) VKM Stern



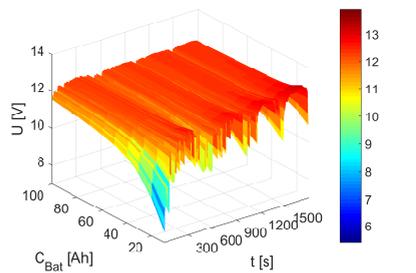
(b) el Stern



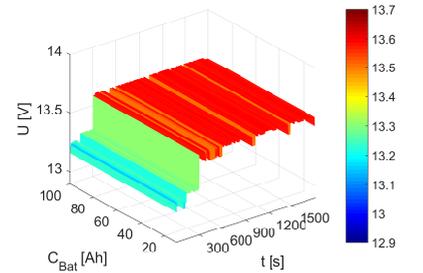
(c) VKM Bus, 1 Batterie



(d) el Bus, 1 Batterie



(e) Spannungsverlauf VKM Bus, 2 Batterien



(f) Spannungsverlauf el Bus, 2 Batterien

Abbildung E.1.: Spannungsverläufe des Segment C Fahrzeugs für die Cluster Stern und Bus mit einer Batterie, sowie zwei Batterien

Antrieb		VKM		E		
Fall	Default	max	min	Default	max	min
Topologie	Stern	Stern	Bus	Stern	Stern	Stern
Anzahl	1	1	4	1	1	1
Kapazität [Ah]	60	70	80	60	100	10
s_{emp}	1,43	1,449	1,371	0,779	0,878	0,726

Tabelle E.2.: Segment J,F: Default, maximale und minimale Standardabweichung s_{emp}

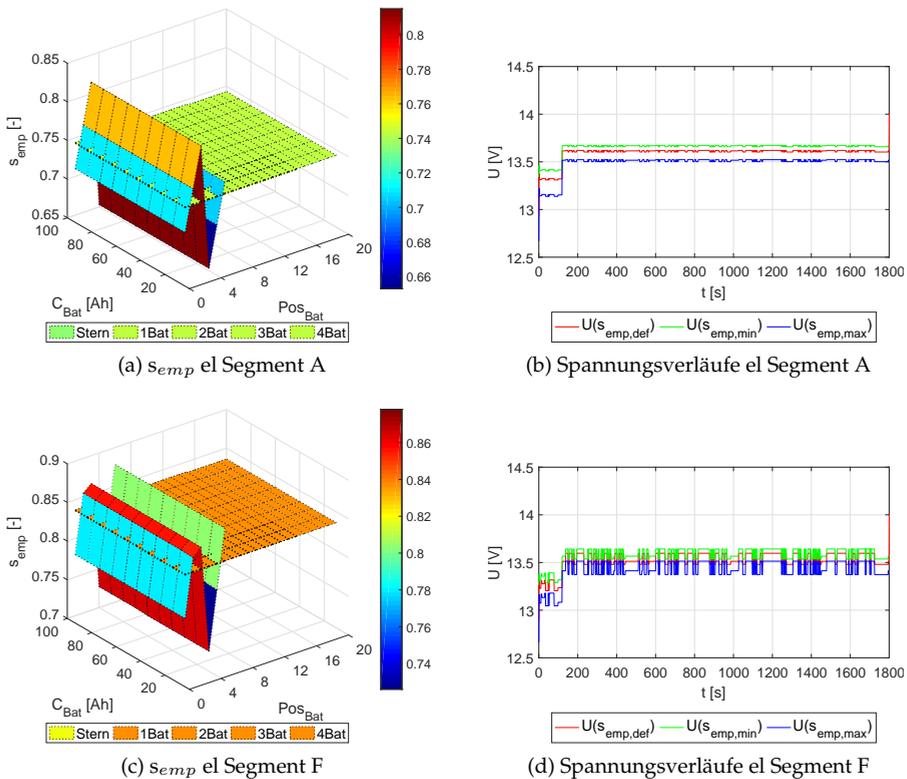


Abbildung E.2.: Standardabweichung aller stabilen Entwürfe und ausgewählte Spannungsverläufe der Elektrofahrzeuge Segment A und F

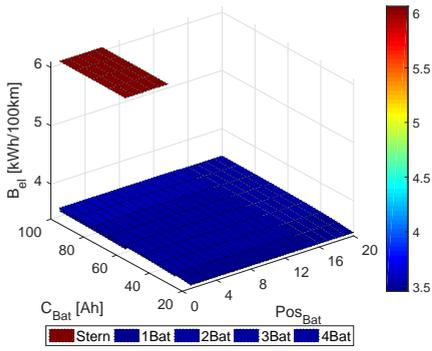
E.2. Energieverbrauch

Antrieb Fall	Default	VKM		E		
		max	min	Default	max	min
Topologie	Stern	Stern	Bus	Stern	Stern	Bus
Anzahl	1	1	3	1	1	1
Kapazität [Ah]	60	100	20	60	100	10
$B_{sFzg} [\frac{kWh}{100km}]$	62,83	62,95	53,58	18,648	18,7	16,622
$B_{sEl} [\frac{kWh}{100km}]$	6,049	6,063	3,456	3,721	3,753	1,999
$B_{sF} [\frac{kWh}{100km}]$	41,227	41,295	41,237	14,296	14,307	14,285
m_{EE} [kg]	6,491	10,386	6,431	5,709	7,929	2,824

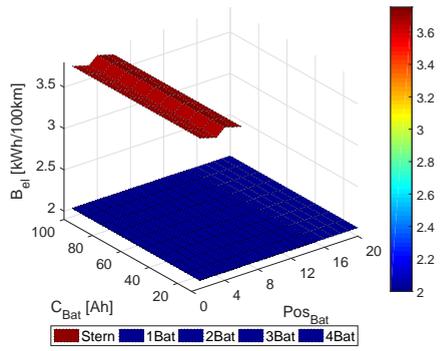
Tabelle E.3.: Segment A: Default, maximaler und minimaler Energieverbrauch des Fahrzeugs B_{sFzg} , der beinhaltete elektrische Verbrauch B_{sEl} , Fahrverbrauch B_{sF} , das Gewicht der Energieversorgung m_{El}

Antrieb Fall	Default	VKM		E		
		max	min	Default	max	min
Topologie	Stern	Stern	Bus	Stern	Stern	Bus
Anzahl	1	1	1	1	1	1
Kapazität [Ah]	60	100	70	60	100	10
$B_{sFzg} [\frac{kWh}{100km}]$	106,733	107,055	93,335	23,14	23,194	20,721
$B_{sEl} [\frac{kWh}{100km}]$	7,987	8,063	4,233	4,537	4,574	2,48
$B_{sF} [\frac{kWh}{100km}]$	78,209	78,259	78,218	17,833	17,845	17,821
m_{EE} [kg]	11,276	13,955	11,793	9,48	11,779	6,356

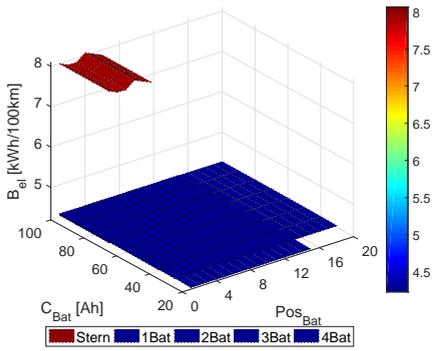
Tabelle E.4.: Segment J,F: Default, maximaler und minimaler Energieverbrauch des Fahrzeugs B_{sFzg} , der beinhaltete elektrische Verbrauch B_{sEl} , Fahrverbrauch B_{sF} , das Gewicht der Energieversorgung m_{El}



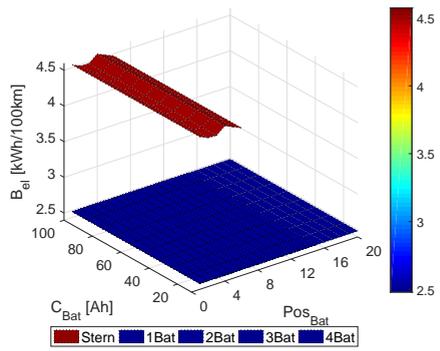
(a) B_{sEl} VKM Segment A



(b) B_{sEl} el Segment A

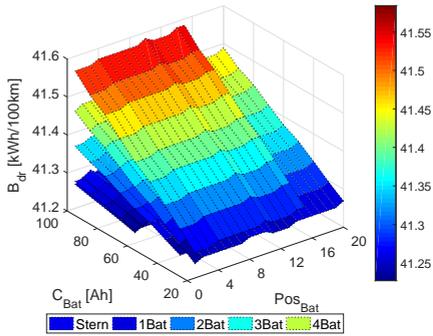


(c) B_{sEl} VKM Segment J

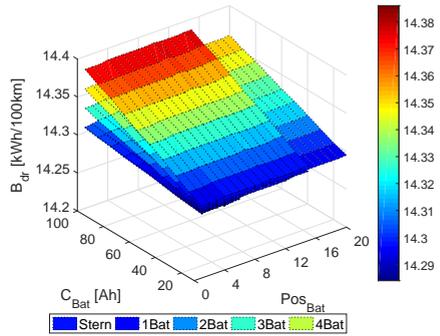


(d) B_{sEl} el Segment F

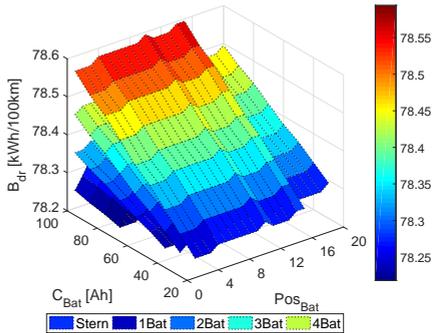
Abbildung E.3.: Elektrischer Energieverbrauch



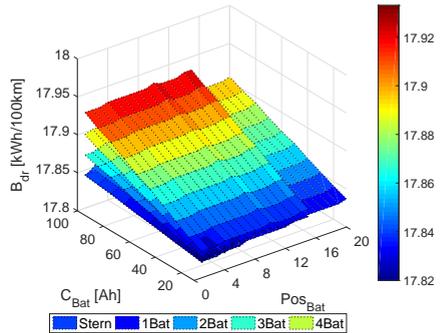
(a) B_{sF} VKM Segment A



(b) B_{sF} el Segment A



(c) B_{sF} VKM Segment J



(d) B_{sF} el Segment F

Abbildung E.4.: Gewichtsabhängiger Fahrverbrauch

E.3. Kosten

Antrieb	Default	VKM		E		
		max	min	Default	max	min
Topologie	Stern	Bus	Stern	Stern	Bus	Stern
Anzahl	1	4	1	1	4	1
Kapazität [Ah]	60	100	60	60	100	10
c_{El} [€]	293,9	1746,5	293,9	260,0	1606,3	121,2
c_L [€]	123,98	256,4	123,98	90,14	154,99	90,14
c_{Si} [€]	0,25	349,02	0,25	0,22	310,24	0,22
c_{Ba} [€]	169,62	1141,1	169,62	169,62	1141,1	30,84

Tabelle E.5.: Segment A: Default, maximale und minimale Materialkosten Energieversorgungsnetz c_{El} und dessen Bestandteile – Leitungen c_L , Sicherungselemente c_{Si} und Batterien c_{Ba} .

Antrieb	Default	VKM		E		
		max	min	Default	max	min
Topologie	Stern	Bus	Stern	Stern	Bus	Stern
Anzahl	1	4	1	1	4	1
Kapazität [Ah]	60	100	70	60	100	10
c_{El} [€]	515,2	2171,8	546,1	431,4	1962,9	292,6
c_L [€]	345,26	548,67	345,26	261,46	384,15	261,46
c_{Si} [€]	0,35	481,98	0,35	0,32	437,66	0,32
c_{Ba} [€]	169,62	1141,1	200,46	169,62	1141,1	30,84

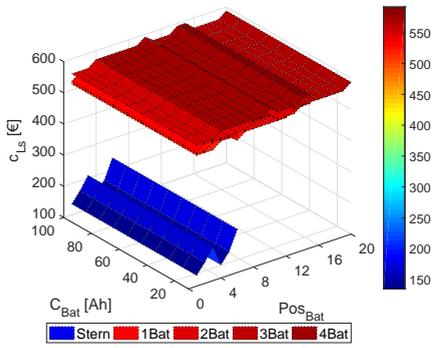
Tabelle E.6.: Segment J,F: Default, maximale und minimale Materialkosten Energieversorgungsnetz c_{El} und dessen Bestandteile – Leitungen c_L , Sicherungselemente c_{Si} und Batterien c_{Ba} .

Antrieb Fall	Default	VKM		Default	E	
		max	min		max	min
Topologie	Stern	Stern	Bus	Stern	Stern	Bus
Anzahl	1	1	1/2/3	1	1	1/2/ 3/4
Kapazität [Ah]	60	80-100	60 / 30 / 20	60	10-100	10-90/ 10-40/ 10-20/ 10
$c_{spec} [\frac{\text{€}}{100km}]$	10,08	10,1	8,6	5,35	5,36	4,77
$G_{CO_2} [\frac{gCO_2}{km}]$	169,5	169,82	144,54	99,76	100,02	88,93
$c_{CO_2} [€]$	8610	8627	6237	1938	1959	913
$c_{TCO} [€]$	25779	26036	21406	8285	8423	7834

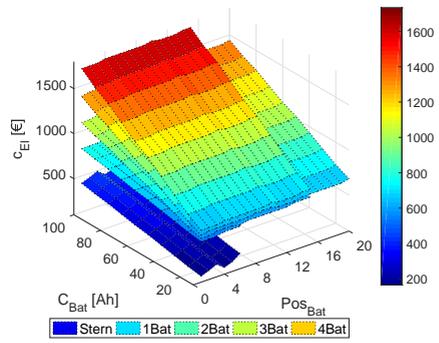
Tabelle E.7.: Segment A: Default, maximale und minimale spezifische Energiekosten c_{spec} , Emissionswerte G_{CO_2} , -strafen c_{CO_2} und TCO c_{TCO} .

Antrieb Fall	Default	VKM		Default	E	
		max	min		max	min
Topologie	Stern	Stern	Bus	Stern	Stern	Bus
Anzahl	1	1	1 / 2	1	1	1
Kapazität [Ah]	60	100	70-80 / 40	60	10-100	10
$c_{spec} [\frac{\text{€}}{100km}]$	17,13	17,18	14,98	6,64	6,65	5,94
$G_{CO_2} [\frac{gCO_2}{km}]$	287,93	288,8	251,79	123,8	124,09	110,86
$c_{CO_2} [€]$	14958	15032	11523	741	764	0
$c_{TCO} [€]$	44347	44651	37965	10391	10533	9649

Tabelle E.8.: Segment J,F: Default, maximale und minimale spezifische Energiekosten c_{spec} , Emissionswerte G_{CO_2} , -strafen c_{CO_2} und TCO c_{TCO} .

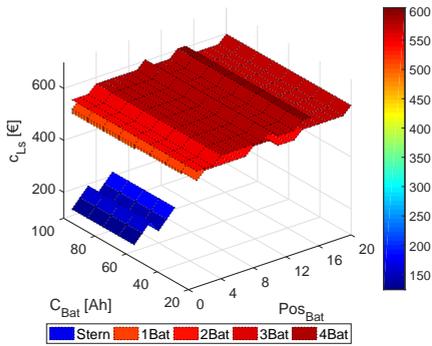


(a) Materialkosten Leitungssatz

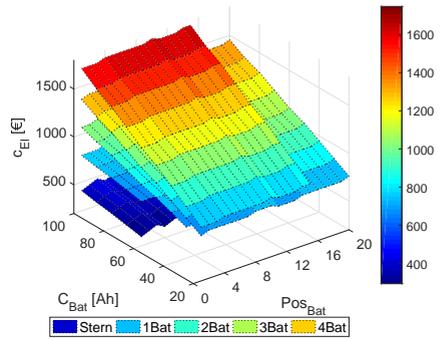


(b) Materialkosten Energieversorgungsnetz

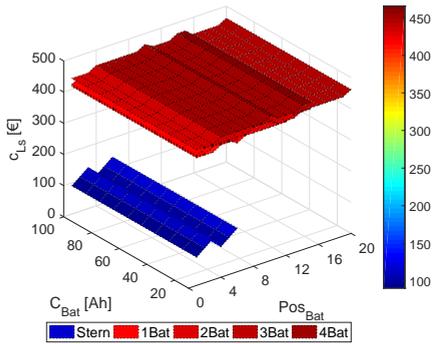
Abbildung E.5.: Segment C: Design-Space-Exploration Materialkosten, el



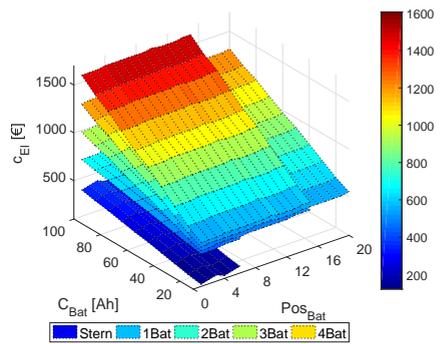
(a) Materialkosten Leitungssatz VKM



(b) Materialkosten Energieversorgungsnetz VKM

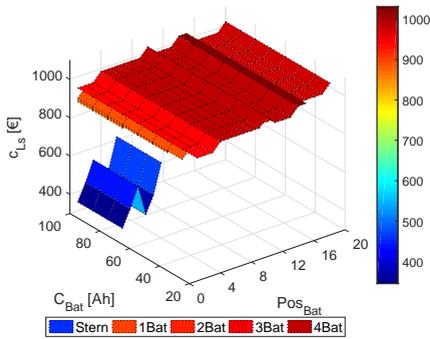


(c) Materialkosten Leitungssatz el

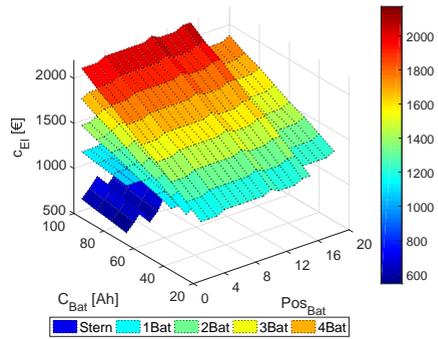


(d) Materialkosten Energieversorgungsnetz el

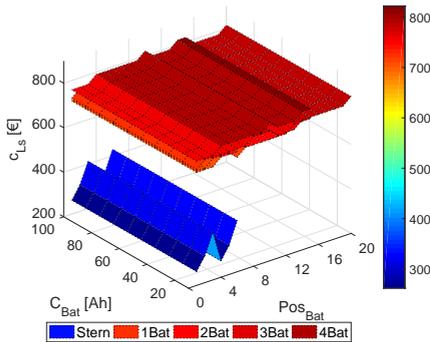
Abbildung E.6.: Segment A: Design-Space-Exploration Materialkosten



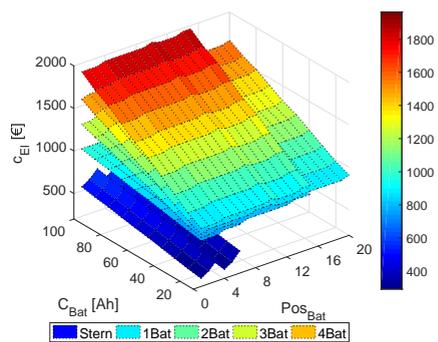
(a) Materialkosten Leitungssatz VKM



(b) Materialkosten Energieversorgungsnetz VKM



(c) Materialkosten Leitungssatz el



(d) Materialkosten Energieversorgungsnetz el

Abbildung E.7.: Segment J,F: Design-Space-Exploration Materialkosten

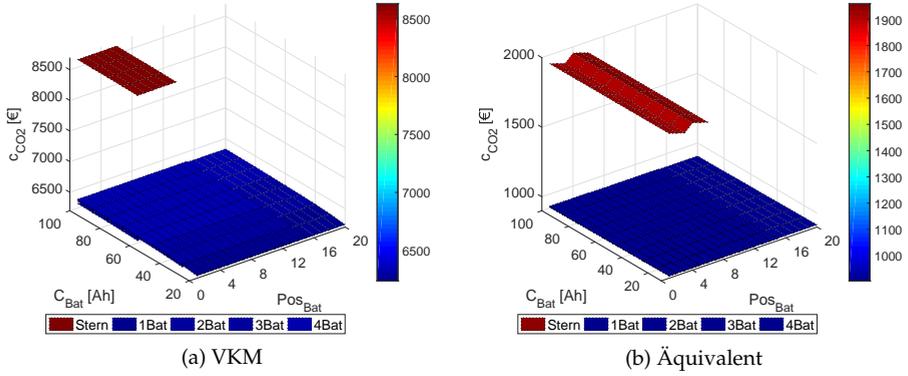


Abbildung E.8.: Segment A: Design-Space-Exploration Emissionsstrafen

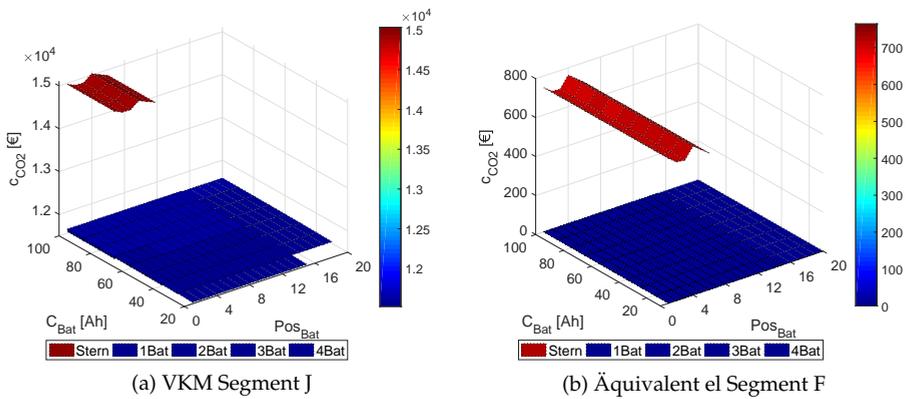


Abbildung E.9.: Segment J,F: Design-Space-Exploration Emissionsstrafen

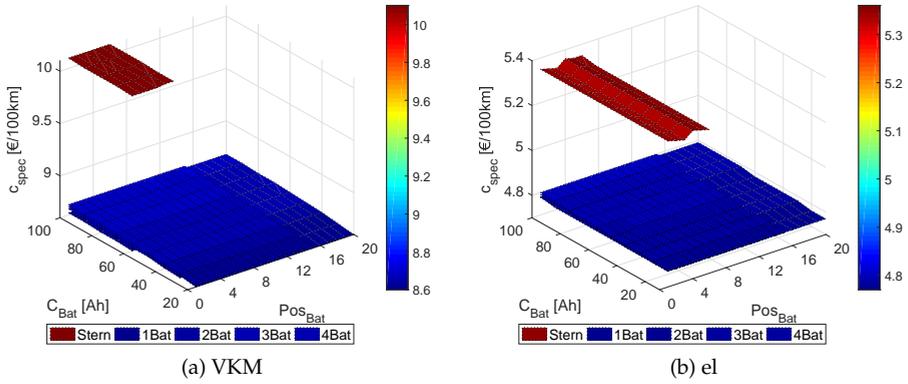


Abbildung E.10.: Segment A: Design-Space-Exploration spezifische Energiekosten c_{spec} pro 100km

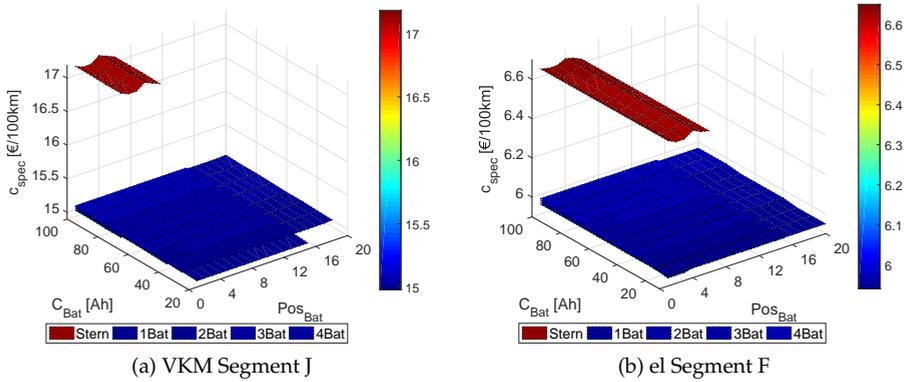


Abbildung E.11.: Segment J,F: Design-Space-Exploration spezifische Energiekosten c_{spec} pro 100km

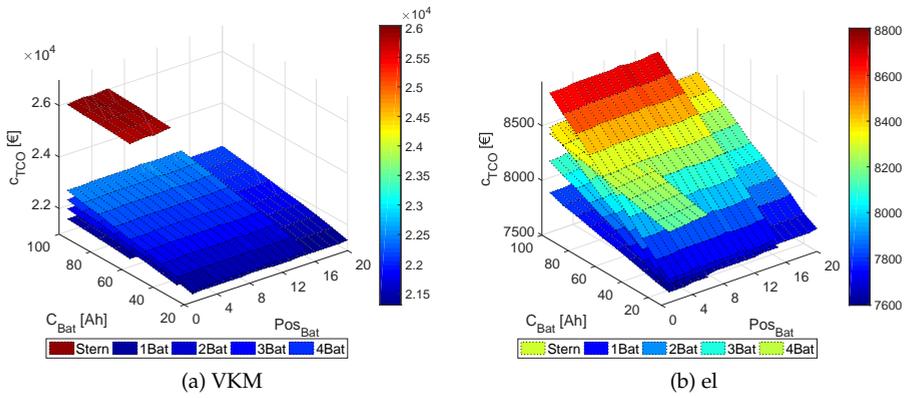


Abbildung E.12.: Segment A: Design-Space-Exploration TCO c_{TCO} für 150.000km Laufleistung

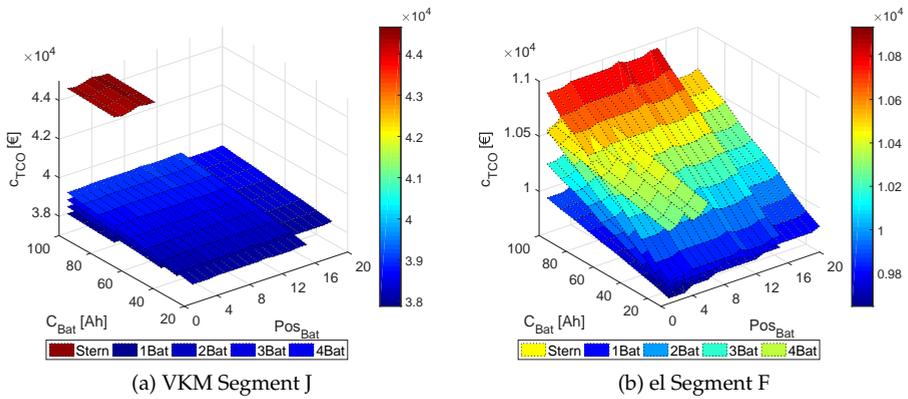


Abbildung E.13.: Segment J,F: Design-Space-Exploration TCO c_{TCO} für 150.000km Laufleistung

E.4. Weitere Paretofronten und Parameterkombinationen

In den in diesem Kapitel abgebildeten Parameterkombinationen der betrachteten Paretofronten werden die drei Parameter Kapazität, Anzahl und Position der Batterien abgebildet. Die Unterscheidung der Topologien erfolgt mit Hilfe von Farben. Die Kapazität und Anzahl der Batterien liefert direkt abbildbare Zahlen. Zur Darstellung der Position werden die Indizes der Positionspunkte herangezogen. Da sechs mögliche Positionen betrachtet wurden und auf jeder Position nur eine Batterie platziert werden kann, gehen die Indizes für die erste Batterie von eins bis sechs, der zweiten von eins bis fünf, der dritten von eins bis vier und der vierten von eins bis drei. Daraus ergeben sich die Positionsnummern zwischen 1000 und 6000.

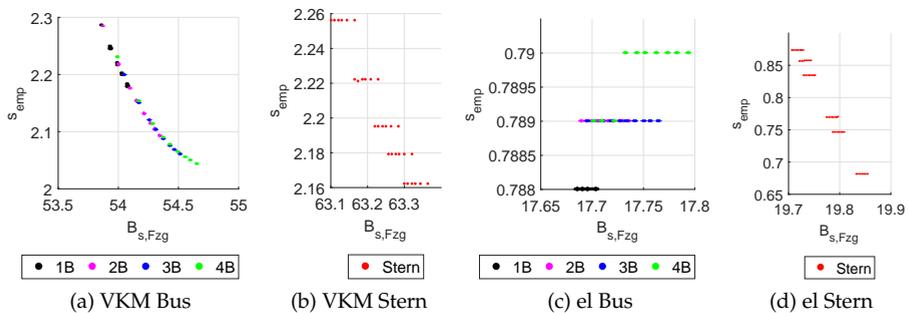


Abbildung E.14.: Segment C: Abhängigkeit Standardabweichung Spannung und Energieverbrauch Fahrzeug

Die Standardabweichung in Abbildung E.15 sinkt für die Busentwürfe des Verbrennungsfahrzeugs in (a) proportional mit zunehmendem elektrischen Verbrauch. Dasselbe gilt für das Sterncluster in (b). Die Standardabweichung des Sternclusters des Elektrofahrzeugs in (d) sinkt ebenfalls proportional zum Verbrauch. Die Buscluster in (c) zeigen dagegen eine minimale Zunahme der Standardabweichung mit der Kapazität, die durch die Punktebildung innerhalb eines Clusters teilweise in zwei Betriebspunkten resultiert. Der abweichende Verbrauch der Buscluster spiegelt die Verluste durch die zusätzlichen Sicherungselemente wieder.

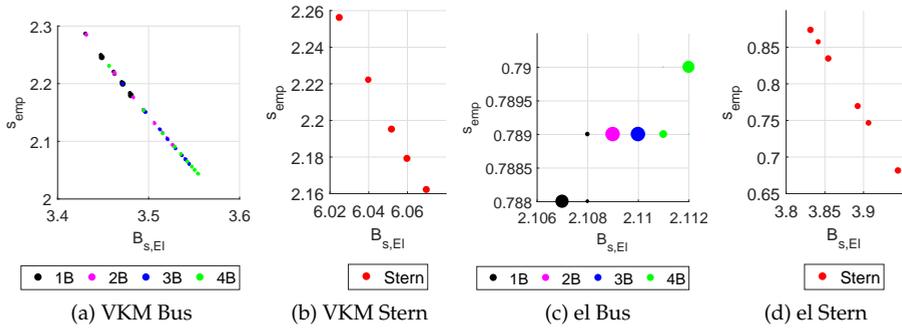


Abbildung E.15.: Segment C: Abhängigkeit zwischen Standardabweichung und dem elektrischen Verbrauch

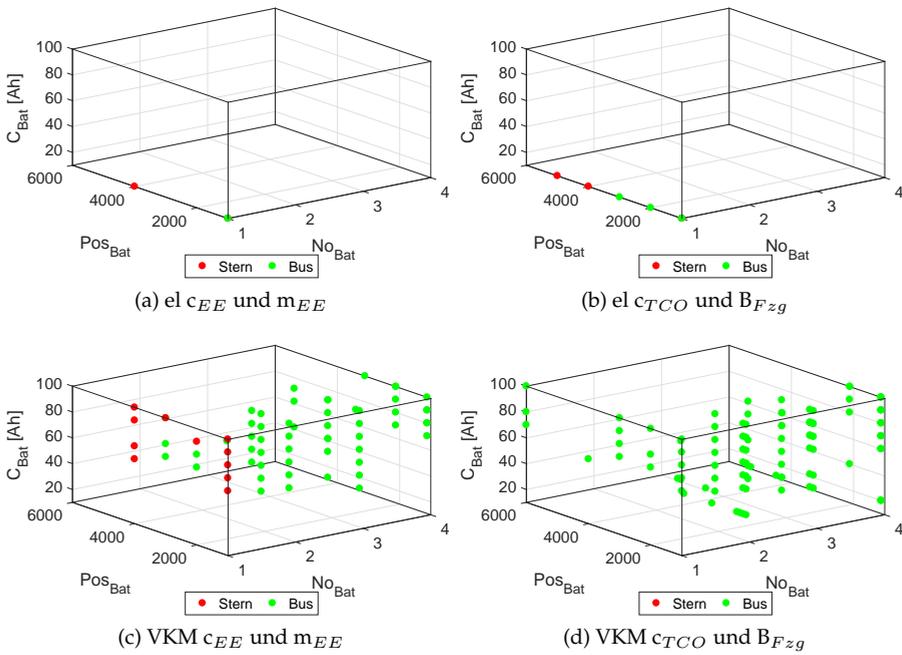


Abbildung E.16.: Segment C: Parameter der Paretofront der KPIs Spannungsstabilität mit Gewicht und Materialkosten respektive Energieverbrauch und TCO

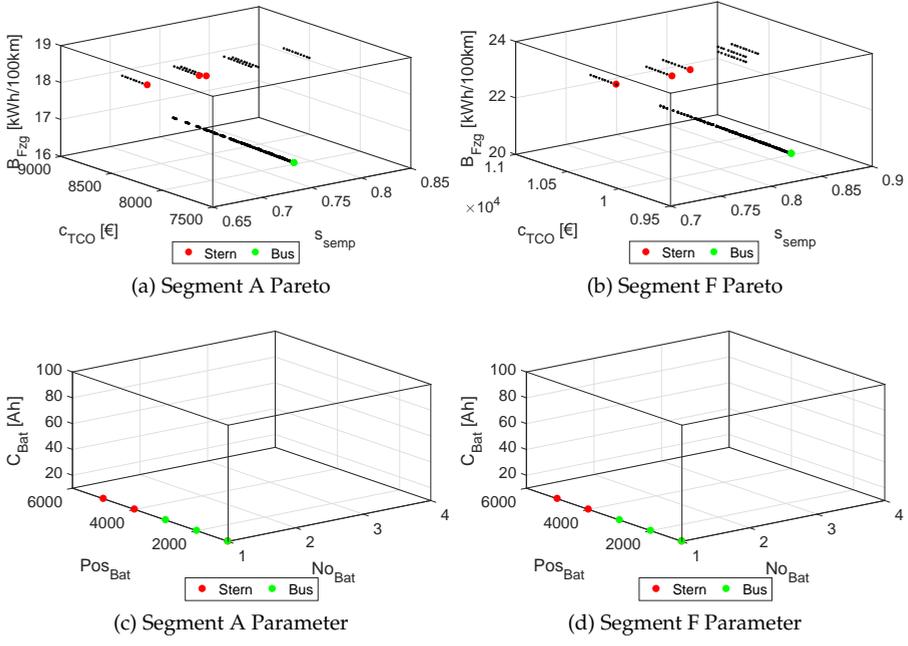


Abbildung E.17.: Elektrofahrzeuge Segment A und F: Paretofront und Parameter der KPIs Spannungsstabilität, Energieverbrauch und TCO

	Stern	Bus 1B	Bus 2B	Bus 3B	Bus 4B
A vkm	60-100	-	60-100	40-50/ 70-100	40-100
C vkm	60-100	-	60-100	40-100	40-100
F vkm	70-100	-	70-90	40-90	30-50 / 70-90

Tabelle E.9.: Hinsichtlich der Materialkosten Pareto-optimale Batteriekapazitätswerte der Cluster

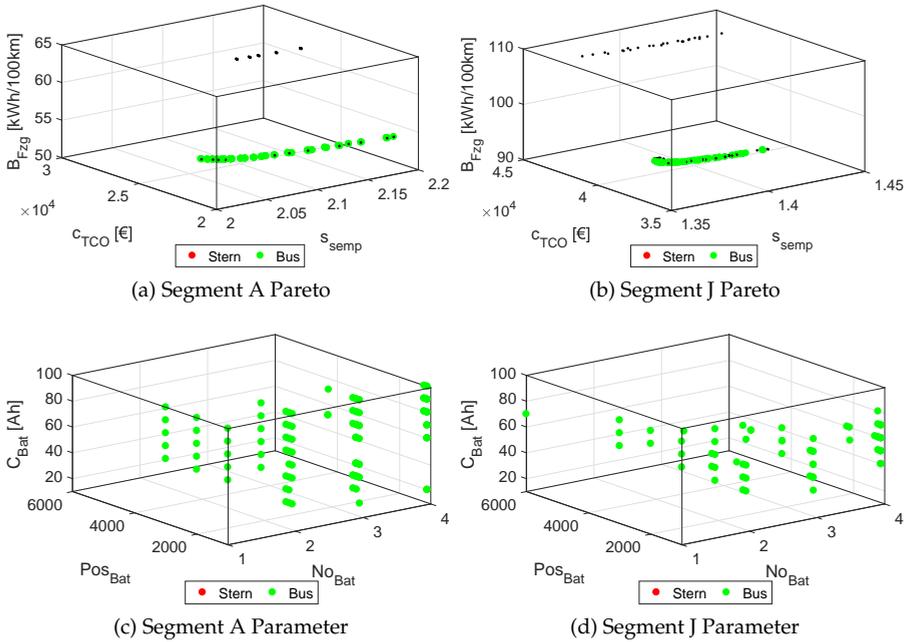
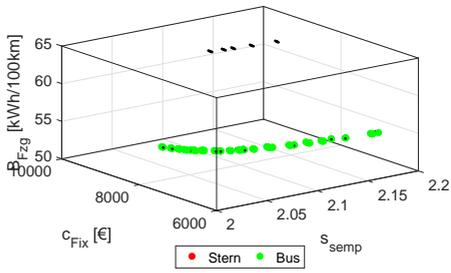


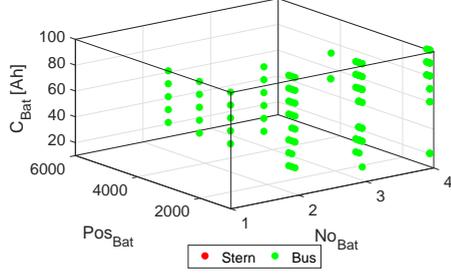
Abbildung E.18.: Verbrennungsfahrzeuge Segment A und J: Paretofront und Parameter der KPIs Spannungsstabilität, Energieverbrauch und TCO

	Stern	Bus 1B	Bus 2B	Bus 3B	Bus 4B
A vkm	-	60-100	30-100	20-50/ 70-100	50-100
C vkm	-	60-100	30-100	40-50 / 70-100	20 / 50-100
F vkm	-	70/ 90-100	40-70	30 / 50 / 80-90	20-50 / 70-90

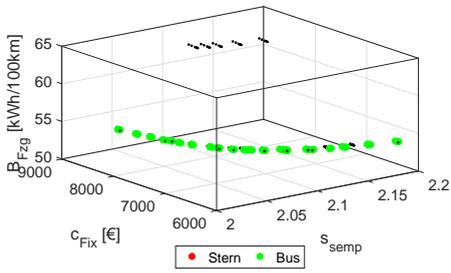
Tabelle E.10.: Hinsichtlich der TCO Pareto-optimale Batteriekapazitätswerte der Cluster



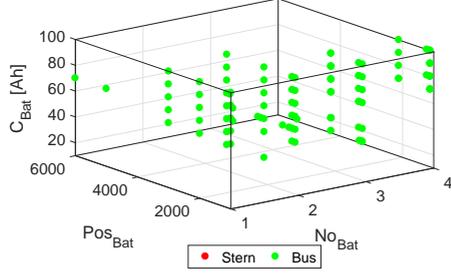
(a) Segment A VKM



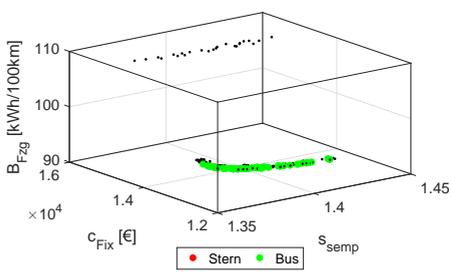
(b) Segment A VKM



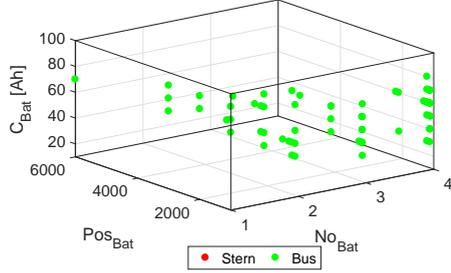
(c) Segment C VKM



(d) Segment C VKM

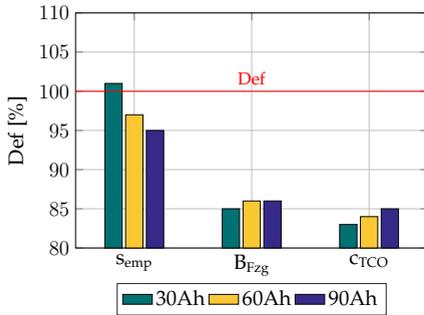


(e) Segment J VKM

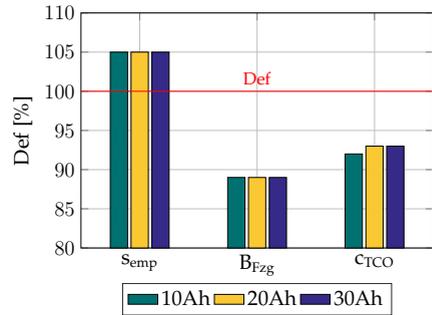


(f) Segment J VKM

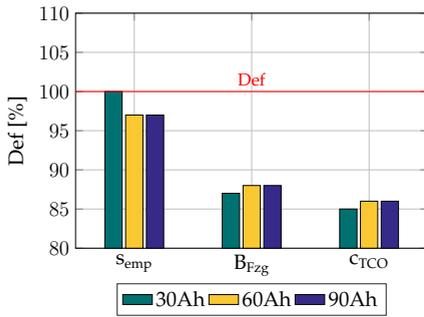
Abbildung E.19.: Paretofront und Parameter der KPIs Spannungsstabilität, Energieverbrauch und der Fixkosten der Verbrennungsfahrzeuge



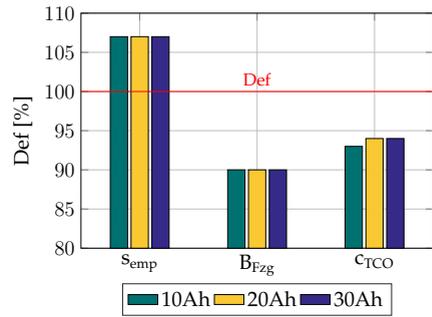
(a) Segment A VKM



(b) Segment A el



(c) Segment J VKM

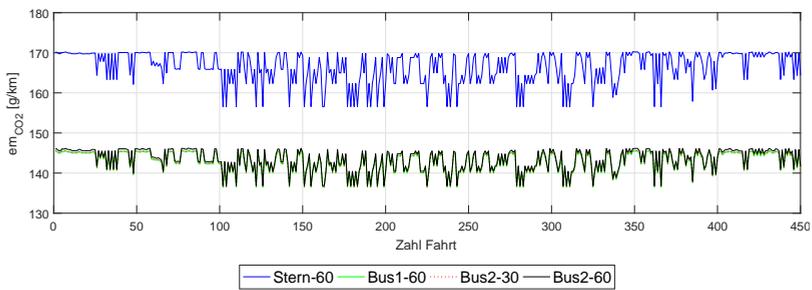


(d) Segment F el

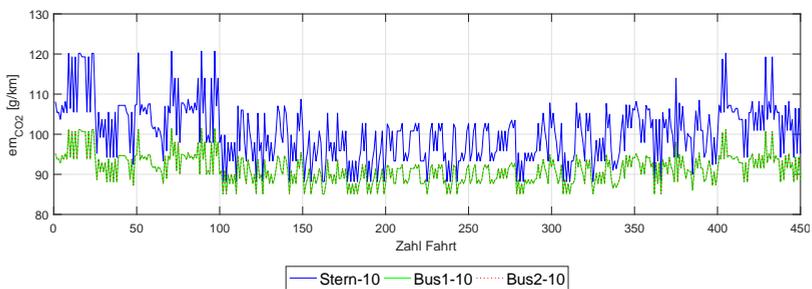
Abbildung E.20.: Veränderung der KPIs und Materialkosten dreier Bustopolgien mit zwei Batterien im Vergleich zum Default-Entwurf restliche Segmente

F. Betrachtung der Randbedingungen der Simulation

F.1. Weitere Umgebungsabhängigkeiten

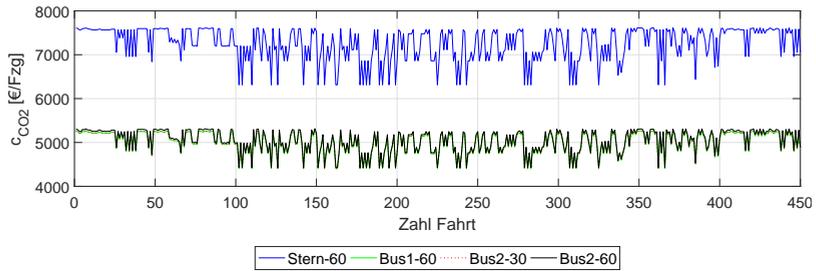


(a) VKM

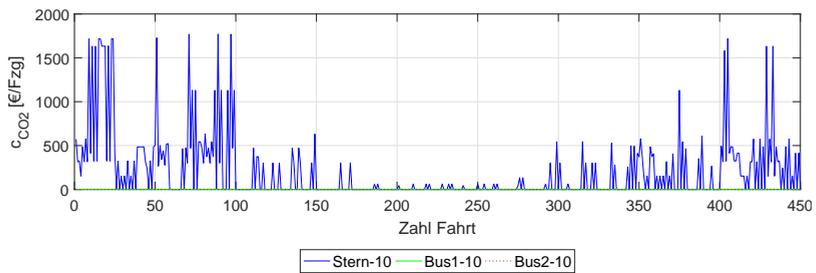


(b) el

Abbildung F.1.: Segment C: Spezifische Emissionen abhängig vom elektrischen Verbrauch der Pendelfahrten innerhalb eines Jahres

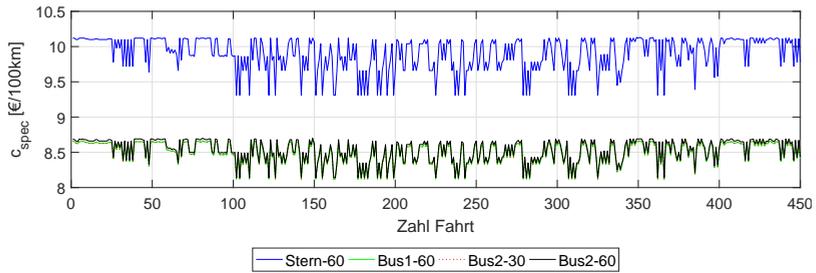


(a) VKM

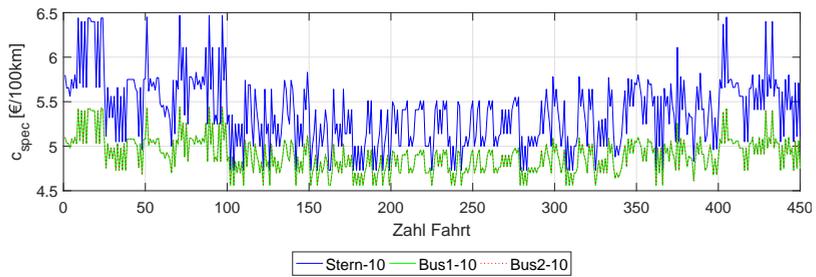


(b) el

Abbildung F.2.: Segment C: Potentielle Emissionsstrafen abhängig vom elektrischen Verbrauch der Pendelfahrten eines Jahres

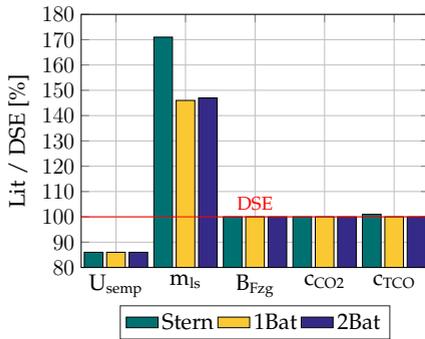


(a) VKM

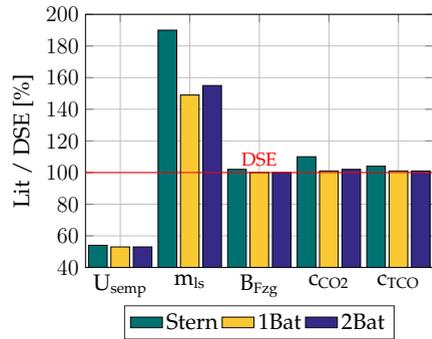


(b) el

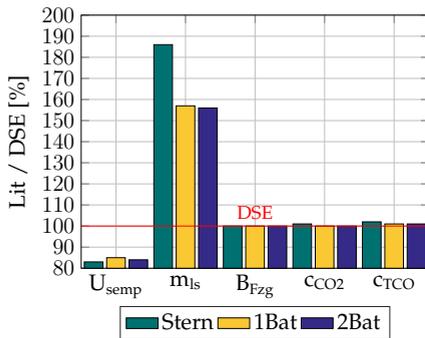
Abbildung E.3.: Segment C: Spezifische Kosten abhängig vom elektrischen Verbrauch der Pendelfahrten innerhalb eines Jahres



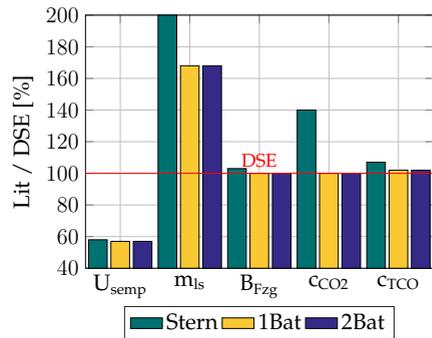
(a) VKM Segment A



(b) el Segment A



(c) VKM Segment J



(d) el Segment F

Abbildung F.4.: Veränderung verschiedener Optimierungsgrößen bei größeren Zuleitungsquerschnitten der Energiequellen Segment A,J,F

Abkürzungsverzeichnis

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AGM	Absorbent Glass Mat
App	Applikation: Software-Funktion
AUTOSAR	AUTomotive Open System ARchitecture
BDD	Block Definition Diagram
BSW	Basissoftware
CAN	Controler Area Network
CAN FD	CAN Flexible Datarate
CAN-B	lowspeed CAN
CAN-C	highspeed CAN
CE	Consumer Electronic
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DAS	Driver Assistance Systems
DSE	Design Space Exploration
E-mgm	Energiemanagement
E/E	Elektrik und Elektronik
ECU	Electronic Control Unit
EFB	Enhanced Flooded Battery
EPS	Electric Power Steering
FIT	Failure in Time
FuSi	funktionale Sicherheit
HV	Hochvolt
HW	Hardware
IBD	Internal Block Diagram
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KPI	Key Performance Indicator
KsK	kundenspezifischer Kabelsatz
Li	Lithium von Lithium-Ionen-Batterie

LIN	Local Interconnect Network
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
ODE	Ordinary Differential Equation
OEM	Original Equipment Manufacturer
OES	Original Equipment Supplier
PEP	Produktentstehungsprozess
ppm	parts per million
RDE	Real Drive Emissions
ROV	Rest Of Vehicle
RTE	Run Time Environment
SOC	State of Charge
SOP	Start of Production
Stern	betrachtete Sterntopologie mit einer Batterie
SW	Software
TCO	Total Cost of Ownership beziehungsweise Gesamtbetriebskosten
TTP/C	Time Triggered Protocol SAE Class C
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to everywhere
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VSCP	Vehicle type Specific Computing Platform
WLTC	Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures
xBat	betrachtete Bustopologie mit x=1...4 Batterien
ZGW	zentrales Gateway

Abbildungsverzeichnis

1.1. Zunahme an vernetzten Funktionen der E/E-Architektur am Beispiel verschiedener AUDI Fahrzeugreihen	2
1.2. Entwicklung der Anzahl von Steuergeräten, Signalen und benötigter Bandbreite am Beispiel der Mercedes E-Klasse Modelle	2
2.1. Beispiel Kommunikationsnetz des BMW 7er F01 Modells von 2008	10
2.2. Schematischer Aufbau der Energieversorgung eines Verbrennungsfahrzeugs	17
2.3. Definierte Spannungsbereiche des 48V Systems	23
2.4. Ragone-Diagramm von Zellen gebräuchlicher Akkumulatoren	25
2.5. Produktentstehungsprozess bei Mercedes-Benz-Cars	29
2.6. V-Modell als Grundlage der Entwicklung von E/E-Systemen	29
2.7. Ebenen-Zuordnung verschiedener Module der Basissoftware von AUTOSAR	31
2.8. Entwicklung der Zahl an Modellreihen im deutschen Pkw-Markt seit 1995	32
3.1. Stakeholder Requests E/E-Architektur	37
3.2. Stakeholder Requests IKT	38
3.3. Stakeholder Requests Energieversorgung	39
4.1. Ausschnitt aus dem SysML Blockdiagramm zur Klassifizierung von Gleichstromquellen für 12 V	57
4.2. Domänenmodell mit den Elementen der Ebenen IX Infrastruktur bis VI Netzwerk	59
4.3. Ausschnitt der unteren Ebenen des Domänenmodells	61
5.1. Das Prinzip der Dominanz am Beispiel des Zielpunktes \hat{x} im Zielgrößenraum	65
5.2. Fünf verschiedene Spannungsverläufe, ihre zugehörige Standardabweichung und Varianzkoeffizient zum Mittelwert, Standardabweichung zu 14,3V und Gütewert zur Bewertung der Stabilität	69

5.4. Zusammenhang zwischen logischem und physischem Netzwerk in einer klassischen E/E-Architektur	76
5.5. Zusammenhang zwischen logischem und physischem Netzwerk in einer IKT-Plattform	77
6.1. Fahrprofil des genormten Fahrzyklus WLTC und die zugehörige Beschleunigungsverteilung	87
6.2. Lastkurven Winter- und Sommer-Szenario C-Segment-Fahrzeug	89
6.3. Zeitanteil von Nachtfahrten morgens und abends	89
6.4. Temperaturwerte für morgens und abends	89
6.5. Batteriemodelle	92
6.6. Hinterlegtes thermisches Modell der Li-Ionen Batterie	93
6.7. Die hinterlegte Generatorkennlinie und der zugehörige maximale Stromverlauf	94
6.8. Das modellierte Ersatzschaltbild des DC/DC-Wandlers und die geregelte Ausgangstromkennlinie	95
6.9. Graph mit $n \times m$ Kanten und Knoten generiert feste Positionen und vorgegebene Wege für das Routing	97
6.10. Beispiel eines Stern- beziehungsweise Busentwurfs eines Verbrennungsfahrzeugs	98
6.11. Beispiel: Dreidimensionale Abbildung eines 5D-Kennfeldes und Darstellung von Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Optimierungsgroßen mit Hilfe von 2D-Punktwolken	101
7.1. Segment C: Standardabweichung aller stabilen Entwürfe und zugehörige Spannungsverläufe für Default, minimale und maximale Standardabweichung des Verbrennungsfahrzeugs	104
7.2. Segment C: Standardabweichung aller stabilen Entwürfe und zugehörige Spannungsverläufe für Default, minimale und maximale Standardabweichung des Elektrofahrzeugs	105
7.3. Segment C: Design Space Exploration elektrischer Energieverbrauch	106
7.4. Segment C: Design Space Exploration gewichtsabhängiger Fahrverbrauch für Vortrieb	107
7.5. Segment C: Design Space Exploration Energieverbrauch	108
7.6. Segment C: Design Space Exploration Materialkosten, VKM . .	110
7.7. Segment C: Design Space Exploration Emissionsstrafen	111
7.8. Segment C: Design Space Exploration spezifische Energiekosten	112
7.9. Segment C: Design Space Exploration TCO	113
7.10. Segment C: Abhängigkeit Standardabweichung und Energieverbrauch	114

7.11. Segment C: Abhängigkeit Standardabweichung und TCO	114
7.12. Segment C: Abhängigkeit Energieverbrauch und TCO	115
7.13. Segment C: Paretofront der KPIs Spannungsstabilität mit Gewicht und Materialkosten beziehungsweise Energieverbrauch und TCO	116
7.14. Segment C: Abhängigkeit zwischen Standardabweichung und den Materialkosten des Energieversorgungsnetzes	117
7.15. Segment C: Abhängigkeit zwischen Emissionsstrafen und elektrischem Verbrauch sowie Gewicht	118
7.16. Standardabweichung aller stabilen Entwürfe und ausgewählte Spannungsverläufe der Verbrennungsfahrzeuge Segment A und J	120
8.1. Veränderung der KPIs dreier Busentwürfe mit zwei Batterien im Vergleich zum Default-Entwurf	125
8.2. Segment C: Verlauf des elektrischen Verbrauchs der Pendelfahrten innerhalb eines Jahres	127
8.3. Segment C: Spannweite der potentiellen Emissionsstrafen der Pendelfahrten eines Jahres	128
8.4. Segment C: TCO Spannweite der Pendelfahrten eines Jahres	128
8.5. Segment C: Spannweite Standardabweichung der Pendelfahrten eines Jahres	128
8.6. Verhältnis des maximalen und minimalen Unterschieds des WLTP zum NEFZ für einen Busentwurf mit zwei Batterien	129
8.7. Veränderung verschiedener Optimierungsgrößen bei größeren Zuleitungsquerschnitten der Energiequellen Segment C	131
8.8. Veränderung verschiedener Optimierungsgrößen bei der Verwendung von Halbleitern im Sterncluster Segment C	133
8.9. Zusammensetzung der Stückkosten Segment C	137
B.1. Hintergrund-Verteilung der befragten Experten	159
B.2. Allgemeine Anforderungen der Experten an die E/E-Architektur	161
B.3. Anforderungen der Experten an die IKT	162
B.4. Anforderungen der Experten an die Energieversorgung	162
D.1. Lastkurven Winter-Szenario der Segmente A, J und F	177
E.1. Spannungsverläufe des Segment C Fahrzeugs für die Cluster Stern und Bus mit einer Batterie, sowie zwei Batterien	184
E.2. Standardabweichung aller stabilen Entwürfe und ausgewählte Spannungsverläufe der Elektrofahrzeuge Segment A und F	185
E.3. Elektrischer Energieverbrauch	187

E.4. Gewichtsabhängiger Fahrverbrauch	188
E.5. Segment C: Design-Space-Exploration Materialkosten, el	191
E.6. Segment A: Design-Space-Exploration Materialkosten	192
E.7. Segment J,F: Design-Space-Exploration Materialkosten	193
E.8. Segment A: Design-Space-Exploration Emissionsstrafen	194
E.9. Segment J,F: Design-Space-Exploration Emissionsstrafen	194
E.10. Segment A: Design-Space-Exploration spezifische Energiekosten	195
E.11. Segment J,F: Design-Space-Exploration spezifische Energiekos- ten	195
E.12. Segment A: Design-Space-Exploration TCO	196
E.13. Segment J,F: Design-Space-Exploration TCO	196
E.14. Segment C: Abhängigkeit Standardabweichung Spannung und Energieverbrauch Fahrzeug	197
E.15. Segment C: Abhängigkeit zwischen Standardabweichung und dem elektrischen Verbrauch	198
E.16. Segment C: Parameter der Paretofront der KPIs Spannungssta- bilität mit Gewicht und Materialkosten respektive Energiever- brauch und TCO	198
E.17. Elektrofahrzeuge Segment A und F: Paretofront und Parameter der KPIs Spannungsstabilität, Energieverbrauch und TCO	199
E.18. Verbrennungsfahrzeuge Segment A und J: Paretofront und Pa- rameter der KPIs Spannungsstabilität, Energieverbrauch und TCO	200
E.19. Paretofront und Parameter der KPIs Spannungsstabilität, Ener- gieverbrauch und der Fixkosten der Verbrennungsfahrzeuge	201
E.20. Veränderung der KPIs und Materialkosten dreier Bustopologi- en mit zwei Batterien im Vergleich zum Default-Entwurf rest- liche Segmente	202
F.1. Segment C: Spezifische Emissionen abhängig vom elektrischen Verbrauch der Pendelfahrten innerhalb eines Jahres	203
F.2. Segment C: Potentielle Emissionsstrafen abhängig vom elektri- schen Verbrauch der Pendelfahrten eines Jahres	204
F.3. Segment C: Spezifische Kosten abhängig vom elektrischen Ver- brauch der Pendelfahrten innerhalb eines Jahres	205
F.4. Veränderung verschiedener Optimierungsgrößen bei größeren Zuleitungsquerschnitten der Energiequellen Segment A,J,F	206

Tabellenverzeichnis

2.1. Im Fahrzeug eingesetzte Bussysteme	11
2.2. Vergleich verschiedener Kennwerte von Halbleiterschaltern mit Schmelzsicherungen oder Relais	18
2.3. Möglichkeiten der Klassifizierung elektrischer Verbraucher . . .	19
3.1. Experteninterview: Geführte Interviews und befragte Personen	36
3.2. Vergleich der jährlichen Steuern und Fahrkosten zweier Benz- infahrzeuge mit einer Elektrolimousine	44
4.1. Hierarchische Dekomposition der E/E-Architektur	58
5.1. Mögliche Freiheiten der Senken und deren Abhängigkeiten . .	79
5.2. Mögliche Freiheiten in der Auslegung von Energiespeichern . .	80
5.3. Mögliche Freiheiten der Leistungsverteilung und Absicherung .	81
5.4. Mögliche Freiheiten der Energieübertragung	82
5.5. Betrachtete Entwurfsvariablen zur Generierung der Entwürfe .	83
7.1. Default, maximale und minimale Standardabweichung	106
7.2. Default, maximaler und minimaler Energieverbrauch des Fahr- zeugs	108
7.3. Angenommene Stückkosten	109
7.4. Default, maximale und minimale Materialkosten	110
7.5. Default, maximale und minimale spezifische Energiekosten, zu- gehörige Emissionswerte, -strafen und TCO	112
7.6. Mindestkapazität zur Einhaltung der Spannungsgrenzen	119
7.7. Vergleich zwischen Normverbrauch und Verbrauchswerte DSE	121
8.1. Kabelquerschnitte basierend auf den Randbedingungen der DSE130	
8.2. Kabelquerschnitte basierend auf den Literaturwerten des ma- ximal zulässigen Stroms	130
8.3. Vergleich zwischen den Verbrauchswerten eines Busentwurfs des C-Segments für NEFZ und WLTP im Jahresverlauf	135
8.4. Angenommene Absatzzahlen der sechs Fahrzeugmodelle	139

B.1.	Beispiel Ergebnismatrix zur Sammlung heutiger Anforderungen	160
B.2.	Beispielrechnung für die Berechnung der Prozentangaben für den Trend „autonomes Fahren“	160
C.1.	Grundlast Verbraucher: Beleuchtung	164
C.2.	Grundlast Verbraucher: Motoren, elektrische Pumpen, Lüfter und Steuerung	165
C.3.	Sicherheitsrelevante Verbraucher	166
C.4.	Komfort Verbraucher: Infotainment Telematik und sonstiges	167
C.5.	Komfort Verbraucher: Heizung und Klima (elektrisch)	168
D.1.	Fahrzeugdaten Elektrofahrzeuge als Grundlage der DSE	169
D.2.	Fahrzeugdaten Verbrennungsfahrzeuge als Grundlage der DSE	170
D.3.	Liste verwendeter Energiesenken abhängig vom Fahrzeugsegment	172
D.4.	Abhängigkeiten der verwendeten Energiesenken	174
D.5.	Modellierte Temperaturabhängigkeit der Senken	175
D.6.	Positionierung der Energiesenken	177
D.7.	Parameter Schmelzsicherungen	178
D.8.	Leitungsparameter	179
D.9.	Vergleich charakteristischer Merkmale verschiedener genormter Fahrzyklen und einer realen Testfahrt	181
E.1.	Segment A: Default, maximale und minimale Standardabweichung	183
E.2.	Segment J,f: Default, maximale und minimale Standardabweichung	185
E.3.	Segment A: Default, maximaler und minimaler Energieverbrauch des Fahrzeugs	186
E.4.	Segment J,F: Default, maximaler und minimaler Energieverbrauch des Fahrzeugs	186
E.5.	Segment A: Default, maximale und minimale Materialkosten	189
E.6.	Segment J,F: Default, maximale und minimale Materialkosten	189
E.7.	Segment A: Default, maximale und minimale spezifische Energiekosten, Emissionswerte, -strafen und TCO	190
E.8.	Segment J,F: Default, maximale und minimale spezifische Energiekosten, Emissionswerte, -strafen und TCO	190
E.9.	Hinsichtlich der Materialkosten Pareto-optimale Batteriekapazitätswerte der Cluster	199
E.10.	Hinsichtlich der TCO Pareto-optimale Batteriekapazitätswerte der Cluster	200

Eigene Publikationen

- [Bra12] Lisa Braun. "Fahrer- und fahrsituationsabhängige Bewertung unterschiedlicher Elektromotorkonzepte". Masterarbeit. Karlsruhe: Lehrstuhl für Hybridelektrische Fahrzeuge, Karlsruher Institut für Technologie, 2012.
- [BAG15] Lisa Braun, Michael Armbruster und Frank Gauterin. "Trends in vehicle electric system design: State-of-the Art Summary". In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Hrsg. von IEEE. 2015.
- [BAS16] Lisa Braun, Michael Armbruster und Eric Sax. "Stakeholder Issues Concerning the Automotive E/E-Architecture". In: *Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference*. Hrsg. von IEEE. 2016.
- [BGS16] Lisa Braun, Frank Gauterin und Eric Sax. *Experteninterview zur Anforderungsanalyse heutiger und zukünftiger E/E Architekturen im Kraftfahrzeug: Abschlussbericht: Final Report*. 2016.
- [BS17] Lisa Braun und Eric Sax. "Synthesis of Important Design Criteria for Future Vehicle Electric System". In: *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* 2.3 (2017), S. 277–283.
- [Bra+17] Lisa Braun, Michael Armbruster, Ludger Fiege und Eric Sax. "Using a Domain Model to Precisely Describe function-agnostic Electric/Electronic-Architectures". In: *Automotive meets electronics*. Hrsg. von Michael Wahl. GMM-Fachbericht. Berlin und Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2017, S. 59–64.

Literaturverzeichnis

- [ADA16] ADAC. *ADAC Autokosten 2016: Kostenübersicht für über 1.800 aktuelle Neuwagen-Modelle*. 2016. URL: https://www.adac.de/_mmm/pdf/autokostenuebersicht_47085.pdf.
- [AUT16] AUTOSAR. *AUTOSAR Layered Software Architecture*. 2016. URL: <http://www.autosar.org/specifications/release-42/software-architecture/general/>.
- [Alm+15] Adiel Teixeira de Almeida, Cristiano Alexandre Virginio Cavalcante, Marcelo Hazin Alencar, Rodrigo Jose Pires Ferreira, Adiel Teixeira de Almeida-Filho und Thalles Vitelli Garcez. *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. Bd. 231. International Series in Operations Research & Management Science. Springer International Publishing, 2015.
- [AT14] Björn Annighöfer und Frank Thielecke. "A Systems Architecting Framework for Distributed Integrated Modular Avionics". In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*. 2014.
- [Ara16] Aral Forschung. *FAQs: Kraftstoffe allgemein: Welchen Heizwert haben Kraftstoffe?* 2016. URL: <http://www.aral.de/de/forschung/faq/faqs.html>.
- [Aud+14] François-Joseph van Audenhove, Laurent Dauby, Oleksii Korniiichuk und Jérôme Pourbaix. *The Future of Urban Mobility 2.0: Imperatives to shape extended mobility ecosystems of tomorrow*. 2014.
- [Bak+10] Sidi Bakhkhat, Franziska Böde, Matthias Brucke, Knut Degen, Christof Ebert, Ingrid Einsiedler, Ciwan Gouma, Fred Grunert, Ralf Möllers, Jürgen Niehaus, Klaus Renger, Sebastian Richter, Stephan Rupp, Jürgen Salecker, Roland Stein, Oliver Winzenried und Stephan Ziegler. *Eingebettete Systeme – Anwendungsbeispiele, Zahlen und Trends*. Berlin, Germany, 2010.
- [Bal16] Kai-Uwe Balszuweit. *Das Bordnetz des neuen BMW 7er. 4*. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil. Ludwigsburg, 9. März 2016.

- [Ben+14] Klaus Bengler, Klaus Dietmayer, Berthold Farber, Markus Maurer, Christoph Stiller und Hermann Winner. "Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives". In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 6.4 (2014), S. 6–22.
- [BW15] Michele Bertoncello und Dominik Wee. *Ten ways autonomous driving could redefine the automotive world*. 2015. URL: http://www.mckinsey.com/insights/automotive_and_assembly/ten_ways_autonomous_driving_could_redefine_the_automotive_world.
- [BKD15] Juergen Bilo, Bernhard Klein und Siegmund Deinhard. "The 48V Eco Drive - Mild Hybrid System Enables CO2 Reduction: New levels of freedom and new functionalities". In: *Elektronik im Kraftfahrzeug 2015*. Hrsg. von VDI. 2015.
- [Bol16] Thomas Bolte. *Zukunftsorientierte modellbasierte Entwicklung des physischen Bordnetzes aus Sicht des Systemlieferanten*. Hrsg. von WEKA FACHMEDIEN GmbH. Bordnetz Kongress. Landshut, 21. Sep. 2016.
- [Bor14] Kai Borgeest. *Elektronik in der Fahrzeugtechnik: Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement*. 3. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [Bou09] Neal Boudette. "Tesla Upgrades Autopilot in Cars on the Road". In: *The New York Times* (23.09.2016). URL: <http://www.nytimes.com/2016/09/24/business/tesla-upgrades-autopilot-in-cars-on-the-road.html>.
- [Bub15] Lars Bube. *Autos über Radio gehackt: Rollende Zeitbomben*. 2015. URL: <http://www.crn.de/security/artikel-107393.html>.
- [Bue08] Stefan Buechner. "Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen". Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden, 2008.
- [Bul14] Kevin Bullis. "Tesla Motors' Over-the-Air Repairs Are the Way Forward: Tesla and GM have both issued fire-related recalls, but Tesla's fix doesn't require owners to bring their cars in." In: (2014). URL: <http://www.technologyreview.com/view/523621/tesla-motors-over-the-air-repairs-are-the-way-forward/>.

- [Bun97] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Hrsg. *Handelsgesetzbuch*. 59. 1897.
- [Bun15] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. *Kraftfahrzeugsteuergesetz: KraftStG*. 8. Juni 2015.
- [But07] Henning Butz. "Open Integrated Modular Avionic (IMA): State of the Art and future Development Road Map at Airbus Deutschland". In: *Aircraft Systems Technologies Workshop*. 2007.
- [Car16] Bundesverband CarSharing. *CarSharing-Jahresbilanz 2015: Wachstum und Konsolidierung im deutschen CarSharing-Markt*. 29. Feb. 2016. URL: http://www.carsharing.de/sites/default/files/uploads/pm_carsharing-bilanz_2016_0.pdf.
- [Cen17] Center for Climate and Energy Solutions. *FEDERAL VEHICLE STANDARDS*. 2017. URL: <http://www.c2es.org/federal/executive/vehicle-standards>.
- [CRM06] Min Chen und Gabriel Rincón-Mora. "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance". In: *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION* 21.2 (2006), S. 504–511.
- [Chr09] Thomas Christ. "Bremsenergie rückgewinnung im elektrischen Bordnetz". In: *ATZelektronik* 4.04 (2009), S. 10–17.
- [Cle12] Thomas Cleff. *Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse: Eine computergestützte Einführung mit Excel, PASW (SPSS) und STATA*. Gabler Verlag, 2012.
- [Com03] Commission of the European Communities. *REGULATION (EEC) No 4064/89 MERGER PROCEDURE*. 17/03/1999. URL: [\url{http://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/ml406_en.pdf}](http://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/ml406_en.pdf).
- [CP15] Oliver Coppin und Sébastien Potteau. "48V Hybrid Systemarchitektur zur Reduzierung der CO₂-Emissionen". In: *ATZelektronik* 10.02 (2015), S. 58–63.
- [DF11] Maja Diebig und Stephan Frei. "Dynamische Simulation der Spannungsstabilität und des thermischen Verhaltens von Fahrzeugbordnetzen". In: (2011).
- [Dör+12] Thomas Dörsam, Stefan Kehl, Andreas Klingig, André Radon und Ottmar Sirch. "Die neue Spannungsebene 48V im Kraftfahrzeug". In: *ATZelektronik* 7.01 (2012), S. 20–25.

- [Dre15] Detlef Drees. *Elektronisch gesteuerte Energieverteilung und Einflüsse auf das Bordnetz*. 3. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil. Ludwigsburg, 24. März 2015.
- [Dud12] Ferdinand Dudenhöffer. "Modellvielfalt bei Autobauern explodiert: Die Modellvielfalt bei den Autoherstellern treibt immer neue Blüten: Über 3.000 Varianten sind bei den deutschen Nachbarn zu haben". In: *der Standard* (14. Mai 2012). URL: [\url{http://derstandard.at/1336696744191/Studie-Modellvielfalt-bei-Autobauern-explodiert}](http://derstandard.at/1336696744191/Studie-Modellvielfalt-bei-Autobauern-explodiert).
- [DS16] Joachim Düsediekerbäumer und Christian Schäfer. *ROBEV - Entwicklungsmodell für eine robuste Energieverteilung im Bordnetz*. Hrsg. von WEKA FACHMEDIEN GmbH. Bordnetz Kongress. Landshut, 21. Sep. 2016.
- [EL12] Christof Ebert und Dieter Lederer. "Evolution und Trends in der E/E: Der Weg zum schnellen, wirksamen und trotzdem flexiblen Agieren". In: *Automobil Elektronik* 06 (2012), S. 58–60.
- [Eck16] Stefanie Eckardt. "Halbleiterschalter Power Profet ersetzen Relais: Infineon". In: *Elektronik automotive* (3. Nov. 2016). URL: [\url{http://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/sonstiges/halbleiterschalter-power-profet-ersetzen-relais-135443.html}](http://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/sonstiges/halbleiterschalter-power-profet-ersetzen-relais-135443.html).
- [Ege09] Tom Egel. "Real Time Simulation Using Non-causal Physical Models". In: *SAE International* (2009).
- [Ehr05] Matthias Ehrgott. *Multicriteria Optimization*. 2. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [Ern14] Markus Ernst. *Bionik als Methode zur Konzeption neuer Ansätze für die E/E-Architektur*. Hrsg. von WEKA FACHMEDIEN. Bordnetz Kongress. Landshut, 24. Sep. 2014.
- [EH14] Markus Ernst und Markus Heuermann. "Die wichtigsten Bordnetz-Trends". In: *Elektronik automotive Sonderausgabe Bordnetze* (2014), S. 20–23.
- [EWF13] Uwe Ernstberger, Jürgen Weissinger und Jürgen Frank, Hrsg. *Mercedes-Benz SL: Entwicklung und Technik*. ATZ/MTZ-Typenbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [EL08] Stephan Esch und Bardo Lang. "Elektronik- und Vernetzungsarchitektur mit gesteigerter Leistungsfähigkeit". In: *ATZextra* 02 (2008), S. 194–198.

- [Eur17] European Commission. *FAQ - Type approval of vehicles*. 2017. URL: http://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/technical-harmonisation/faq-auto_en.
- [Eur09] European Parliament. *VERORDNUNG (EG) Nr. 443/2009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*. Apr. 2009. URL: [\url{http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex:32009R0443}](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex:32009R0443).
- [Eur14] European Parliament. *REGULATION (EU) No 333/2014 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 March 2014 amending Regulation (EC) No 443/2009 to define the modalities for reaching the 2020 target to reduce CO₂ emissions from new passenger cars: Regulation (EC) No 443/2009*. 11. März 2014. URL: [\url{www.bmub.bund.de/N43842/}](http://www.bmub.bund.de/N43842/).
- [Eur15] European Parliament. *"eCall": Automatisches Notrufsystem in allen neuen Automodellen ab Frühling 2018: Plenartagung [28-04-2015 - 13:16]*. 24. Apr. 2015. URL: [\url{http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/20150424IPR45714/ecall-automatisches-notrufsystem-in-allen-neuen-automodellen-ab-fr%C3%BChling-2018}](http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/20150424IPR45714/ecall-automatisches-notrufsystem-in-allen-neuen-automodellen-ab-fr%C3%BChling-2018).
- [Eva03] Eric Evans. *Domain-Driven-Design: Tackling Complexity in the Heart of Software*. 2003.
- [Fab06] Radomir Fabis. *"Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen"*. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 2006.
- [Fel14] Reinhard Felgenhauer. *Lösungen der Bordnetzarchitektur für die Datenwelt von morgen*. 2. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil. Ludwigsburg, 24. März 2014.
- [Fin16] Holger Fink. *"Li-ion batteries for automotive applications – Quo vadis?"* In: 16. *Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentchnik*. Hrsg. von Michael Bargende, Hans-Christian Reuss und Jochen Wiedemann. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 69–81.

- [FGP04] Andreas Fleischmann, Eva Geisberger und Markus Pister. *Herausforderungen für das Requirements Engineering eingebetteter Systeme*. Sep. 2004. URL: <http://wwwbib.informatik.tu-muenchen.de/infberichte/2004/TUM-I0414.pdf.gz>.
- [Flu12] Holger Fluehr. *Avionik und Flugsicherungstechnik: Einführung in Kommunikationstechnik, Navigation, Surveillance*. 2. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [Foc15] Focus online, Hrsg. *Riesige Sicherheitslücke? Hacker blockieren Gaspedal bei Jeep*. 2015. URL: http://www.focus.de/auto/ratgeber/sicherheit/hacker-angriff-auf-autos-gigantische-sicherheitsluecke-hacker-kontrollieren-jeep-in-voller-fahrt_id_4831833.html.
- [For12] ForTISS GmbH, Hrsg. *Mehr Software (im) Wagen Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) als Motor der Elektromobilität der Zukunft: Bericht*. 2012.
- [FV16] Carl-Ernst Forchert und Thomas Viebranz. *Das Elektrofahrzeug als updatefähige Plattform: Chancen für Berlin*. 2016. URL: <https://www.technologiestiftung-berlin.de/de/bibliothek/publikationen/>.
- [Fra+08] E. Frank, Reinhard Wilhelm, Rolf Ernst, Alberto Luigi Sangiovanni-Vincentelli und Marco Di Natale. "Methods, Tools and Standards for the Analysis, Evaluation and Design of Modern Automotive Architectures". In: *Design, Automation and Test in Europe (DATE)*. Hrsg. von IEEE. 2008, S. 659–663.
- [Fra06] Fraunhofer Gesellschaft e.V., Hrsg. *Modellbasierte Systementwicklung in der Automobilindustrie: Das MOSES-Projekt*. 2006.
- [Geh+09] Rainer Gehring, Joachim Fröschl, Tom P. Kohler und Hans-Georg Herzog. "Modeling of the Automotive 14 V Power Net for Voltage Stability Analysis". In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Hrsg. von IEEE. 2009, S. 71–77.
- [Gei10] Oliver Geissel. "AMMU Automotive Mixed Mock-Up: Konzeption einer neuen Entwicklungsplattform für die Automobilindustrie". Dissertation. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2010.

- [Gem+05] Ralf Gemmerich, Sven Semmelrodt, Albert Zuendorf, Carsten Reckord, Juergen Leohold, J. Trippler, Brabetz, Ludwig, Dieter Mueller, Ulrich Schrey und Hans-Georg Weil. "Ein ganzheitlicher Ansatz zur Generierung und Optimierung von Fahrzeugbordnetzen". In: *VDI Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug*. Hrsg. von VDI. VDI Verlag GmbH, 2005.
- [GG04] Jochen Gläser und Grid Laudel. *Experteninterviews und Qualitative Inhaltsanalyse*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2004.
- [Gol14] Daniel Goldbach. "Diagnosemaßnahmen im Umfeld der Funktionalen Sicherheit". In: *AmE 2014*. Hrsg. von VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik. GMM-Fachbericht. 2014, S. 172–179.
- [Goo16] Google Auto LLC. *Google Self-Driving Car Project Monthly Report: Oktober 2016*. 2016. URL: [\url{https://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/de/selfdrivingcar/files/reports/report-1016.pdf}](https://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/de/selfdrivingcar/files/reports/report-1016.pdf).
- [GSB12] Ingrid Göpfert, Matthias Schulz und David Braun, Hrsg. *Automobillogistik: Stand und Zukunftstrends*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012.
- [Gra+16] Peter Grabs, Sebastian Dörnbach, Frédéric Holzmann und Udo Hornfeck. *Ausfallsichere E/E-Architektur für automatisiertes Fahren*. Hrsg. von WEKA FACHMEDIEN GmbH. Bordnetz Kongress. Landshut, 21. Sep. 2016.
- [Gra01] Alfons Graf. "Halbleiter im 42V-Bordnetz". In: Hrsg. von VDE. 2001. URL: [\url{https://www.vde.com/de/fg/ETG/Archiv/Ueber%20Uns/Documents/MCMS/26.pdf}](https://www.vde.com/de/fg/ETG/Archiv/Ueber%20Uns/Documents/MCMS/26.pdf).
- [GKR13] Alfons Graf, Juergen Kositzka und Tobias Raithel. "Architekturstudie zur Leistungsverteilung im KFZ". In: *ATZelektronik* 8.03 (2013), S. 194–197.
- [HW13] Gerhard Hab und Reinhard Wagner. *Projektmanagement in der Automobilindustrie: Effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette*. 4. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [Han+09] Florian Hannig, Tom Smolinka, Peter Bretschneider, Steffen Nicolai, Sven Krüger, Frank Meißner und Marco Voigt. *Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie*. 30. Juni 2009.

- [HB13] Steven P. Haveman und G. Maarten Bonnema. "Requirements for high level models supporting design space exploration in model-based systems engineering". In: *Procedia Computer Science*. Bd. 16. 2013, S. 293–302.
- [Hei11] Frank G. Heide. "Mauerblümchen am deutschen Auto-Markt". In: *Handelsblatt* (30. Aug. 2011). URL: [\url{http://www.handelsblatt.com/auto/nachrichten/car-studie-zur-typenvielfalt-mauerbluemchen-am-deutschen-auto-markt/4555126.html}](http://www.handelsblatt.com/auto/nachrichten/car-studie-zur-typenvielfalt-mauerbluemchen-am-deutschen-auto-markt/4555126.html).
- [Hei06] Detlef Heinemann. "Strukturen von Batterie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und Ultracaps". Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 2006.
- [Hes11] Benjamin Hesse. "Wechselwirkung von Fahrzeugdynamik und Kfz-Bordnetz". Dissertation. Duisburg-Essen: Universität Duisburg-Essen, 2011.
- [Hoc13] Paul Hochrein. "Leistungsoptimale Regelung von Hochstromverbrauchern im Fahrwerk". Dissertation. Kassel: Universität Kassel, 2013.
- [Hus93] Heinrich Hussmann. *Zur formalen Beschreibung der funktionalen Anforderungen an ein Informationssystem*. 1993.
- [ISO11] ISO. *Road vehicles - 60V and 600V single core cables*. 2011-10-15.
- [ISO15] ISO. *ISO 26262 Road vehicles - Functional Safety - Part 1-10*, 2011. 15. Nov. 2015.
- [ITW16] ITWissen.info. *DMIPS (Dhrystone MIPS)*. 2016. URL: <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Dhrystone-MIPS-DMIPS.html>.
- [IK16] Petra Icha und Gunter Kuhs. *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015*. Climate Change. 2016.
- [Jai15] Martin Jaiser. *Neue intelligente Sicherungen ermöglichen kostengünstigere und leichtere Kabelbäume und komfortableres Bordnetzdesign im Fahrzeug*. Bordnetz Kongress. Landshut, 23. Sep. 2015.

- [Jä12] Martin Jänsch. *Modulorientiertes Produktlinien Engineering für den modellbasierten Elektrik/Elektronik-Architekturentwurf: Dissertation*. Bd. 8. Steinbuch Series on Advances in Information Technology / Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technik der Informationsverarbeitung. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012.
- [JM15] Volker Johannig und Roman Mildner. *Car IT kompakt*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [Jur14] Miroslav Juric. *Daten als Rohstoff einer kundenspezifischen Leitungssatzentwicklung*. Bordnetz Kongress. Landshut, 24. Sep. 2014.
- [KJS10] Eunsuk Kang, Ethan Jackson und Wolfram Schulte. "An Approach for Effective Design Space Exploration". In: *FOCS'10 Proceedings of the 16th Monterey conference on Foundations of computer software: modeling, development, and verification of adaptive systems*. Hrsg. von Radu Calinescu und Ethan Jackson. Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 33–54.
- [Kel+08] Helmut Kellermann, Gêza Németh, Jörg Kosteletzky, Kai L. Barbehoen, Fathi El-Dwaik und Ludwig Hochmuth. "Elektrik- und Elektronikarchitektur - Bus-Struktur, Energiebordnetz, zentrale Dienste und Kabelbaum". In: *ATZextra* November (2008), S. 30–37.
- [Kü+14] Jörg Küfen, Janek Hudecek, Jens Kotte, Adrian Zlocki und Lutz Eckstein. "An Extended Concept for a Central Information Platform for Perceptive, Intelligent Vehicles and its Possibilities". In: *AmE 2014*. Hrsg. von VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik. GMM-Fachbericht. 2014, S. 37–42.
- [Kla+15] Matthias Klauda, Michael Schaffert, Athanassios Lagospiris, Gunnar Piel, Sven Kappel und Markus Ihle. "Weichenstellung für 2020 Paradigmenwechsel in der E/E-Architektur". In: *ATZelektronik* 10.02 (2015), S. 15–22.
- [KG11] Johannes Klötzl und Dieter Gerling. "Stability in automotive power nets: Definitions, algorithms and experimental validation". In: *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*. Hrsg. von IEEE. Bd. 14. 2011, S. 1–8.

- [Kne15] Harry Knechtel. "Methodological Approaches to Data Protection and Security in Networked ECUs". In: *ATZelektronik worldwide* 10.01 (2015), S. 4–9.
- [Knu+17] Stefan Knupfer, Russell Hensley, Patrick Hertzke und Patrick Schaufuss. *Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability*. 2017.
- [Koh14] Tom P. Kohler. *Prädiktives Leistungsmanagement in Fahrzeugbordnetzen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [Koh+10] Tom P. Kohler, Thomas Wagner, Andreas Thanheiser, Christiane Bertram, Dominik Bücherl, Hans-Georg Herzog, Joachim Fröschl und Rainer Gehring. "Experimental Investigation on Voltage Stability in Vehicle Power Nets for Power Distribution Management". In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Hrsg. von IEEE. 2010.
- [KB11] Referat Fahrzeugstatistik Kraftfahrt-Bundesamt, Hrsg. *Fachartikel: Emissionen und Kraftstoffe*. 2011. URL: https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/Fachartikel/emission_20110315.pdf?__blob=publicationFile&v=6.
- [KTZ05] S. Kuenzli, Lothar Thiele und Eckart Zitzler. "Modular design space exploration framework for embedded systems". In: *IEEE Proceedings - Computers and Digital Techniques* 152.2 (2005), S. 183–192.
- [LB11] Long Lam und Bauer, Pavol, Kelder, Erik. "A Practical Circuit-based Model for Li-ion Battery Cells in Electric Vehicle Applications". In: *Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. Hrsg. von IEEE. 2011.
- [LE14] Wolfgang Langhoff und Markus Ernst. "Das lebende Bordnetz Bionik als Vorbild für die E/E-Architektur der Zukunft". In: *ATZelektronik* 9.04 (2014), S. 52–57.
- [LGM14] Shou-pon Lin, Yitian Gu und Nicholas Maxemchuk. "A Multiple Stack Architecture for Intelligent Vehicles". In: *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Hrsg. von IEEE. 2014, S. 268–273.
- [Lit16] Littelfuse. *Automotive Passenger Car Solutions: Circuit Protection Solutions for Automotive Applications*. 2016. URL: www.littelfuse.com/technical-resources.
- [MB15] Johannes Meisenzahl und Christian Bauer. *Trends im Bordnetz*. 18. Kooperationsforum Bordnetze, address = München, series = 18. Kooperationsforum Bordnetze. 23. Nov. 2015.

- [MB16] Mercedes-Benz. *Technische Daten des Mercedes-Benz GLS*. 2016. URL: http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passengercars/home/new_cars/models/gls/x166/facts/technicaldata/models.html.
- [Moh+15] Detlev Mohr, Hans-Werner Kaas, Paul Gao, Andreas Zielke, Andreas Tschiesner, Dominik Wee und Matthias Kässer. *Wettlauf um den vernetzten Kunden – Überblick zu den Chancen aus Fahrzeugvernetzung und Automatisierung*. 2015. URL: https://www.mckinsey.de/files/mckinsey-connected-customer_deutsch.pdf.
- [Moo16] Sjon Moore. "Modeling and Optimizing Wire Harness Costs for Variation Complexity". In: SAE Technical Paper Series. SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2016.
- [MN14] S. M. Mousavi G und M. Nikdel. "Various battery models for various simulation studies and applications". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2014), S. 477–485.
- [Naz14] Dieter Nazareth. *Bordnetzentwicklung - Eine interdisziplinäre Herausforderung*. 2. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil. Ludwigsburg, 24. März 2014.
- [Obj15] Object Management Group, Inc. *OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™)*. 2015. URL: <http://www.omg.org/spec/SysML/1.4/>.
- [Ort14] Frank Ortmann. *Fahrzeugbordnetz 2018: Anforderungen eines OEM*. 2. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil. Ludwigsburg, 24. März 2014.
- [OM15] Frank Ortmann und Andree Mench. *Komplexität im Bordnetz*. 3. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil. Ludwigsburg, 24. März 2015.
- [PA 16] PA Consulting. *The CO2 emissions challenge: Some carmakers are still falling short of meeting the 2021 targets*. 2016.
- [Pan12] Panasonic. *NCR18650: Lithium Ion*. Version 13.11R1. 2012.
- [PS16] Stefan Pischinger und Ulrich Seiffert, Hrsg. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 8. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.

- [Pre15] Reinhard Prechler. *Anforderungen und Lösungen in der Bordnetzentwicklung*. 3. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil. Ludwigsburg, 24. März 2015.
- [RVR03] Ravishankar Rao, Sarma Vrudhula und Daler Rakhmatov. "Battery modeling for energy-aware system design". In: *Computer* 36.12 (2003), S. 77–87.
- [Reg+11] Richard Regler, Jörg Schlinkheider, Markus Maier, Reinhard Prechler, Eduard Berger und Leo Pröll. "Intelligente Elektrik / Elektronik Architektur". In: *ATZextra* Januar (2011), S. 246.
- [Rei10] Konrad Reif, Hrsg. *Batterien, Bordnetze und Vernetzung*. 1. Auflage. Bosch Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010.
- [Rei14] Konrad Reif, Hrsg. *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. 5. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [Rei15] Blank Reinhold. *VARIANTEN-Optimierung: das noch nicht (vollständig) ausgeschöpfte Optimierungspotential in der Bordnetz-Entwicklung*. 3. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil. Ludwigsburg, 24. März 2015.
- [Res+14] Andreas Reschka, Marcus Nolte, Torben Stolte, Johannes Schlatow, Rolf Ernst und Markus Maurer. "Specifying a Middleware for Distributed Embedded Vehicle Control Systems". In: *International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*. Hrsg. von IEEE. 2014, S. 117–122.
- [RSB08] Thomas Ringer, Martin Simons und Reinhold Beck. "Ein Ansatz für den werkzeuggestützten Elektrik-/Elektronikarchitekturentwurf". In: *ATZelektronik* 3.01 (2008), S. 52–57.
- [Rö15a] Stefan Römmele. "Automated Driving Calls for Secure Networks". In: *ATZelektronik worldwide* 10.2 (2015), S. 13–17.
- [Rob14] Robert Bosch GmbH, Hrsg. *Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics: Systems and Components, Networking and Hybrid Drive*. 5. Aufl. Bosch Professional Automotive Information. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [Rö15b] Peter Rössger. "Autonomous Driving How Much Autonomy Driving Does Stand". In: *ATZelektronik worldwide* 10.2 (2015), S. 26–29.

- [Ruf14] Florian Ruf. "Auslegung und Topologieoptimierung von spannungsstabilen Energiebordnetzen". Dissertation. München: Technische Universität München, 2014.
- [Ruf+13] Florian Ruf, Michael Winter, Hans-Ulrich Michel, Joachim Fröschl und Hans-Georg Herzog. "Experimental Investigations on an Autonomous Load Shutdown Mechanism in Respect to Voltage Stability in Automotive Power Nets". In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Hrsg. von IEEE. 2013, S. 432–435.
- [SAE16] SAE International. *Taxonomy and Definitions or Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. 2016/09/30. URL: [\url{http://standards.sae.org/j3016_201401/}](http://standards.sae.org/j3016_201401/).
- [Sch+14] Gunther Schaaf, Jörg Mönnich, Matthias Haug, Gernot Schröder, Frank Niewels, Alexander Gerald, Florian Wildschütte, Peter Vogel, Hendrik Fuchs und Frank Hofmann. "Entwicklung und Erprobung der C2XC-Funktion Hinderniswarnung im Forschungsprojekt simtd". In: *AmE 2014*. Hrsg. von VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik. GMM-Fachbericht. 2014, S. 19–24.
- [Sch+12] Wolfgang Schade, Christoph Zanker, Kühn André, Steffen Kinkel, Angela Jäger, Tim Hettesheimer und Thomas Schmall. *Zukunft der Automobilindustrie*. Arbeitsbericht. 2012.
- [SS12] Alexander Schill und Thomas Springer. *Verteilte Systeme: Grundlagen und Basistechnologien*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [SB16] Helge Schmidt und Jens Badur. "From laboratory to road – Real Driving Emissions". In: *16. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik*. Hrsg. von Michael Bargende, Hans-Christian Reuss und Jochen Wiedemann. Proceedings. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, S. 59–67.
- [Sch09] Kurt Schneider. *Experience and Knowledge Management in Software Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [Sch11] Markus Schöttl. "Zukunft der Fahrerassistenz Mit neuen E/E-Architekturen". In: *ATZelextronik* 6.04 (2011), S. 8–15.

- [SHL10] Bernhard Schätz, Florian Hölzl und Torbjørn Lundkvist. "Design-Space Exploration through Constraint-Based Model-Transformation". In: *2010 17th IEEE International Conference and Workshops on Engineering of Computer Based Systems (ECBS 2010)*. 2010.
- [SZ16] Jörg Schäuffele und Thomas Zurawka. *Automotive Software Engineering: Grundlagen, Prozesse, Methoden und Werkzeuge effizient einsetzen*. 6. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [SF+14] Anette Sedlmaier-Fuchs, Michael Wortberg, Stefan Lobmeyer und Karl Ring. "Energieverteilung neu gedacht E/E-Architektur als Enabler für innovative Fahrzeugbordnetze". In: *ATZelektronik* 9.05 (2014), S. 52–57.
- [SvH10] Karl Siebertz, David van Bebber und Thomas Hochkirchen. *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. 1. Aufl. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [151] "Software-Update bringt Autopilot für Tesla-Fahrzeuge". In: (15.10.2015). URL: <http://deutsche-wirtschafts-nachrichten.de/2015/03/20/software-update-bringt-autopilot-fuer-tesla-fahrzeuge/>.
- [Som+13] Stephan Sommer, Alexander Camek, Klaus Becker, Christian Buckl, Andreas Zirkler, Ludger Fiege, Michael Armbruster, Gernot Spiegelberg und Alois Knoll. "RACE: A Centralized Platform Computer Based Architecture for Automotive Applications". In: *Electric Vehicle Conference (IEVC)*. Hrsg. von IEEE. 2013, S. 1–6.
- [Spr13] Springer Automotive Media Wiesbaden. "AUTOSAR - The worldwide automotive standard for e/e systems: 10 Years AUTOSAR Introduction". In: *ATZextra worldwide* 18.9 (2013), S. 6–12.
- [Spr17] Springer Gabler Verlag. *Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Key Performance Indicator (KPI)*. 2017. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/326735/key-performance-indicator-kpi-v1.html>.
- [Sta04] Statistisches Bundesamt. *IKT in Deutschland: Informations- und Kommunikationstechnologien 1995 – 2003: Computer, Internet und mehr*. Wiesbaden, 1. Sep. 2004. URL: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Querschnitt/>

Informationsgesellschaft1030701039004.pdf?__blob=publicationFile}.

- [Ste+15] Alex Steward, Alastair Hope-Morley, Peter Mock und Uwe Tietge. *Quantifying the impact of real-world driving on total CO2 emissions from UK cars and vans*. 2015.
- [Sto14] M. Stolte. *Intelligente Hauptsicherungsbox*. 2. Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil. Ludwigsburg, 24. März 2014.
- [ST12] Thilo Streichert und Matthias Traub. *Elektrik/Elektronik-Architekturen im Kraftfahrzeug: Modellierung und Bewertung von Echtzeitsystemen*. 1. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [SWA14] Klaus Stricker, Rasmus Wegener und Markus Anding. *Big Data revolutioniert die Automobilindustrie: Neue Möglichkeiten der Markendifferenzierung*. 2014.
- [TTT05] TTTech. *Protocols for Aerospace Control Systems: A Comparison of AFDX, ARINC 429, CAN, and TTP*. 2005. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/080d/05018734ce94dd80f02ec6e0da429258d3ef.pdf>.
- [TV14] Christopher Temple und Antonio Vilela. "Fehlertolerante Systeme im Fahrzeug – von "fail-safe" zu "fail-operational": Safety Automotive". In: *Elektronik automotive* (2014).
- [Tes16a] Tesla Motors. *Model S - Technische Daten*. 2016. URL: https://www.tesla.com/de_DE/models.
- [Tes16b] Tesla Motors. *Model S*. 2016. URL: https://www.tesla.com/de_DE/presskit/autopilot?redirect=no.
- [The17] Inc. The MathWorks. *Simscape User's Guide: R2017a*. 2017.
- [The16] TheEconomist. *The driverless, car-sharing road ahead*. 9. Jan. 2016. URL: <http://www.economist.com/news/business/21685459-carmakers-increasingly-fret-their-industry-brink-huge-disruption>.
- [Tie+16] Uwe Tietge, Sonsoles Díaz, Peter Mock, John German, Anup Bandivadekar und Norbert Ligterink. *From Laboratory to Road: A 2016 Update of Official and 'Real-World' Fuel Consumption and CO2 Values for Passenger Cars in Europe*. 2016.

- [Tur13] Bernhard Turban. *Tool-Based Requirement Traceability between Requirement and Design Artifacts*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [Tut+13] Monica Tutuianu, Alessandro Marotta, Heinz Steven, Eva Ericsson, Takahiro Haniu, Noriyuki Ichikawa und Hajime Ishii. *Development of a World-Wide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC)*. 2013. URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp29grpe/GRPE-68-03e.pdf>.
- [Vec13] Vector Informatik GmbH. *PREEvision: Modellbasierte Elektrik-/Elektronik Entwicklung vom Architektorentwurf bis zur Serienreife*. 2013. URL: http://vector.com/portal/medien/cmc/marketing_items/web/91106.pdf.
- [Ver15] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. *Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen*. 2015. URL: <https://www.vdv.de/position-autonome-fahrzeuge.pdf>.
- [Vin16] Eduard Vinaricky, Hrsg. *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen: Grundlagen Technologien Prüfverfahren*. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [Vol16] Volkswagen. *Ausstattungsvarianten Golf*. 2016.
- [Vol17] Volkswagen. *Wir definieren Mobilität neu: Geschäftsbericht 2016*. 2017.
- [WR06] Henning Wallentowitz und Konrad Reif, Hrsg. *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. 1. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg + Teubner Verlag, 2006.
- [WA08] Peter Wallin und Jakob Axelsson. "A Case Study of Issues Related to Automotive E/E System Architecture Development". In: *15th Annual IEEE International Conference and Workshop on the Engineering of Computer Based Systems*. Hrsg. von IEEE Computer Society. 2008, S. 87–95.
- [Wei+13] Thomas Weidner, Dirk Stoeker, Stefan Wender und Reiner Katzwinkel. "Skalierbare E/E-Architekturen für Fahrerassistenzfunktionen". In: *ATZelektronik* 8.06 (2013), S. 428–433.
- [Wei06] Tim Weilkiens. *Systems Engineering with SysML/UML: Modeling, Analysis, Design*. Morgan Kaufmann OMG Press, 2006.

- [WJ06] Wolfgang Weydanz und Andreas Jossen. *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. 1. Aufl. Reichardt Verlag, 2006.
- [Wis17] Wissenschaftlicher Rat Dudenredaktion. *DUDEN*. 2017. URL: www.duden.de.
- [Wit15] Karsten Wittmack. *10+ Years Automotive Ethernet: From the idea to a series system bus*. Bordnetz Kongress. Landshut, 23. Sep. 2015.
- [ZVE12] ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Hrsg. *Executive Summary Funktionale Sicherheit ISO 26262: ZVEI UG2 Adhoc AG Funktionale Sicherheit ISO 26262*. 2012.
- [ZVE13] ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Hrsg. *Spannungsklassen in der Elektromobilität*. 2013.
- [ZS14] Werner Zimmermann und Ralf Schmidgall. *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik: Protokolle, Standards und Softwarearchitektur*. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [ZRF17] Jan Zimutta, Michael Reke und Günter Feyerl. "Bewertung von Verbrauchs- und Emissionswerten in der Entwicklung von elektronischen Regelsystemen anhand des neuen Einheits-Fahrzyklus WLTC". In: *GMM-Fb. 87: AmE 2017*. Hrsg. von VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik. GMM-Fachberichte. 2017, S. 138–143.
- [sma16] smart, Hrsg. *smart for two & smart BRABUS electric drive*. 2016. URL: <https://www.smart.com/de/de/index/downloadcenter.html>.
- [tut17] tutorialspoint, Hrsg. *Software Architecture and Design Hierarchical Architecture*. 2017. URL: https://www.tutorialspoint.com/software_architecture_design/hierarchical_architecture.htm.
- [vic16] victron energy. *Lichtmaschine mit hoher Ausgangsleistung und Mehrstufenregler*. 2016. URL: <https://www.victronenergy.de/upload/documents/Datasheet-Alternator-DE.pdf>.