

Auslegung und Topologieoptimierung von spannungsstabilen Energiebordnetzen

Florian Ruf

Vollständiger Abdruck der von der
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. sc. Samarjit Chakraborty

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Uwe Baumgarten

Die Dissertation wurde am 17.06.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 13.10.2015 angenommen.

Kurzzusammenfassung

Aufgrund der steigenden Anzahl von elektrischen Verbrauchern und der aus Effizienzgründen vollzogenen Elektrifizierung von Nebenaggregaten müssen heutige Kfz-Energiebordnetze in der Lage sein, hohe Spitzenleistungen bereitstellen zu können. Konventionelle 14 V Bordnetze stoßen dabei zunehmend an Grenzen. In extremen Belastungsszenarien können kritische Spannungseinbrüche auftreten, die im schlimmsten Fall zu einem Ausfall von Steuergeräten führen. Falls sicherheitsrelevante Verbraucher von einer derartigen Unterspannung betroffen sind, können dadurch sehr gefährliche Situationen für die Fahrzeuginsassen entstehen.

In der vorliegenden Dissertation werden verschiedene Maßnahmen zur Stabilisierung von Kfz-Energiebordnetzen und eine darauf aufbauende Methode für eine rechnergestützte Auslegung entwickelt. Als Grundlage dafür werden zunächst Modelle von Generator, Batterie und Kabelbaum sowie verschiedene Verbrauchermodelle erstellt, um das Spannungsverhalten eines konventionellen 14 V Energiebordnetzes simulativ abbilden zu können.

Als erste Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme wird das Konzept einer autonomen Verbraucherabschaltung in Hardware aufgebaut und dessen Stabilisierungseffekt in einem Kfz-Bordnetzprüfstand quantifiziert. Als weitere Maßnahme werden lokale Spannungsstabilisierungen betrachtet, die auf der Integration zusätzlicher Energiespeicher basieren. Eine Variante stellt die passive Anbindung von Doppelschichtkondensatoren an das Bordnetz dar. Als zweite Variante werden Doppelschichtkondensatoren mit Hilfe eines Gleichstromstellers vom Bordnetz entkoppelt, um zusätzliche Freiheitsgrade bei der Auslegung nutzen zu können. Letztere Stabilisierungsmaßnahme wird in Hardware aufgebaut und in einem Kfz-Bordnetzprüfstand validiert.

Auf Grundlage der Bordnetzsimulation und der entwickelten Spannungs-Stabilisierungsmaßnahmen wird eine Methode zur rechnergestützten Auslegung eines spannungsstabilen Bordnetzes entwickelt. Dazu wird die aufgebaute Simulation mit einem Optimierungsalgorithmus gekoppelt. Als Optimierungsziel wird formuliert, dass eine gewichtsoptimale Topologie und Komponentendimensionierung zur Erfüllung bestimmter Spannungsanforderungen identifiziert werden soll. Aufgrund der diskreten Natur des zugrunde liegenden Optimierungsproblems wird ein Partikelschwarm-Optimierungsalgorithmus derart modifiziert und parametrisiert, dass die Optimierung auf direktem Weg innerhalb dieses diskreten Suchraumes erfolgen kann. Anhand exemplarischer Optimierungsergebnisse wird abschließend gezeigt, dass die entwickelte Methode eine Identifizierung und Auslegung einer gewichtsoptimalen und spannungsstabilen Bordnetzarchitektur ermöglicht.

Abstract

Due to the increasing number of electric components and the electrification of auxiliary units, today's automotive power nets have to provide high peak power. In this respect, conventional 14 V power nets are more and more reaching their limits. Especially during critical load scenarios, significant voltage drops can occur. These voltage drops can lead to malfunctions of electronic control units. If safety-relevant components are affected by an undervoltage, passengers might be exposed to very dangerous situations.

In this thesis, different voltage stabilization measures and a subsequent method for a computer aided power net design are developed. As a basis for this, models of alternator, battery and wiring harness as well as load models are built in order to simulate the voltage behaviour of conventional 14 V automotive power nets.

As a first voltage stabilization measure, the concept of an autonomous load shutdown mechanism is implemented on a proprietary hardware platform. The stabilization effect of this concept is quantified through measurements on an automotive power net test bench. Further stabilization measures are based on the local integration of additional energy storages. One approach is a passive integration of electric double layer capacitors into the power net. As a second approach, the electric double layer capacitors are connected to the power with a DC/DC-converter in order to use additional degrees of freedom in the design process. This latter voltage stabilization method is implemented in hardware and validated within an automotive power net test bench. On the basis of the power net simulation and the developed voltage stabilization measures, a method for a computer aided design of stable power nets is developed. For that purpose, the simulation is coupled with an optimization algorithm. As an optimization objective, a minimum weight power net topology and design has to be identified. Because of the discrete nature of the underlying problem, a particle swarm optimization algorithm is modified and parameterized in order to solve the problem directly in its discrete solution space. On the basis of exemplary optimization results it is pointed out, that the developed method is able to support the design and development of minimum weight power net topologies, which meet predefined voltage requirements.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Problemstellung	1
1.2	Stand der Technik	2
1.3	Ziele der Arbeit	3
1.4	Gliederung	4
2	Kfz-Bordnetze	6
2.1	Aufgaben und Anforderungen	6
2.2	Komponenten	7
2.2.1	Energieerzeuger	7
2.2.2	Energiewandler	7
2.2.3	Energiespeicher	8
2.2.4	Energieverteilung	10
2.2.5	Energieverbraucher	11
2.3	Bordnetztopologien	12
2.4	Kritische Belastungszustände	14
3	Modellierung und Simulation eines konventionellen Energiebordnetzes	15
3.1	Blei-Säure-Akkumulator	15
3.2	Generator	16
3.2.1	Generatorprüfstand	17
3.2.2	Generatormodell	19
3.2.3	Modellvalidierung	20
3.3	Elektrische Verbraucher	21
3.3.1	Ohmsche Verbraucher	22
3.3.2	Leistungsverbraucher	22
3.3.3	Leistungselektronisch geregelte Aktoren	23
3.3.4	Ungeregelte Aktoren	24
3.4	Kabelbaum und Karosserie	28
3.5	Simulation des Energiebordnetzes	28

4	Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung	30
4.1	Randbedingungen und Abgrenzung	30
4.2	Dimensionierung der Kabelbaumleitungsquerschnitte	31
4.3	Dimensionierung des Blei-Säure-Akkumulators	31
4.4	Autonome Verbraucherabschaltung	32
4.4.1	Konzept	32
4.4.2	Universelle ECU-Hardwareplattform	33
4.4.3	Prüfstandsintegration	35
4.4.4	Messtechnische Quantifizierung der Spannungsstabilisierung	37
4.4.5	Vorteile für den Bordnetzauslegungsprozess	43
4.5	Zeitliche Entzerrung der Verbraucheraktivitäten	44
4.6	Passive Anbindung von Doppelschichtkondensatoren	45
4.7	Aktive Anbindung von Doppelschichtkondensatoren	46
4.7.1	Konzept	47
4.7.2	DC/DC-Steller	50
4.7.3	Doppelschichtkondensator-Modul	52
4.7.4	Messtechnischer Nachweis der Spannungsstabilisierung	54
4.7.5	Nachbildung in der Bordnetzsimulation	56
4.7.6	Auslegungsaspekte	57
5	Rechnergestützte Optimierung	59
5.1	Randbedingungen und Abgrenzung	59
5.2	Definition des Optimierungsproblems	60
5.2.1	Freiheitsgrade und Parameterräume	61
5.2.2	Suchraum	66
5.2.3	Zielgröße und Nebenbedingungen	67
5.2.4	Anforderungen an den Optimierungsalgorithmus	68
5.3	Optimierungsalgorithmen	69
5.3.1	Tabu-Suche	69
5.3.2	Simulierte Abkühlung	69
5.3.3	Evolutionäre Algorithmen	70
5.3.4	Schwarmintelligenz	71
5.3.5	Diskussion und Auswahl	72
5.4	Implementierung einer diskreten Partikelschwarmoptimierung	72
5.4.1	Kontinuierliche Partikelschwarmoptimierung	73
5.4.2	Binäre Partikelschwarmoptimierung	74
5.4.3	Diskrete Partikelschwarmoptimierung	75
5.4.4	Modifikation der Diskreten Partikelschwarmoptimierung	76

Inhaltsverzeichnis

5.5	Schnittstelle zur Bordnetzsimulation	78
5.5.1	Simulative Untersuchung der Nebenbedingungen	78
5.5.2	Parallelisierung	79
5.5.3	Automatisierte Modelländerung	79
5.5.4	Optimierungsablauf	80
5.6	Konfiguration des Algorithmus	81
5.6.1	Bewertung der Performanz	81
5.6.2	Parameterkonfiguration	82
5.6.3	Laufzeitanalyse	86
5.7	Optimierungsergebnisse	89
6	Zusammenfassung	92
6.1	Ergebnisse dieser Arbeit	92
6.2	Ausblick	94
	Publikationsliste	95
	Liste betreuter Arbeiten	97
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis	106
	Literaturverzeichnis	107

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Moderne Kraftfahrzeuge werden mit einer stetig steigenden Anzahl von elektronischen Komponenten ausgestattet. Zum einen werden bisher mechanisch betriebene Komponenten aus Effizienzgründen elektrifiziert, zum anderen werden Fahrzeuge mit immer mehr Komfort- und Sicherheitsfunktionen ausgestattet. Dabei benötigen elektrifizierte Fahrwerksregelsysteme, wie beispielsweise eine elektrische Lenkung oder eine elektromechanische Hydraulikpumpe, während eines Fahrzyklus vergleichsweise wenig Energie. Problematisch ist jedoch, dass sie in Extremsituationen für kurze Zeit eine sehr hohe Spitzenleistung von bis zu 2 kW und mehr erfordern. Komfortverbraucher, wie beispielsweise elektrisch betriebene Heizsysteme, benötigen hingegen eine vergleichsweise hohe Dauerleistung. Damit werden an heutige Energiebordnetze zwei elementare Anforderungen gestellt: Auf der einen Seite muss gewährleistet werden, dass alle Verbraucher mit ausreichend Energie versorgt werden können, um das energetische Gleichgewicht im Bordnetz zu halten. Auf der anderen Seite muss sichergestellt sein, dass bei der kurzzeitigen Aktivierung von Spitzenleistungsverbrauchern aus dem Fahrwerksbereich die Klemmenspannungen der Verbraucher im Bordnetz nicht unter kritische Werte fallen.

Das Kriterium der Spannungsstabilität stellt dabei einen sicherheitsrelevanten Aspekt bei der Auslegung des Gesamtsystems dar, denn im Falle eines Spannungseinbruchs unter zulässige Klemmenspannungswerte kann die zuverlässige Funktion eines Steuergeräts nicht mehr gewährleistet werden. Im schlimmsten Fall führt eine auftretende Unterspannung zum Reset eines Steuergeräts. Dadurch können sicherheitskritische Fahrzeugzustände entstehen, vor allem wenn es sich um eine fahrwerksrelevante Komponente handelt. Konventionelle 14 V Bordnetze stoßen hier hinsichtlich der Spannungsstabilität zunehmend an Grenzen. Die Integration größerer Batterien und Kabel mit größeren Leitungsquerschnitten ist durch begrenzte Bauräume und limitierte Biegeradien des Kabelbaumes zum Teil nicht mehr möglich. Der Kabelbaum ist darüber hinaus bereits eine der schwersten Komponenten. Aus Effizienzgründen ist eine weitere Steigerung des Bordnetzgewichts unerwünscht. Eine Entspannung durch die Einführung einer zweiten 48 V Spannungsebene lässt zum derzeitigen Stand noch auf sich warten. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass bestimmte Fahrzeugklassen auch in Zukunft aus Kostengründen lediglich mit reinen 14 V Bordnetzen ausgestattet werden.

1.2 Stand der Technik

Seit Einführung der 14 V Spannungsebene in den fünfziger Jahren hat sich die grundlegende Architektur von automobilen Bordnetzen nicht mehr entscheidend verändert [55, 97, 124]. Als Mitte der achtziger Jahre die elektrische Ausstattung von Fahrzeugen zunahm, rückte die Sicherstellung einer ausreichenden Energieversorgung erstmals in den Fokus der Bordnetzentwicklung [5, 18, 126]. Es folgten viele Ansätze für ein Energiemanagement, die auf bestimmten Batterieparametern basierten [94, 101]. Mit der steigenden Anzahl von elektrischen Verbrauchern wurden später Mechanismen entwickelt, die bestimmte Verbraucher bei kritischen Ladezuständen prioritätsgebunden abschalten [14, 15]. Primärer Fokus der Entwicklungen war dabei zunächst die Gewährleistung der Startfähigkeit des Fahrzeuges, zunehmend aber auch die Energieeffizienz des Bordnetzes [99]. Mit steigender Komplexität der Bordnetze wurden nach der Jahrtausendwende Methoden zur energetischen Auslegung der Bordnetze durch Simulation entwickelt [26, 38]. Heute sind erweiterte Bordnetztopologien mit mehreren Energiespeichern und unterschiedlichen Spannungslagen Gegenstand der Forschung, um die Energieeffizienz weiter zu steigern [140].

Um der steigenden Bordnetzlast zu begegnen, wurde bereits Anfang der neunziger Jahre über die Ersetzung oder Ergänzung der 14 V Bordnetzspannung durch 24 V, 36 V oder 48 V diskutiert [87, 148]. Mitte der neunziger Jahre wurde sogar vermutet, dass 48 V AC als zusätzliche Spannungsebene in die Luxusfahrzeuge der Zukunft Einzug halten könnte [65]. Um die unterschiedlichen Architekturoptionen miteinander systematisch vergleichen zu können, wurde in [2] eine Methode erarbeitet, die es erlaubt, Bordnetze mit unterschiedlichen Architekturansätzen und Spannungsniveaus in Bezug auf Kosten, Gewicht und Effizienz zu vergleichen. Gegen Ende der neunziger Jahre waren sich Experten schließlich einig, dass sich 42 V als neuer Standard in automobilen Bordnetzen durchsetzen werde [97]. In der Folgezeit entstanden einige Arbeiten, die sich mit den Herausforderungen von 42 V Bordnetzen beschäftigten [58, 64]. Die ursprünglich für das Jahr 2005 geplante Einführung der 42 V Spannungsebene in Kraftfahrzeugen wurde jedoch nie umgesetzt.

Parallel zu den Überlegungen über die Einführung höherer Spannungen in Fahrzeugbordnetzen entstanden Ende der neunziger Jahre erste Ansätze zur Begrenzung der auftretenden Spitzenleistung. Zentrale Arbeiten stellen [8, 119] dar, in denen das zeitlich versetzte Ansteuern von Verbrauchern als Mechanismus zur Stabilisierung der Versorgungsspannung vorgeschlagen wird. Die Koordination der Schalthandlungen wurde dabei über ein zentrales Steuergerät realisiert. Die Thematik der Spannungsstabilität wurde in der Folge ein fester Bestandteil vieler Ansätze für Energiemanagementmechanismen in Bordnetzen [23, 41, 85, 127, 128].

Um die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen, werden seit Anfang des 21. Jahrhunderts X-by-Wire-Systeme diskutiert, die aktive Eingriffe in die Fahrzeugführung erlauben sollen. Diese

Systeme verzichten auf eine mechanische oder hydraulische Rückfallebene und stellen daher in Bezug auf die Ausfallsicherheit erhöhte Anforderungen. Hier kommt der Energieversorgung der Komponenten eine Schlüsselrolle zu. Aspekte der Entwicklung von hochzuverlässigen Bordnetzarchitekturen werden in [1, 11, 132] behandelt.

Im Jahr 2010 wurden erste Arbeiten veröffentlicht, die sich explizit mit der Spannungsstabilität in Bordnetzen beschäftigen. In [57] werden verschiedene Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung vorgeschlagen, etwa die Bildung von Inselnetzen mit separaten Energiespeichern, die Integration von kapazitiven Energiespeichern oder die Integration eines DC/DC-Stellers mit angeschlossenem Energiespeicher. Die Arbeit [77] zeigt, dass der Betrag des Spannungseinbruchs innerhalb eines Fahrzeugbordnetzes sehr stark variiert und damit vor allem ein lokales Problem darstellt. Durch diesen Sachverhalt konnte im gleichen Zug gezeigt werden, dass der Einbauort einer stabilisierenden Komponente ebenfalls Einfluss auf den Betrag eines Spannungseinbruchs hat. In einer anderen Arbeit wird die Entkopplung einzelner Hochleistungsverbraucher vom Niedervoltbordnetz vorgeschlagen, indem die Versorgungsspannung eines entsprechenden Verbrauchers mit Hilfe eines DC/DC-Stellers lokal auf ein höheres Spannungsniveau angehoben wird [109]. Als transientspeicher auf der Hochvoltseite dient dabei ein Doppelschichtkondensator (DSK). In [73] wird eine lokale Spannungsstabilisierung durch einen DC/DC-Steller und ein Doppelschichtkondensatormodul in Hardware realisiert. Um das Spannungsverhalten in Bordnetzen besser simulieren zu können, wurden in [44] Simulationsmodelle des Kabelbaumes sowie der Massrückleitung erarbeitet.

Zur Erfüllung der steigenden CO₂-Anforderungen wurde in einem Konsortium von deutschen Automobilherstellern im Jahr 2011 eine neue Spezifikation für ein 48 V Bordnetz erarbeitet. Die neue Spannungsebene soll dabei zusätzlich zum bisherigen 14 V Bordnetz in Fahrzeuge integriert werden. Mit Hilfe moderner Akkumulatortechnologie auf Lithium-Basis sind 48 V Bordnetze in der Lage, Effizienzpotenziale durch eine gesteigerte Rekuperationsleistung zu erschließen. Gleichzeitig wird die Möglichkeit geboten, Hochleistungsverbraucher auf diese höhere Spannungsebene zu verlagern, um das 14 V Bordnetz zu entlasten [32]. Trotz der geplanten Einführung von 48 V ist es höchstwahrscheinlich, dass reine 14 V Bordnetze auch in Zukunft noch eine Rolle spielen werden. Daher sind Methoden zur Auslegung von spannungsstabilen 14 V Bordnetzen nach wie vor Gegenstand der Forschung [102].

1.3 Ziele der Arbeit

Der Stand der Technik aus vorigem Abschnitt zeigt, dass es bereits Vorschläge und Mechanismen zur Spannungsstabilisierung von konventionellen 14 V Fahrzeugbordnetzen gibt. Vor dem Hintergrund der immer weiter steigenden Komplexität der Bordnetze stellt sich jedoch zunehmend

die Frage, wie eine bestmögliche Integration von Komponenten zur Spannungsstabilisierung und deren Auslegung vollzogen werden kann.

Basierend auf diesen aktuellen Herausforderungen soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Auslegung von spannungsstabilen Bordnetzen leisten. Dabei soll auf Basis eines bestehenden Bordnetzes eine Methode erarbeitet werden, mit der die auftretenden Spannungseinbrüche an den Steuergeräteklemmen während eines Spitzenbelastungsszenarios unter Verwendung verschiedener Stabilisierungsmaßnahmen auf vorher festgelegte Werte begrenzt werden können. Neben der Einhaltung definierter Mindestspannungen soll gleichzeitig diejenige Topologie und Komponentendimensionierung identifiziert werden, die insgesamt das geringste Gesamtgewicht aufweist.

Für diese Zielsetzung soll eine modulare Bordnetzsimulation auf der Basis bestehender Arbeiten [44] aufgebaut werden. Dabei muss bei der Modellbildung auf eine korrekte Spannungsabhängigkeit sowie Dynamik geachtet werden. Weiterhin sollen basierend auf dem Stand der Technik mögliche Spannungs-Stabilisierungsmechanismen abgeleitet, sowie die daraus resultierenden Freiheitsgrade für die Systemauslegung identifiziert werden. Anhand der möglichen Stabilisierungsmechanismen sowie deren Freiheitsgrade soll in der Folge die spannungsstabile Auslegung des Gesamtsystems als Optimierungsproblem definiert werden. Für die Lösung des Problems soll ein geeigneter Algorithmus identifiziert, und mit der Bordnetzsimulation gekoppelt werden.

Parallel zur simulationsbasierten Betrachtung der Spannungsstabilität sollen ausgewählte Stabilisierungsmechanismen auch in Hardware aufgebaut und als Erweiterung in einen existierenden Bordnetzprüfstand integriert werden [77].

1.4 Gliederung

In Kapitel 2 wird zunächst die Grundstruktur von Fahrzeugbordnetzen beschrieben. Dabei werden alle wesentlichen Komponenten vorgestellt, die für den Aufbau von Fahrzeugbordnetzen relevant sind. Des Weiteren werden aktuelle Trends in Forschung und Entwicklung aufgezeigt. Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Modellierung und Simulation des Bordnetzes. Zunächst wird auf die Modellierung des Blei-Säure-Akkumulators und des Generators eingegangen. Anschließend erfolgt die Modellierung der Bordnetzverbraucher. Dabei werden verschiedene Modellansätze zur Nachbildung unterschiedlicher Verbrauchercharakteristika vorgestellt. Abschließend wird die Modellbildung von Kabelbaum und Karosserie behandelt.

Im darauf folgenden 4. Kapitel werden mögliche Spannungs-Stabilisierungsmaßnahmen beschrieben. Ausgewählte Stabilisierungsmechanismen werden dabei in Hardware umgesetzt und deren Funktion in einem Bordnetzprüfstand validiert.

Darauf aufbauend wird im 5. Kapitel das Optimierungsproblem formuliert. Dabei erfolgen

1 Einleitung

zunächst die Definitionen von Suchraum, Zielfunktion und Nebenbedingungen. Anschließend werden theoretische Grundlagen der Optimierung diskutiert, worauf die Modifikation und Implementierung eines geeigneten Algorithmus folgt. Der Optimierungsalgorithmus wird im Anschluss mit der Bordnetzsimulation gekoppelt. Darauf basierend erfolgt die Konfiguration der Algorithmusparameter, um möglichst schnell und effizient eine Lösung zu erhalten. Dafür werden Bewertungskriterien definiert, die für eine Performanzbewertung herangezogen werden. Am Ende des Kapitels werden exemplarische Optimierungsergebnisse dargestellt und diskutiert. Abschließend werden im 6. Kapitel eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf mögliche Folgearbeiten gegeben.

2 Kfz-Bordnetze

Unter dem Begriff „Bordnetz“ wird heute die Gesamtheit aller elektrischen sowie elektronischen (E/E) Komponenten in einem Fahrzeug zusammengefasst. Die Bussysteme und Steuergeräte, die in einem Fahrzeug für den Austausch von Informationen zuständig sind, zählen dabei zum IT- oder Kommunikationsbordnetz. Alle Komponenten, die zur Erzeugung, Verteilung, Wandlung und Speicherung von Energie dienen, werden allgemein unter dem Begriff Energiebordnetz zusammengefasst. Gegenstand dieser Arbeit ist das letztgenannte Energiebordnetz, welches für den weiteren Verlauf dieser Arbeit dem Begriff „Bordnetz“ gleichgesetzt wird. In diesem Kapitel werden zunächst die Aufgaben und Anforderungen erläutert, die an heutige Bordnetze gestellt werden. Danach erfolgt eine Beschreibung des grundlegenden Aufbaus der Komponenten. Abschließend wird auf kritische Belastungszustände und deren Auswirkungen eingegangen.

2.1 Aufgaben und Anforderungen

Anfang des 19. Jahrhunderts waren Bordnetze lediglich dafür zuständig, den Verbrennungsmotor zu starten und die Beleuchtungseinrichtungen mit Energie zu versorgen. Aus dieser Zeit stammt die Bezeichnung „Lichtmaschine“ für den Generator [12]. Heute versorgen Bordnetze eine immer weiter zunehmende Anzahl von elektrischen und elektronischen Systemen. Eine der Hauptanforderungen stellt dabei die Funktionserfüllung von Fahrzeug- und Kundenfunktionen dar. Gleichzeitig sollen die Komponenten des Bordnetzes möglichst günstig sein. Aus Effizienzgründen und fahrdynamischen Aspekten ist ein geringes Gesamtgewicht sowie eine gute Gewichtsverteilung erstrebenswert. Zusätzlich spielen bei der Komponentenintegration unterschiedlichste Baumraumaspekte eine Rolle.

Die genannten Anforderungen stehen größtenteils im Widerspruch zueinander und müssen bei der Auslegung des Gesamtsystems gegeneinander abgewägt werden.

2.2 Komponenten

2.2.1 Energieerzeuger

In konventionellen, verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen erfolgt die Energieversorgung des Bordnetzes durch einen Generator, der über einen Riementrieb mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt ist. Die eingesetzten Generatoren sind Drehstromgeneratoren in Klauenpolbauweise, die mit Hilfe eines nachgeschalteten Brückengleichrichters eine Gleichspannung erzeugen. Die Regelung der Gleichspannung erfolgt über den Strom im Erregerkreis, der durch einen Leistungshalbleiter mittels Pulsweitenmodulation (PWM) eingestellt wird.

Aufgrund einer Erregerkreiszeitkonstante im kleinen dreistelligen Millisekundenbereich kann der Generator dynamischen Lastwechseln nicht schnell genug folgen [105]. Im Falle eines plötzlichen Lastabwurfs im Bordnetz entsteht dadurch kurzzeitig eine Überspannung an den Generator клемmen und analog dazu bei Lastaufschaltung eine Unterspannung. Zu der ohnehin schon physikalisch begrenzten Dynamik des Generators kommt erschwerend hinzu, dass im leerlaufnahen Bereich aus Komfortgründen abrupte Momentenstöße des Generators verhindert werden müssen, die im schlimmsten Fall sogar zum „Abwürgen“ des Verbrennungsmotors führen können [118]. Um dies zu erreichen, wird die Dynamik des Generators im Bereich der Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors zusätzlich künstlich begrenzt. Diese künstliche Dynamikbegrenzung wird „Load-Response-Funktion“ genannt.

Moderne Kfz-Generatoren verfügen außerdem über eine Kommunikationsschnittstelle, mit der von einem übergeordneten Bordnetzmanagement bei Bedarf ein neuer Sollspannungswert an den Generatorregler übermittelt werden kann. Als Schnittstelle kommt der LIN-Bus (Local Interconnect Network) zum Einsatz [51]. Die Möglichkeit zur Änderung der Generatorspannung während der Fahrt wird von den Fahrzeugherstellern in Energiemanagementsystemen verwendet, um beispielsweise in Verzögerungsphasen zu rekuperieren [106]. In Kombination mit einem Start-Stop-System werden Fahrzeuge, die mit Hilfe des 14 V Bordnetzes Bremsenergie rekuperieren, als Mikrohybride bezeichnet [16]. Die größten verfügbaren Generatoren mit Luftkühlung und passiver Gleichrichtung können heute bis zu 230 A liefern.

2.2.2 Energiewandler

Die Wandlung von Gleichspannung erfolgt in Bordnetzen durch unterschiedliche Arten von DC/DC-Wandlern. Die Wahl der Topologie hängt dabei von den wesentlichen Anforderungen ab, die an einen Wandler gestellt werden. Dabei ist vor allem die Leistungsklasse und Spannungslage, sowie die Notwendigkeit von Bidirektionalität oder galvanischer Trennung entscheidend.

Abgesehen von Gleichspannungswandlern geringer Leistungsklasse für die Versorgung von Prozessoren, Bussystemen, Sensorik, Displays, LEDs und sonstiger Logik werden Wandler höherer Leistung für folgende Aufgaben verwendet: Um zum Beispiel ein Navigationssteuergerät bei Spannungseinbrüchen während des Motorstarts vor einem Reset zu bewahren, kann mit Hilfe eines Hochsetzstellers die interne Versorgungsspannung stabilisiert werden [115, 144]. Die Vermeidung eines Resets ist deshalb essenziell, weil der Neustart einer Headunit verhältnismäßig lange dauert und entsprechende Komforteinbußen verursachen würde. Andere Anwendungsfälle ergeben sich durch Fahrzeuge, die Bordnetze mit unterschiedlichen Spannungslagen aufweisen. In Hybrid- und Elektrofahrzeugen übernehmen dort Gleichspannungswandler die Kopplung der verschiedenen Spannungsebenen. Dasselbe gilt für Fahrzeuge mit einem 48 V Bordnetz. Des Weiteren können DC/DC-Wandler eingesetzt werden, um zusätzliche Energiespeicher oder Energieerzeuger an ein Bordnetz zu koppeln.

2.2.3 Energiespeicher

Elektrische Energiespeicher werden in heutigen Kraftfahrzeugen benötigt, um den Verbrennungsmotor zu starten und bei abgeschaltetem Motor elektrische Verbraucher zu versorgen. Während der Fahrt gibt es zudem Betriebssituationen, in denen der Generator nicht genügend Leistung zur Verfügung stellen kann. Dies tritt vor allem in Erscheinung, wenn sich der Verbrennungsmotor im Leerlauf befindet und die Generatordrehzahl entsprechend niedrig ist. In diesen Fällen liefert der Energiespeicher den Differenzstrom, der zur Versorgung der elektrischen Verbraucher benötigt wird. Bei Fahrzeugen mit Start-Stop-System muss der Energiespeicher während kurzer Standzeiten an Ampeln sogar den kompletten Bedarf des Bordnetzes decken. Die Auslegung der Kapazität von Energiespeichern in 14 V Bordnetzen richtet sich bis heute hauptsächlich nach der verbauten Sonderausstattung und anderen Kriterien wie einer bestimmten Warnblinkdauer, Deckung des Ruhestroms und Gewährleistung der Startfähigkeit des Verbrennungsmotors nach einer mehrwöchigen Verschiffung von Neufahrzeugen [143]. Dabei werden mittlerweile Batterien mit einer Kapazität von bis zu 105 Ah und mehr eingesetzt. Vor allem beim Einsatz von Blei-Säure-Technologie ergeben sich daraus aufgrund des hohen Volumens und Gewichts zunehmend Probleme bei der Integration und der Gewichtsverteilung im Fahrzeug [26].

Blei-Säure-Batterien

Bis heute stellen Blei-Säure-Batterien den Standard als Energiespeicher in 14 V Bordnetzen dar. Dies liegt vor allem am günstigen Preis und dem vergleichsweise einfachen Herstellungsprozess [142]. Um den steigenden Leistungs- und Zyklisierungsanforderungen gerecht zu werden, kommen heute anstelle eines flüssigen Elektrolyts zunehmend feste Elektrolyte in Bleibatterien zum Einsatz. Der Elektrolyt wird dazu entweder in einem Gel oder in einem Vlies gebunden. Trotz

der gesteigerten Zyklfestigkeit gehören Batterieausfälle laut dem deutschen Automobilclub ADAC mittlerweile zu den Hauptursachen für Fahrzeugpannen [4].

Auf detaillierte Beschreibungen über den Aufbau und die chemische Funktionsweise von Bleibatterien wird an dieser Stelle verzichtet. In der Literatur sind entsprechende Ausführungen beispielsweise in [43, 63, 69, 82, 120, 125] zu finden.

Bis heute sind Bleibatterien Gegenstand der Forschung. Dabei richtet sich der Fokus derzeit vor allem auf die Vorhersage und Modellierung der Alterung [108].

Lithium-Ionen-Batterien

Aufgrund ihrer höheren Energie- und Leistungsdichte werden seit einiger Zeit Lithium-Ionen-basierte Energiespeicher als potenzieller Nachfolger der Bleibatterie diskutiert [39]. In diesem Zusammenhang kommt aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Sicherheit vor allem die Lithium-Eisenphosphat-Technologie in Frage, deren Zellspannung bis zu 3,3 V beträgt [135]. Bei Batterien auf Lithium-Ionen-Basis muss aus Sicherheitsgründen und zur Vermeidung von Zellschäden grundsätzlich darauf geachtet werden, dass sich die Spannung und Betriebstemperatur der Einzelzellen während des Betriebs innerhalb zulässiger Grenzen bewegen. Dazu sind bei serieller Verschaltung mehrerer Einzelzellen Batteriemanagementsysteme notwendig, die alle relevanten Parameter überwachen [63].

Bisher kommen Lithium-Ionen-Starterbatterien lediglich in Kleinserie bei Sportfahrzeugen zum Einsatz [33]. Jedoch ist vor allem bei Temperaturen unter null Grad Celsius die Startfähigkeit eingeschränkt, weswegen der Hersteller konventionelle Bleibatterien für die kalte Jahreszeit mitliefert.

Doppelschichtkondensatoren

Im Gegensatz zu Batterien speichern Kondensatoren Energie nicht elektrochemisch, sondern elektrostatisch durch Ladungstrennung. Ein Doppelschichtkondensator ist eine spezielle Ausführung eines Kondensators, bei dem der von Helmholtz entdeckte Effekt der Doppelschicht genutzt wird [9]. Diese Doppelschicht entsteht beim Anlegen einer Spannung an der Phasengrenze zwischen der Elektrodenoberfläche und dem Elektrolyten des Kondensators. Durch die Kombination von hochporösen Elektrodenmaterialien und flüssigen Elektrolyten ergeben sich enorme Oberflächen zur Erzeugung dieser Doppelschicht, die heute Kapazitäten bis zu einigen tausend Farad pro Einzelzelle ermöglichen. Mit der Verwendung von organischen Elektrolyten lässt sich dabei eine Maximalspannung von 2,7 V pro Zelle erzielen. Da oberhalb dieser Grenze die Zersetzung des Elektrolyts beginnt, muss bei serieller Verschaltung mehrerer Zellen eine Elektronik zur Symmetrierung und Spannungsbegrenzung verwendet werden.

Im Vergleich zu Batterien haben Doppelschichtkondensatoren zwar eine geringere spezifische Energiedichte, jedoch bieten sich durch die höhere spezifische Leistungsdichte vielfältige Einsatzszenarien in Fahrzeugbordnetzen an [21, 96, 114, 117, 122]. Eine Möglichkeit zur Stabilisierung der Bordnetzspannung ergibt sich durch die Parallelschaltung eines Doppelschichtkondensatorstapels zur Batterie [7, 111–113, 116]. Aufgrund der vergleichsweise hohen Selbstentladung benötigen diese Systeme eine Elektronik, die das Doppelschichtkondensatormodul im geparkten Zustand des Fahrzeuges vom Bordnetz trennt. Beim Starten des Fahrzeuges muss die Elektronik die Kondensatoren vorladen, bevor sie wieder ans Bordnetz geschaltet werden können. In [74] wird eine Spannungsstabilisierung mittels DC/DC-Steller und Doppelschichtkondensatormodul vorgeschlagen. Die Modulspannung wird dadurch vom Bordnetz entkoppelt und der Energieinhalt effizienter ausgenutzt. Zur Spannungsstabilisierung während des Motorstarts werden in [45, 75] Doppelschichtkondensatoren kurzzeitig in Serie zur Bordnetzbatterie geschaltet. Um die Effizienz des Bordnetzes zu steigern, wird in [19, 88, 134] eine Topologie vorgeschlagen, die mit Hilfe eines modifizierten Generators und eines Doppelschichtkondensatormoduls gesteigertes Rekuperationspotenzial ermöglicht. Der Generator und das DSK-Modul können für diesen Zweck ihre Spannung unabhängig vom 14 V Bordnetz in einem gewissen Bereich variieren und so in Bremsphasen mehr Energie aufnehmen, als es eine Bleibatterie könnte. Ein DC/DC-Steller verbindet in dieser Konstellation die beiden Teilbordnetze.

Entwicklungstrends

Das stetig steigende Marktvolumen und die Verwendung von günstigeren Materialien bei der Herstellung lässt erwarten, dass der Preis von Doppelschichtkondensatoren in den kommenden Jahren immer weiter sinken wird [93]. Durch die stetig steigenden Leistungsanforderungen in automobilen Bordnetzen werden Doppelschichtkondensatoren daher vermutlich zunehmend bei der Systementwicklung in Betracht gezogen werden.

Eine andere erfolgsversprechende Entwicklung adressiert die Probleme der vergleichsweise schlechten Ladeakzeptanz und Zyklisierbarkeit von heutigen Blei-Säure-Batterien für 14 V Bordnetze. Dazu werden in [123] eine Bleibatterie und eine Batterie auf Lithium-Ionen-Basis parallel geschaltet. Die Arbeit zeigt, dass bei geschickter Kombination die jeweiligen Nachteile einer Technologie durch die Vorteile der anderen Technologie kompensiert werden können. Vor allem im Hinblick auf Fahrzeuge mit Mikro-Hybrid-Funktion können dadurch eine bessere Systemeffizienz und Batterielebensdauer erreicht werden.

2.2.4 Energieverteilung

Die Stromversorgung der elektronischen Komponenten in Kraftfahrzeugen erfolgt über eine baumförmige Energieverteilungsstruktur mit einem hierarchischen Sicherungskonzept. Ausge-

hend von einer Hauptsicherungsbox am Pluspol der Batterie werden über Leitungen mit großen Querschnitten verschiedene Stromverteilerknoten im Front- und Heckbereich des Fahrzeuges angebunden. In diesen Knotenpunkten wird die Stromversorgung weiter verzweigt und erneut abgesichert [22]. Als Masserückleiter dient die Karosserie mit einer Vielzahl von angeschweißten Masseanschlussbolzen. Der Minuspol der Batterie ist an einer Stelle im Fahrzeug mit der Karosseriemasse verbunden, um den Stromkreis zu schließen.

Die Energieverteilung verursacht einen Großteil des Gewichts heutiger Kabelbäume, die bis zu 80 kg wiegen können [20, 70]. Aufgrund des hohen Gewichts, der großen Menge an benötigtem Kupfer und des sehr geringen Automatisierungsgrads bei der Fertigung gehören Kabelbäume zu den schwersten und teuersten Komponenten eines Fahrzeuges [17, 60, 146]. Eine Möglichkeit zur Gewichtseinsparung bietet sich durch den Einsatz von Aluminium für größere Kabelquerschnitte. Dies stellt jedoch neue Anforderungen an die Verbindungstechnik [22, 131]. Ein anderer Weg zur Gewichtsreduktion stellt die Ersetzung von konventionellen Schmelzsicherungen durch Sicherungen auf Halbleiterbasis dar [49, 141]. Auf diese Weise kann eine deutlich präzisere Absicherung vorgenommen werden, wodurch ggf. eine Verringerung von Leitungsquerschnitten erreicht werden kann.

Während in der Vergangenheit Karosserien entweder komplett aus Stahl oder Aluminium gefertigt und verschweißt wurden, werden Karosserieteile heute zur Gewichtsersparnis zunehmend aus unterschiedlichen Materialien hergestellt und anschließend verklebt. Dies erhöht den Widerstand von Masseverbindungen über die Karosserie zunehmend oder lässt gegebenenfalls gar keine Verbindung mehr zu. Auch der Einsatz von kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) verhindert die Nutzung der Karosserie als Masse-Rückleiter [35]. Aus diesem Grund sind neue Bordnetzarchitekturen und Energieverteilungsstrukturen für Leichtbau-Karosseriekonzepte Gegenstand von aktuellen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten.

2.2.5 Energieverbraucher

Grundsätzlich werden alle Komponenten, die elektrische Energie aus dem Bordnetz beziehen, als Energieverbraucher bezeichnet. Die Anzahl von Verbrauchern ist in den letzten Jahrzehnten sehr stark angestiegen. In heutigen Fahrzeugen werden je nach Fahrzeugklasse und Ausstattung bis zu 100 Steuergeräte verbaut [34, 59, 142]. Neben der Integration von Komfortverbrauchern sowie Sicherheits- und Fahrerassistenzsystemen ist die Elektrifizierung von Nebenaggregaten mitverantwortlich für die gestiegene Anzahl von Steuergeräten. Durch die Möglichkeit der bedarfsgerechten Ansteuerung von Nebenaggregaten durch elektromechanische Aktoren konnte der CO₂-Ausstoß über alle Fahrzeugklassen hinweg reduziert werden [107, 121].

Elektrische Verbraucher können anhand unterschiedlicher Eigenschaften klassifiziert werden. Die Klassifizierung richtet sich dabei vor allem nach dem jeweiligen Entwicklungsziel und

kann sich demnach deutlich unterscheiden. In [103] werden Steuergeräte beispielsweise nach funktionalen und sicherheitsbezogenen Aspekten differenziert. Im Kontext von Mechanismen für Energiemanagementsysteme wird in [38] hingegen nach Komfortverbrauchern, Grundlasten und sicherheitsrelevanten Verbrauchern unterschieden. Um das jahreszeitenabhängige Kundennutzungsverhalten miteinzubeziehen, wird in [26] sogar zwischen Winter- und Sommerverbrauchern unterschieden. In [8] wird neben energierelevanten Kriterien zum ersten Mal die Spannungsstabilität bei der Klassifizierung berücksichtigt.

Mit der Elektrifizierung von Nebenaggregaten hielten zu Beginn des 21. Jahrhunderts Systeme in Fahrzeugbordnetzen Einzug, die sich nicht nur durch eine hohe Spitzenleistungsaufnahme, sondern auch eine hohe Dynamik auszeichnen. Die elektrische Lenkkraftunterstützung (engl. electric power steering - EPS) in einem Oberklassefahrzeug benötigt beispielsweise über 2 kW an elektrischer Leistung. Gleichzeitig übersteigt die Lastdynamik einer elektrischen Lenkung die Generatorleistung bei Weitem [110]. Insgesamt verursachte die Elektrifizierung von Nebenaggregaten eine überproportional starke Zunahme der kumulierten Spitzenleistungsaufnahme aller Verbraucher, während der mittlere Leistungsbedarf nur geringfügig anstieg [54, 127]. Entsprechend dieser Entwicklung wird in [57] erstmals die Verbraucherdynamik bei der Klassifizierung einbezogen, indem der Maximalstrom ins Verhältnis zur aus der Batterie bezogenen Ladungsmenge gesetzt wird.

An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass in Bezug auf die Spannungsstabilität je nach Verbrauchertyp eine Spitzenleistung oder ein Spitzenstrom zusammen mit der jeweiligen Dynamik für eine Klassifizierung verwendet werden sollten.

2.3 Bordnetztopologien

Ein konventionelles 14 V Bordnetz wird von einem Generator und einem Energiespeicher versorgt. Der Generator wird zwangsläufig zusammen mit dem Verbrennungsmotor im Motorraum – und damit bei einem Großteil der Fahrzeuge im vorderen Bereich des Fahrzeuges – untergebracht. Direkt am Verbrennungsmotor befindet sich auch der elektrisch betriebene Starter, der zum Anlassen des Verbrennungsmotors dient [120].

Für die Einbauposition der Batterie kommen unterschiedliche Stellen im Fahrzeug in Frage. Der häufigste Einbauort ist der Motorraum eines Fahrzeuges. Im Winter bietet diese Position den Vorteil, dass die Batterie durch die Abwärme des Verbrennungsmotors relativ schnell auf eine Betriebstemperatur gebracht werden kann, bei der sie eine zufriedenstellende Ladeakzeptanz aufweist. Jedoch erkaufte man sich damit gleichzeitig den Nachteil, dass die Batterie im Sommer unerwünscht hohen Umgebungstemperaturen ausgesetzt ist [26]. Vor allem bei Oberklassefahrzeugen muss durch den Einsatz von großen Batterien und beengten Verhältnissen im Motorraum eine Einbauposition des Energiespeichers im Heck des Fahrzeuges gewählt werden [55]. Diese

Position schützt die Batterie zwar vor der Abwärme des Verbrennungsmotors im Sommer, jedoch kann sie dementsprechend im Winter auch nicht schnell erwärmt werden [120]. Aus fahrdynamischen Gesichtspunkten ist die Einbauposition im Heck ein klarer Vorteil, jedoch gibt es auch elektrische Nachteile: Zum einen verlängert sich die Leitung von der Batterie zum Starter und Generator im Motorraum erheblich. Zum anderen dient die Batterie zur Glättung der Spannungsrestwelligkeit, die der Generator verursacht [12]. Sensible Verbraucher müssen daher stets so angebunden sein, dass die Batterie zwischen dem jeweiligen Verbraucher und dem Generator geschaltet ist. Dieser Umstand verlängert bei einer heckseitigen Batteriepositionierung die Leitungslängen vom Generator zu den Verbrauchern zusätzlich und führt dementsprechend zu Spannungsabfällen am Kabelbaum. Wenn jedoch ein Verbraucher aus bestimmten Gründen direkt an den Generator angeschlossen werden soll, so muss die Spannungsrestwelligkeit bei der Komponentenauslegung berücksichtigt werden. In diesem Fall können auch direkt an den Generator angeschlossene Kondensatoren für eine grobe Glättung der Spannungswelligkeit vorgesehen werden [73].

Durch die Einführung von Start-Stopp-Systemen wurde die oben diskutierte Basistopologie bei bestimmten Fahrzeugen höherer Klasse um einen weiteren Energiespeicher zu einem Zwei-Batterien-Bordnetz erweitert [50]. Ein spezielles Leistungselektronikmodul ermöglicht hier während des Motorstarts die Entkopplung des Teilbordnetzes, das aus dem Anlasser und einer Batterie besteht [72, 120]. Auf diese Weise können Verbraucher während des Motorstarts zuverlässig versorgt, und somit Komforteinschränkung für die Fahrzeuginsassen vermieden werden [40]. Bei der Systemauslegung können die beiden Energiespeicher entsprechend ihrer Anforderung präzise ausgelegt werden. Für den Motorstart kann beispielsweise eine kompakte Batterie mit vergleichsweise geringer Kapazität gewählt werden, die auf hohe Leistung getrimmt ist.

Die geplante Einführung einer zusätzlichen 48 V Spannungsebene in Kraftfahrzeugen wird in Zukunft neue Bordnetztopologien ermöglichen [32]. Wie in Fahrzeugen mit hybriden und elektrischen Antriebssträngen wird dort ein DC/DC-Wandler zur Versorgung des 14 V Bordnetzes verwendet werden. Aber auch durch den Einsatz von Doppelschichtkondensatoren bietet sich eine Vielzahl an möglichen Systemstrukturen [109]. An dieser Stelle wird auf eine ausführliche Diskussion möglicher Bordnetztopologien durch den Einsatz zusätzlicher Energiespeicher oder Spannungsebenen verzichtet und auf [19, 21, 32, 38, 54, 58, 75, 110, 116, 134, 140] verwiesen.

Gänzlich neue Anforderungen an eine Bordnetzstruktur stellen X-by-Wire-Systeme und Fahrzeugfunktionen für autonomes Fahren. Hier haben vor allem die Fehlertoleranz und Ausfallsicherheit des Bordnetzes oberste Priorität. Dementsprechend müssen Energieversorgungstopologien entwickelt werden, die durch eingebaute Redundanzen die notwendige Sicherheit gewährleisten [132].

2.4 Kritische Belastungszustände

Zur Berücksichtigung der Spannungsstabilität bei der Auslegung von Fahrzeugbordnetzen müssen extreme Belastungsszenarien herangezogen werden. Durch die hohe Anzahl von Verbrauchern und die vielen Einflussfaktoren ist die Definition dieser Worst-Case-Szenarien nicht trivial. Die möglichen Einflussfaktoren reichen dabei von der Umgebungs- und Betriebstemperatur der Komponenten über den Einfluss von Witterungsbedingungen und des Fahrbahnbelages bis hin zum Fahrer- bzw. Nutzungsverhalten. Weitere Einflussfaktoren ergeben sich durch den Lade- und Alterungszustand der verbauten Energiespeicher sowie durch Korrosion der im Bordnetz verbauten Steckkontakte.

Grundsätzlich können immer dann kritische Belastungsszenarien entstehen, wenn die Verbraucherdynamik die Generatordynamik übersteigt (vgl. Abschnitt 2.2.5). Diese Verbrauchercharakteristik trifft vor allem auf Komponenten im Fahrdynamik- und Fahrwerksbereich zu. Neben der elektrischen Lenkkraftunterstützung gehört dazu auch der elektrohydraulische Aktuator der Dynamischen Stabilitätskontrolle (engl. dynamic stability control - DSC) [142]. Bei einem BMW 7er der Baureihe F01/F02 kommen zusätzlich noch elektromechanische Aktoren hinzu, die eine Lenkbewegung der Hinterräder von bis zu 3° in beide Richtungen ermöglichen [56]. Dieses System wird als Hinterachsschräglaufrregelung (HSR) bezeichnet. In Fahrsituationen, die eine gleichzeitige Aktivierung aller Fahrwerkssysteme erfordern, können dementsprechend durch Überlagerungen extreme Spitzenbelastungen auftreten. Eine Verschärfung dieser Belastungssituation tritt dann auf, wenn sich der Verbrennungsmotor im leerlaufnahen Bereich befindet. Die ohnehin schon unzureichende Dynamik des Generators wird in dieser Betriebssituation künstlich limitiert (vgl. Abschnitt 2.2.1). Gleichzeitig ist der Generator bei niedrigen Drehzahlen nicht in der Lage, seine volle Leistung abzugeben [55].

Ein entsprechendes Belastungsszenario stellt ein Ausweichmanöver bei langsamer Fahrt dar. Dort werden alle oben diskutierten Systeme gleichzeitig aktiv. Die Erweiterung des Szenarios um eine hohe Grundauslastung des Bordnetzes ergibt einen Belastungsfall, der als Referenz für die Auslegung der Spannungsstabilität von Bordnetzen betrachtet werden kann.

3 Modellierung und Simulation eines konventionellen Energiebordnetzes

Zur Simulation der Spannungsstabilität in automobilen Bordnetzen sind Modelle notwendig, die das dynamische Verhalten aller relevanten Komponenten möglichst genau abbilden. Um das Spannungsverhalten in einem konventionellen Niedervoltbordnetz zu simulieren, sind mindestens Modelle von Generator, Batterie, Verbrauchern und des Kabelbaums notwendig. Die elektrischen Eigenschaften sowie die Modellierung dieser Basiskomponenten sind Inhalt dieses Kapitels.

3.1 Blei-Säure-Akkumulator

Zur Modellierung von Bleibatterien hat sich in der Literatur ein elektrisches Klemmenspannungsmodell bewährt, das auf der Verwendung von mindestens einer Spannungsquelle, einem Innenwiderstand sowie einer bestimmten Anzahl RC-Gliedern aufbaut [24, 25, 84, 89]. Je nach Anforderung an das Modell wird gegebenenfalls eine Induktivität ergänzt. Induktive Effekte treten allerdings erst im Frequenzbereich über 100 Hz auf. Als guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Parametrierungsaufwand haben sich drei RC-Glieder für die Modellbildung als gute Wahl erwiesen [24, 44]. Ein entsprechendes Batteriemodell ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Das Modell vernachlässigt in dieser Form allerdings die Selbstentladung der Batterie sowie die Ausgasung, die beim Aufladen des Akkumulators bei hohen Ladezuständen auftritt. Da im Rahmen dieser Arbeit für die Betrachtung der Spannungsstabilität lediglich kurze Zeiträume betrachtet werden, in denen die Batterie entladen wird, können Gasungs- und Selbstentladungseffekte vernachlässigt werden.

Die elektrischen Eigenschaften eines Bleiakkumulators sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Neben dem Ladezustand (engl.: State of Charge - SoC), spielen die Temperatur, die Alterung sowie der Klemmenstrom eine Rolle. Aus Komplexitätsgründen wird auf die Alterung sowie die Temperaturabhängigkeit an dieser Stelle verzichtet und auf [84, 108] verwiesen.

Eine Methode zur Parametrierung des Batteriemodells stellt die Impedanzspektroskopie dar [24, 84]. Zur Betrachtung der Bordnetzstabilität ist vor allem das Batterieverhalten bei hohen Entladeströmen relevant. Jedoch sind der Impedanzspektroskopie in Bezug auf die maximal

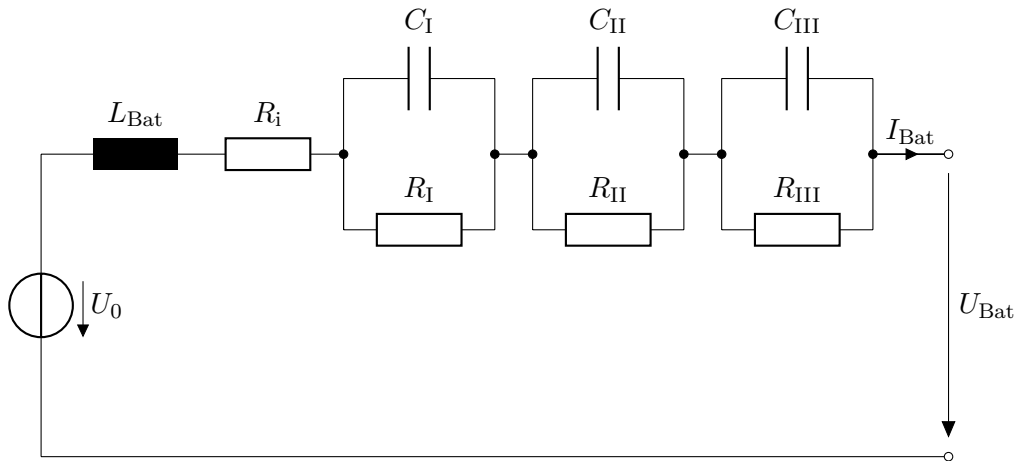


Abbildung 3.1 – Elektrisches Ersatzschaltbild einer Bleibatterie: Das Klemmenverhalten wird durch eine Gleichspannungsquelle U_0 , eine Induktivität L_{Bat} , einen Innenwiderstand R_i sowie drei RC-Glieder modelliert.

mögliche AC-Stromamplitude gewisse Grenzen gesetzt. Eine Möglichkeit zur Parametrierung des Modells für hohe Stromamplituden bietet die Beaufschlagung der Batterie mit rechteckförmigen Strompulsen. Die Kenntnis von Strom- und Spannungsverlauf an den Batterieklemmen ermöglicht mit Hilfe von Fitting- oder Optimierungsverfahren die Parameterbestimmung des Ersatzschaltbildes.

3.2 Generator

Für die Simulation der Bordnetzstabilität muss das dynamische Verhalten des Generators bei Lastveränderungen im Bordnetz möglichst gut nachgebildet werden. Die Funktionsweise des Generators ist schematisch in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Erregung des Generators erfolgt über eine Erregerwicklung, die mit Hilfe des Generatorreglers und einem Leistungsschalter bestromt wird. Der Mittelwert des Erregerstroms wird vom Regler so eingestellt, dass die gleichgerichtete dreiphasige Wechselspannung dem vom Bordnetzmanagement gewünschten Wert entspricht. Die Kommunikation des Generatorreglers mit dem Bordnetzmanagement erfolgt bei modernen Kfz-Generatoren über den LIN-Bus (Local Interconnect Network) [51]. Die Bleibatterie dient im Bordnetz als Glättungsglied und dämpft die Wechselanteile der gleichgerichteten Spannung des Generators.

Die maximal mögliche Dynamik des Generators ist durch den Erregerkreis limitiert, der Zeitkonstanten im kleinen dreistelligen Millisekundenbereich aufweist [105]. Dementsprechend ist bei der Modellbildung des Generators der Fokus auf die Nachbildung der dynamischen Eigenschaften des Erregerkreises zu legen.

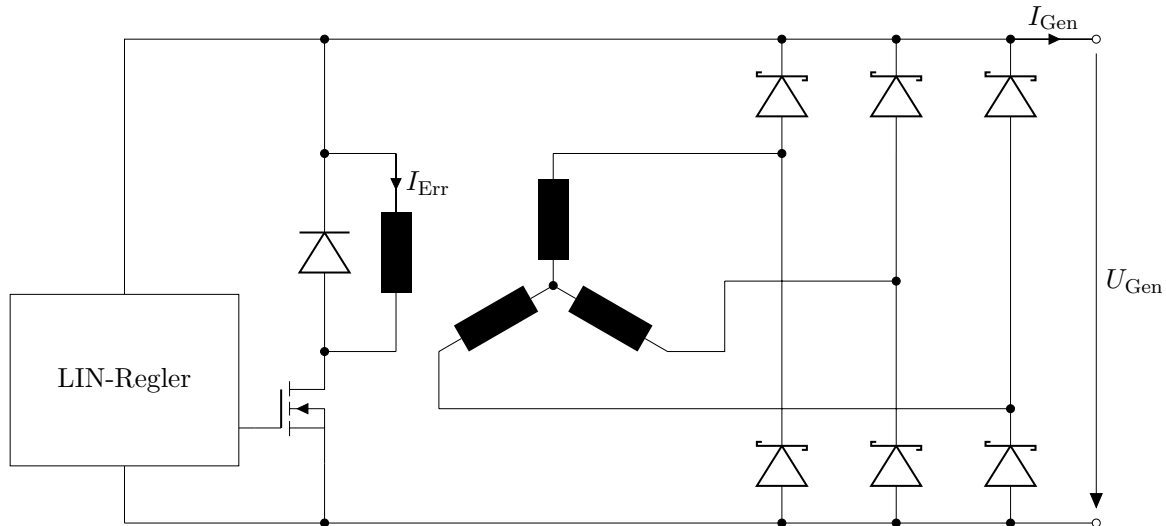


Abbildung 3.2 – Schematischer Aufbau des Generators: Durch den Generatorregler wird der Erregerstrom I_{Err} so eingestellt, dass der Mittelwert der gleichgerichteten dreiphasigen Wechselspannung der gewünschten Generatorspannung U_{Gen} entspricht.

3.2.1 Generatorprüfstand

Um das dynamische Verhalten des Generators für die Modellbildung zu vermessen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Prüfstand aufgebaut. Der schematische Aufbau des Prüfstands ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Angetrieben wird der Kfz-Generator von einer Asynchronmaschine, die mit Hilfe eines Pulswechselrichters drehzahlvariabel betrieben wird. Die Asynchronmaschine und der Kfz-Generator sind über einen Riementrieb mit dem Übersetzungsverhältnis 2,79 gekoppelt. An der Asynchronmaschine können die Drehzahl und das Drehmoment über eine Messwelle ausgewertet werden. Der gekoppelte Maschinensatz ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Der Kfz-Generator ist mit einer Bleibatterie und einer elektronischen Last verbunden. Mit der elektronischen Last können Belastungssprünge simuliert werden. Die Ströme an Generator und Batterie werden mit Kompensationsstromwandlern erfasst. Neben den Strömen werden an denselben Messpunkten auch die Spannungen gemessen. An der elektronischen Last können Strom und Spannung über eine analoge Schnittstelle ausgewertet werden. Die Messwernerfassung erfolgt über eine Mess- und I/O-Karte NI-PCI-6229 der Firma National Instruments, die in einen handelsüblichen PC eingebaut ist. Dieser PC übernimmt neben der Messwernerfassung gleichzeitig die Funktion der Prüfstandssteuerung. Mit Hilfe eines CAN-Interface (Controller Area Network [81]) können Drehzahlsollwerte an den Umrichter gesendet werden. Die Konfiguration des Kfz-Generators erfolgt über ein LIN-Interface, mit dem beispielsweise Spannungssollwerte vorgegeben werden können. Die Ansteuerung und Konfiguration der elektronischen Last erfolgt über I/O-Ports und Digital/Analog-Wandler der im PC verbauten Messkarte.

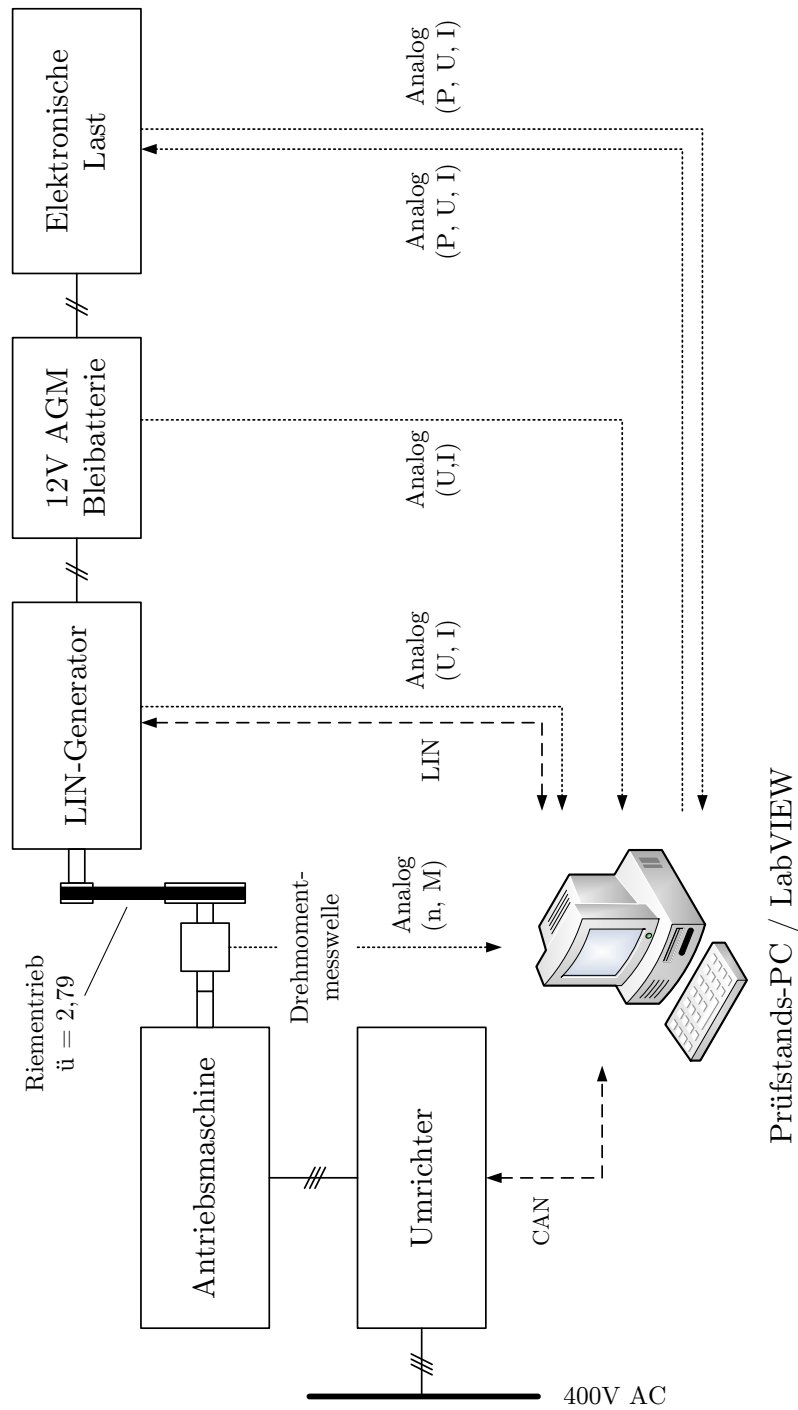


Abbildung 3.3 – Schematischer Aufbau des Generatorprüfstands: Der Generator wird von einer Maschinen/Umrichter-Kombination über einen Riemetrieb angetrieben. Elektrisch ist der Generator an eine Bleibatterie und eine elektronische Last angebunden. Über einen Prüfstands-PC können Messwerte von Strömen und Spannungen an verschiedenen Messpunkten sowie die Drehzahl und das Drehmoment der Antriebsmaschine eingelesen werden. Die Ansteuerung erfolgt über eine LabVIEW-Bedienoberfläche.

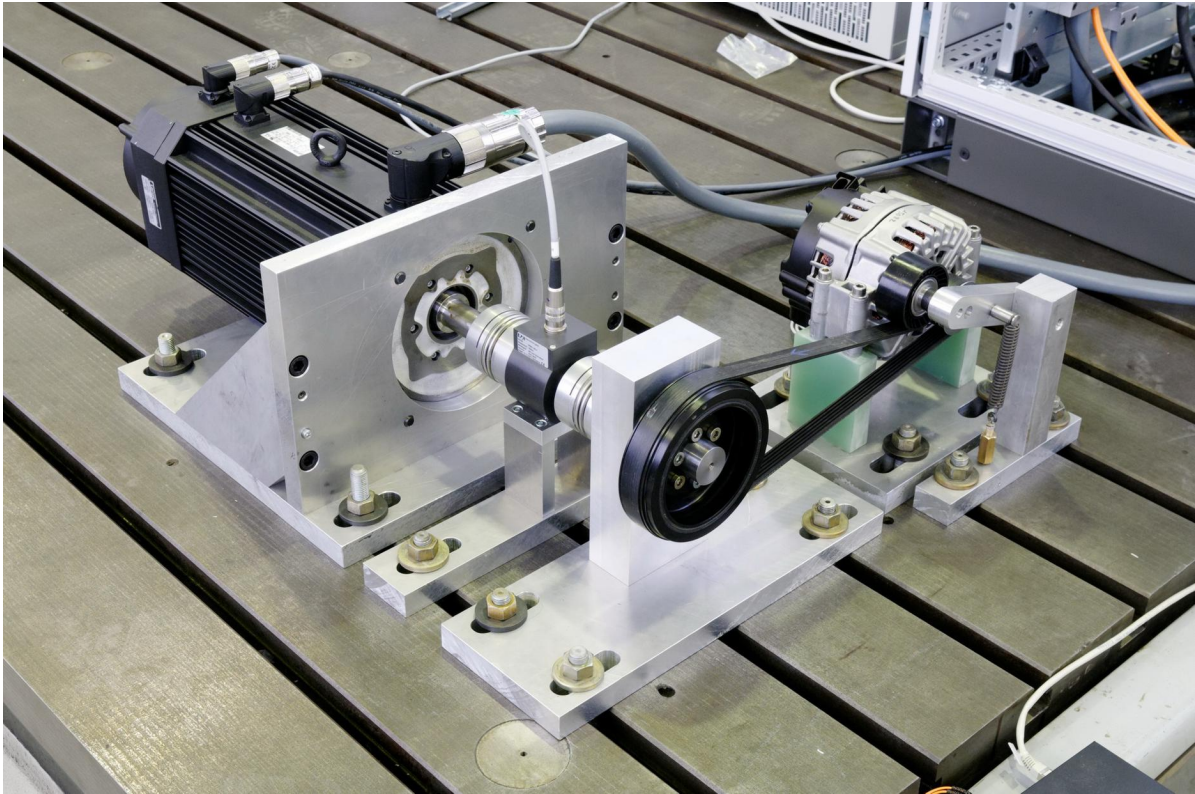


Abbildung 3.4 – Antriebsmaschine und Kfz-Generator, die über einen Riementrieb miteinander gekoppelt sind. Eine antriebsseitige Messwelle erlaubt die Erfassung von Drehmoment und Drehzahl.

3.2.2 Generatormodell

Für die simulative Untersuchung der Bordnetzstabilität ist ein Modell notwendig, das die dynamischen Eigenschaften des Generators hinreichend genau nachbildet. Die durch die Gleichrichtung der dreiphasigen Wechselströme entstehenden Wechselstromanteile werden bei der Modellbildung vernachlässigt, da sie keine Relevanz für die Bordnetzstabilität haben. Unter dieser Voraussetzung wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Verhaltensmodell entwickelt, dessen Grundstruktur in Abbildung 3.5 dargestellt ist. Insgesamt besteht das Modell aus drei Teilblöcken. Im ersten Block ist der Generatorregler nachgebildet, für den die Generatorspannung U_{Gen} , die Generatorsollspannung $U_{\text{Gen,soil}}$ sowie die Load-Response-Zeit t_{LR} als Eingangsgrößen dienen. Im Modellierungsblock des Generatorreglers ist die Spannungsregelung des Generators nachgebildet, die wie im realen Generator als Zweipunktregler ausgeführt ist. Zusätzlich ist in diesem Modellblock die Load-Response-Funktion integriert, die eine Dynamikbegrenzung des Generators ermöglicht. Vom Generatorreglermodell wird die Erregerspannung U_{Err} in das Modell des Erregerkreises übergeben. In diesem Modellblock sind der ohmsche Widerstand und die Induktivität des Erregerkreises hinterlegt, die vorab messtechnisch bestimmt wurden.

Der errechnete Erregerstrom I_{Err} wird in den letzten Modellblock übergeben, der aus dem aktuellen Erregerstrom und der Generatorzahl den zugehörigen Generatorsollstrom ermittelt. Die Bestimmung des Generatorstroms aus Erregerstrom und Generatorzahl erfolgt dabei aus hinterlegten Näherungsfunktionen, die aus messtechnisch ermittelten Kennfeldern abgeleitet wurden. Dadurch wird während der Simulation Rechenzeit für Interpolationsvorgänge gespart. Vom letzten Modellblock wird der Generatorsollstrom $I_{\text{Gen}_{\text{soll}}}$ an eine ideale, gesteuerte Stromquelle übergeben.

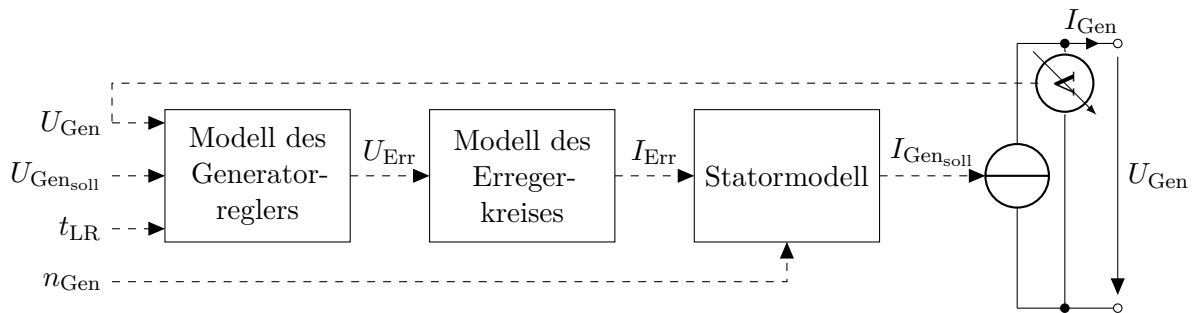


Abbildung 3.5 – Struktur des Generatormodells. Als Eingangsgrößen werden die Generatorspannung U_{Gen} , die Generatorsollspannung $U_{\text{Gen}_{\text{soll}}}$, die Load-Response-Zeit t_{LR} und die aktuelle Generatorzahl n_{Gen} verwendet. Die berechnete Sollvorgabe für den Generatorstrom $I_{\text{Gen}_{\text{soll}}}$ dient als Eingangsgröße für eine gesteuerte Stromquelle.

Die Parameterbestimmungen und Kennfeldermessungen zur Modellparametrierung wurden im Rahmen dieser Arbeit zur Vereinfachung lediglich bei Raumtemperatur durchgeführt. Das Modell vernachlässigt aus diesem Grund sämtliche Temperaturabhängigkeiten. Bei Bedarf können entsprechende Parametrierungen oder Modellerweiterungen vorgenommen werden. Für weiterführende Informationen über die Temperaturabhängigkeiten von Kfz-Generatoren wird an dieser Stelle auf [57] verwiesen.

3.2.3 Modellvalidierung

Um das Generatormodell zu validieren, wurde in einer Simulation die Prüfstands Umgebung nachgebildet, die aus Generator, Batterie und einer elektronischen Last besteht. Für den Vergleich des realen Generators und des Simulationsmodells wurden am Prüfstand und in der Simulation Sprungantworten des Generatorausgangsstroms auf elektrische Lastaufschaltungen ermittelt. In Abbildung 3.6 ist exemplarisch der Verlauf des messtechnisch ermittelten und simulierten Generatorstroms bei einem Lastsprung von 10 A auf 220 A zum Zeitpunkt $t=0,05$ s abgebildet. Der Generator kann dem Lastsprung lediglich mit seiner maximal möglichen Dynamik folgen, die durch den Erregerkreis bestimmt ist. Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, werden durch das Simulationsmodell die hochfrequenten Wechselanteile des Generatorstroms vernachlässigt,

da diese für die Bordnetzstabilität keine Relevanz haben. Für die Bordnetzstabilität ist vor allem eine korrekte Abbildung der dynamischen Eigenschaften ausschlaggebend. Der Vergleich in Abbildung 3.6 zeigt, dass der Verlauf und die Steigung des simulierten Stroms sehr gut mit der Messung übereinstimmen. Die maximale Abweichung der Stromsteilheit von Simulationsmodell und Generator liegt im Bereich von weniger als vier Prozent. Dabei bezieht sich dieser Wert auf gefilterte Generatorstromverläufe, bei denen die vom Generatorregler und von der Gleichrichtung hervorgerufenen Wechselanteile im Strom herausgerechnet wurden.

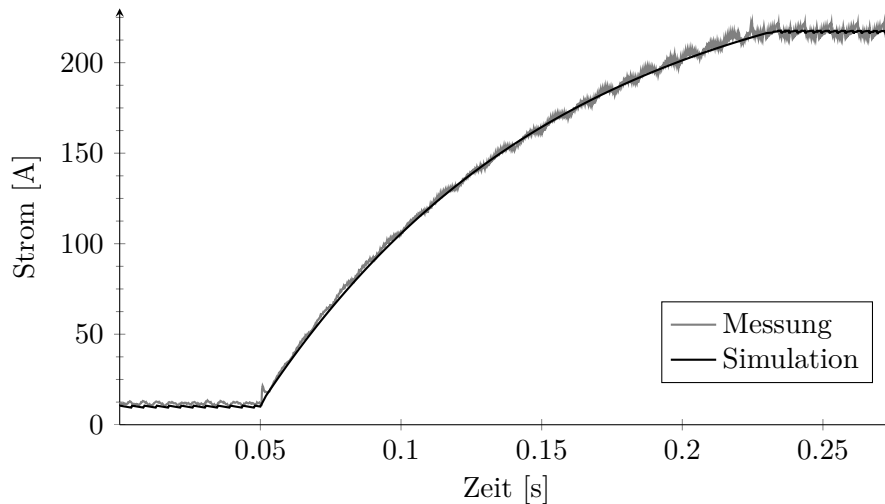


Abbildung 3.6 – Gemessener und simulierter Verlauf der Sprungantwort des Generators auf einen Lastsprung von 10 A auf 220 A zum Zeitpunkt $t=0,05$ s. Die Messung und Simulation wurde bei einer Generatorsollspannung von 13 V bei einer Generatorzahl von 8370 min^{-1} (Antriebsmaschine: 3000 min^{-1}) durchgeführt.

3.3 Elektrische Verbraucher

Die simulative Nachbildung von elektrischen Verbrauchern in Kfz-Bordnetzen kann grundsätzlich auf verschiedene Arten erfolgen. Beispielsweise können Modelle entwickelt werden, die alle physikalischen Wirkzusammenhänge auf die Stromaufnahme eines Steuergeräts in Betracht ziehen. Bei komplexen Systemen, wie beispielsweise einer elektrischen Vorderachs- oder Hinterachslenkung, ist diese Art der Modellbildung allerdings äußerst komplex, denn die Stromaufnahme dieser Komponenten ist von vielen Parametern abhängig. Unter anderem haben Temperatur, dynamische Achslastverteilung, Fahrbahnbelag und Reifenbeschaffenheit einen signifikanten Einfluss auf das jeweilige Lastverhalten.

Um den Aufwand für die Modellierung in Grenzen zu halten, kann die Simulation nach der jeweiligen Verbrauchercharakteristik und entsprechend hinterlegten Profilen erfolgen [44]. Die

Profile für derartige Verbrauchermodelle können beispielsweise aus Referenzmessungen in realen Fahrzeugen oder bei manchen Systemen auch durch Messungen von Einzelkomponenten ermittelt werden.

In diesem Unterkapitel werden Modellierungsansätze für unterschiedliche Verbrauchertypen erläutert, die für eine simulative Betrachtung der Bordnetzstabilität notwendig sind. Dabei wird besonderer Wert auf die Berücksichtigung der verbraucherspezifischen Spannungsabhängigkeiten gelegt.

3.3.1 Ohmsche Verbraucher

In Fahrzeugbordnetzen gibt es einige Verbraucher, die das Verhalten eines einfachen ohmschen Verbrauchers aufweisen. Zu dieser Kategorie gehören beispielsweise Heizungssysteme wie Sitzheizungen oder eine Heckscheibenheizung. Die Widerstandswerte der jeweiligen Heizelemente sind von der Temperatur abhängig. Dementsprechend kann die Stromaufnahme solcher Komponenten selbst bei einer konstanten Klemmenspannung variieren. Um eine konstante Heizleistung zu erzeugen, wird meist über Leistungsschalter oder zum Teil auch Relais der Heizwiderstand zyklisch ein- und ausgeschaltet. Die Frequenz dieser Pulsweitenmodulation wird bedingt durch die großen thermischen Zeitkonstanten von Heizsystemen oftmals sehr klein gewählt. Zum Teil beträgt sie lediglich einen Bruchteil von einem Hertz.

Für die simulative Untersuchung der Spannungsstabilität werden meist kurze Spitzenlastszenarien betrachtet, deren Dauer lediglich einige Sekunden oder weniger beträgt. Innerhalb dieses Zeitraumes kann sich der Widerstandswert von Heizsystemen aufgrund der großen thermischen Zeitkonstanten nur äußerst geringfügig ändern, weshalb in der Modellbildung auf einen konstanten Widerstandswert zurückgegriffen werden kann.

3.3.2 Leistungsverbraucher

Unter die Kategorie der Leistungsverbraucher fällt eine Vielzahl von Steuergeräten, in denen Mikrocontroller, Prozessoren, Sensoren oder Interfaces zur Buskommunikation arbeiten. Diese Systeme werden mit geregelten Betriebsspannungen weit unterhalb der 14 V versorgt, die über effiziente Gleichspannungswandler bereitgestellt werden. Unter der Annahme, dass die Effizienz der verbauten Gleichspannungswandler im relevanten Bordnetzspannungsbereich lediglich um wenige Prozentpunkte variiert, kann die Leistungsaufnahme derartiger Systeme für stationäre Betriebszustände in guter Näherung als spannungsunabhängig betrachtet werden. Grundsätzlich variiert die Leistungsaufnahme selbstverständlich in Abhängigkeit des Betriebszustands eines Steuergeräts. Für die Betrachtung der Bordnetzstabilität während kurzer Spitzenlastszenarien kann jedoch unter einer weiteren Prämisse die Eingangsleistung als konstant angesehen werden.

Mit einem entsprechenden Modellierungsansatz (vgl. Abbildung 3.7) lässt sich beispielsweise die elektrische Grundlast derjenigen Steuergeräte eines Fahrzeugs nachbilden, die mindestens für den Fahrbetrieb notwendig sind.

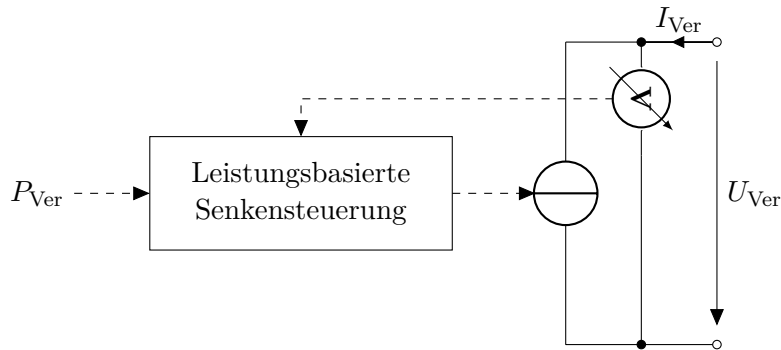


Abbildung 3.7 – Verbrauchermodell mit Leistungscharakteristik. Die Stromsenke wird derart angesteuert, dass die aufgenommene Leistung an den Verbraucherklammern dem vorgegebenen Wert P_{Ver} entspricht.

3.3.3 Leistungselektronisch geregelte Aktoren

Wie in Abschnitt 2.4 erläutert, sind Aktoren im Fahrwerksbereich die Hauptursache für Spannungsstabilitätsprobleme in Kfz-Bordnetzen. Die Aktoren der elektrischen Lenkkraftunterstützung (EPS) und Hinterachsschräglaufregelung (HSR) werden durch leistungselektronische Systeme geregelt. Die Sollwertvorgabe für das Lenkmoment des EPS erfolgt dabei durch den Fahrer, für die HSR hingegen durch die Fahrdynamikregelung. In beiden Fällen sorgt die Regelung der Aktoren dafür, dass einer Sollwertvorgabe schnellstmöglich gefolgt wird. Die Systeme sind weiterhin so ausgelegt, dass die Leistungselektronik innerhalb eines definierten Spannungsbereichs des Bordnetzes den Aktuator zuverlässig antreiben kann. Wenn die Spannung an den Eingangsklemmen unter einen kritischen Wert fällt, wird durch die Regelung eine Begrenzung der Aktuatorleistung vorgenommen, um das Bordnetz nicht zu überlasten. Allerdings können dadurch kritische Zustände entstehen, denn bei der elektrischen Lenkkraftunterstützung führt die Leistungsbegrenzung zu einer „Verhärtung“ der Lenkung, die im Extremfall zu einem Unfall führen kann. Aus diesem Grund ist bei der Auslegung des Bordnetzes darauf zu achten, dass selbst während kurzzeitiger Spitzenbelastungen die Spannung an den Steuergeräteklammern ausreicht, um eine volle Funktionsfähigkeit zu ermöglichen. Unter der Voraussetzung, dass kritische Unterspannungen und damit erzwungene Leistungsbegrenzungen vermieden werden sollen, kann für die Modellierung angenommen werden, dass der Verlauf der Eingangsleistung geregelter Aktoren während eines Fahrmanövers unabhängig von der Eingangsspannung ist. Ein derartiger Modellierungsansatz ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

Sofern Informationen über den Wirkungsgrad der eingesetzten Leistungselektronik vorliegen,

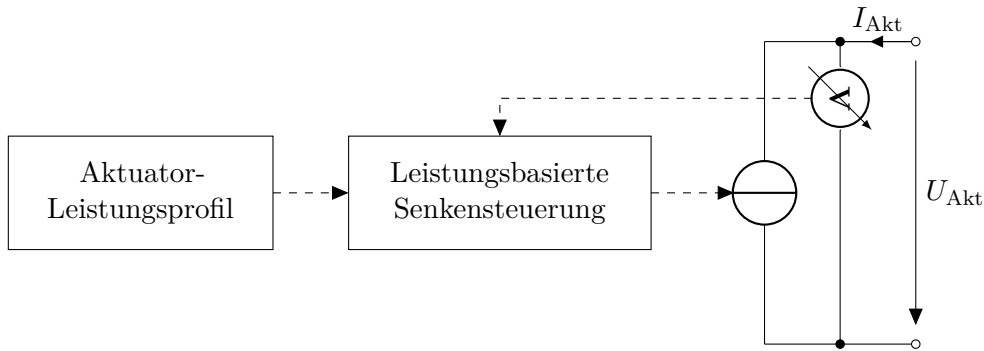


Abbildung 3.8 – Verbrauchermodell eines Aktuators mit Leistungscharakteristik. Eine Stromsenke wird derart angesteuert, dass der zeitliche Verlauf der Klemmenleistung des Modells einem hinterlegten Aktuator-Leistungsprofil entspricht.

kann für eine Verbesserung des Modells eine Wirkungsgradkorrektur ergänzt werden. Die Grundidee für ein Verbrauchermodell mit Wirkungsgradkorrektur ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Dort wird durch einen weiteren Block die Ansteuerung der Stromsenke so korrigiert, dass der arbeitspunktabhängige Wirkungsgrad berücksichtigt wird. Grundvoraussetzung für eine derartige Korrektur sind allerdings Wirkungsgradkennfelder, die für den gesamten Bereich möglicher Eingangsspannungen und Eingangsströme vorliegen müssen. Im Rahmen dieser Arbeit lagen entsprechende Daten nicht vor, weshalb ein derartiges Modell nicht implementiert wurde.

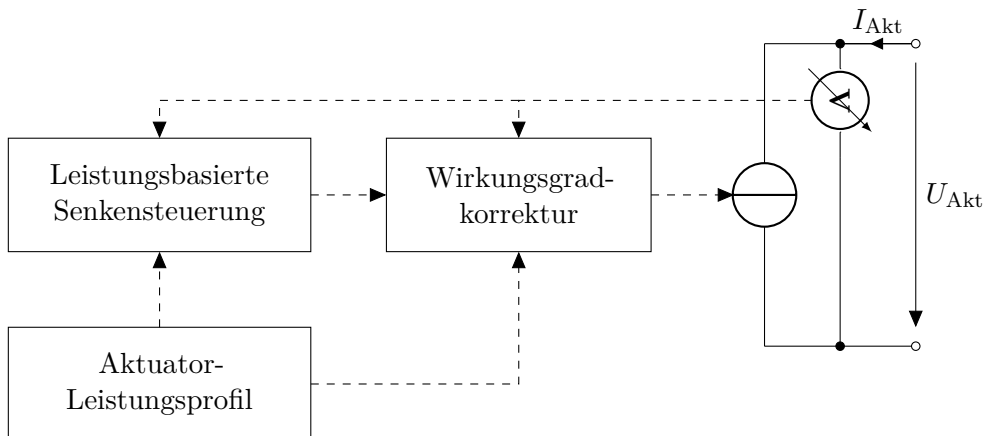


Abbildung 3.9 – Verbrauchermodell eines Aktuators mit Leistungscharakteristik und Wirkungsgradkorrektur. Im Vergleich zum Aktuatoremodell in Abbildung 3.8 wird die Ansteuerung der Stromsenke durch einen weiteren Block so korrigiert, dass der arbeitspunktabhängige Wirkungsgrad des Systems berücksichtigt wird.

3.3.4 Ungeregelte Aktoren

In einem Kfz-Bordnetz gibt es diverse Aktorsysteme, die durch ungeregelte Gleichstrommaschinen angetrieben werden. Beispiele für derartige Systeme sind vor allem im Komfortbereich

zu finden. Unter anderem werden Fensterheber, Schiebedächer, Sitzverstellungssysteme oder elektrisch verstellbare Außenspiegel mit Gleichstrommaschinen angetrieben. Der größte, und damit hinsichtlich der Spannungsstabilität kritischste Vertreter dieser Gattung ist allerdings im Fahrwerksbereich zu finden. Dort wird die Hydraulikpumpe des Steuergeräts für die Dynamische Stabilitätskontrolle (DSC) ebenfalls von einer Gleichstrommaschine angetrieben. Stellvertretend für die gesamte Klasse der unregelten Aktoren wird in diesem Abschnitt die Modellierung eines DSC-Systems erörtert. Primärer Fokus wird dabei auf eine möglichst genaue Abbildung des Anlaufspitzenstroms gelegt, denn dieser ist maßgeblich für den Betrag des Spannungseinbruches verantwortlich.

Die Pumpe eines DSC-Steuergeräts hat die Aufgabe, den Hydraulikdruck des Systems in einem definierten Bereich zu halten. Um diese Funktion zu erfüllen, wird die verbaute Gleichstrommaschine zyklisch ein- und ausgeschaltet. Problematisch für die Bordnetzstabilität ist dabei, dass der Ankerkreis über einen Leistungshalbleiter hart an das Bordnetz geschaltet wird und die Maschine meist aus dem Stillstand heraus anläuft. Im Stillstand ist die induzierte Spannung u_i gleich null. Dadurch wird beim Schließen des Leistungsschalters der Anlaufstrom zunächst lediglich durch den Ankerwiderstand R_A und die Ankerinduktivität L_A begrenzt. Die folgenden Gleichungen (3.1) bis (3.4) beschreiben das vereinfachte elektrische und mechanische Verhalten einer permanentmagneterregten Gleichstrommaschine [147]:

$$u_A = R_A \cdot i_A + L_A \cdot \frac{di_A}{dt} + u_i \quad (3.1)$$

$$u_i = c \cdot \Phi_E \cdot \Omega \quad (3.2)$$

$$m_D = c \cdot \Phi_E \cdot i_A \quad (3.3)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (m_D - M_L) \quad (3.4)$$

Für die Modellerstellung der Gleichstrommaschine stand ein DSC-System kleinerer Bauart zur Verfügung, das in Fahrzeugen der Kompaktklasse zum Einsatz kommt. Einige Parameter, wie zum Beispiel die Impedanzen der verbauten Entstördrosseln und des Ankers, konnten nach der Zerlegung der Maschine messtechnisch bestimmt werden. Andere Parameter wurden zum Teil aus Datenblättern entnommen oder durch Leerlaufmessungen bestimmt. Das vollständige elektrische Klemmenmodell bei geschlossenem Leistungsschalter ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Der Spannungsabfall am Leistungswiderstand wird durch den Bahnwiderstand $R_{DS_{on}}$ des MOSFET-Leistungsschalters modelliert. Im Widerstand R_K sind sämtliche Kontaktierungs- und Leitungswiderstände zusammengefasst. Die beiden Entstördrosseln werden durch ihre ohmschen und induktiven Beläge R_D sowie L_D berücksichtigt. Die Übergänge von den Kohlen auf den Kommutator werden durch zwei Spannungsquellen U_B modelliert [29, 133]. Abschließend sind der ohmsche und induktive Anteil des Ankers mit R_A und L_A sowie die induzierte Spannung

U_i mit einer Spannungsquelle modelliert.

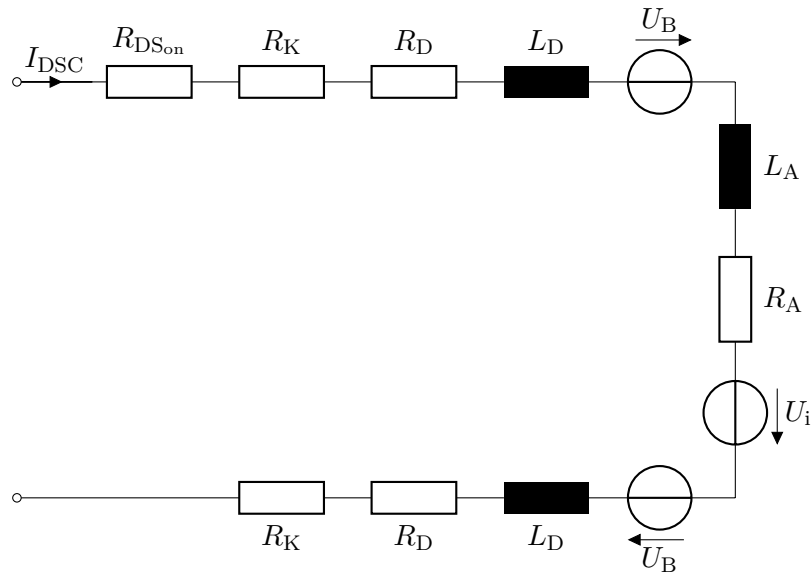


Abbildung 3.10 – Elektrisches Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine des DSC-Steuergeräts bei geschlossenem Leistungsschalter. Der MOSFET-Leistungshalbleiter wird durch den Widerstand $R_{DS_{on}}$ nachgebildet. Die Impedanzen der Entstördrosseln und des Ankers sind mit R_D und L_D , sowie R_A und L_A berücksichtigt. Die Bürstenspannungen U_B und die induzierte Spannung U_i sind durch Spannungsquellen modelliert.

Zur Reduktion der Rechenzeit wurden Widerstands- und Induktivitätsbeläge sowie Spannungsquellen bei der finalen Modellerstellung soweit wie möglich zusammengefasst. Für die Validierung des Modells wurden Aufzeichnungen von Strom und Spannung des DSC-Steuergeräts aus einem realen Fahrzeug herangezogen. Der Verlauf der gemessenen Klemmenspannung wurde als Eingangsgröße für die Spannung des Simulationsmodells verwendet. Der Einschaltzeitpunkt wurde aus dem gemessenen Stromverlauf ermittelt. In Abbildung 3.11 ist ein Vergleich des simulierten und des gemessenen Stromverlaufs dargestellt. Die Stromschwankungen, die im gemessenen Verlauf durch die periodisch variierende Belastung der Hydraulikpumpe zu sehen sind, sind aufgrund der vereinfachten Betrachtung der Maschinenbelastung im simulierten Stromverlauf nicht zu sehen. Jedoch ist erkennbar, dass der Spitzenwert des Anlaufstroms sehr gut nachgebildet werden kann. Die Abweichung des Stromspitzenwertes betragen in diesem Vergleich lediglich drei Prozent.

Bei der Auslegung des Bordnetzes ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Temperatur einen signifikanten Einfluss auf die Spitze des Anlaufstroms hat. Beispielhafte Simulationen haben gezeigt, dass ausgehend von einer Temperatur von 20°C der Maximalstrom bei 0°C um 7,4%, bei -20°C sogar um 16,1% steigt.

Um Rechenzeit einzusparen, ist eine Vereinfachung des Modells auf eine gesteuerte Stromsenke denkbar. Auf diese Weise ist zwar die Spannungsabhängigkeit nicht mehr korrekt berücksichtigt,

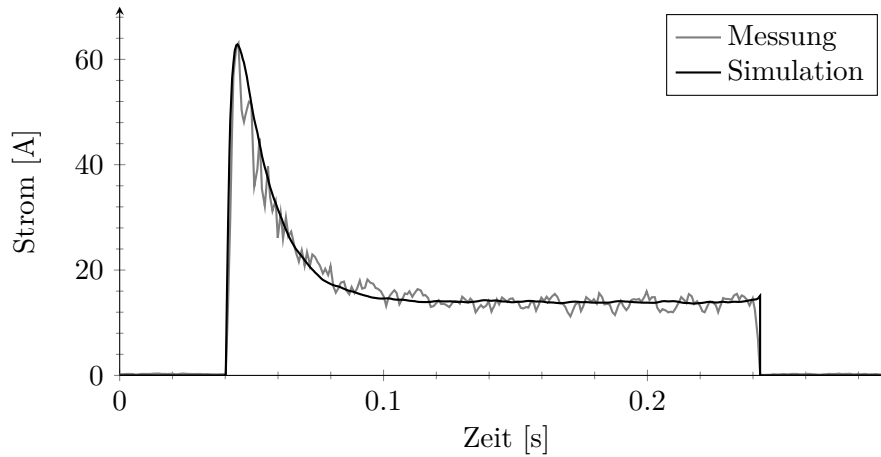


Abbildung 3.11 – Vergleich des gemessenen und des simulierten Anlaufstromverlaufs der in einem DSC-Steuergerät verbauten Gleichstrommaschine.

jedoch können aus einer Simulation oder Messung ermittelte Worst-Case-Profile hinterlegt werden, die vom Bordnetz in jeder Situation beherrschbar sein müssen. Diese Stromverläufe können beispielsweise bei einer vergleichsweise hohen Bordnetzspannung ermittelt werden. Das physikalische Modell würde bei einer geringeren Spannung, wie sie in einem Spitzenbelastungsfall auftritt, mit einem geringeren Spitzenstrom im Anlauf reagieren. Das Stromprofil hingegen prägt spannungsunabhängig den Stromverlauf mit einem höheren Spitzenstrom ein und verursacht somit einen größeren Spannungseinbruch.

Hinsichtlich der Spannungsstabilität kann auf diese Weise eine einfache Abschätzung nach unten vorgenommen werden, die man sich unter Umständen jedoch durch eine Überdimensionierung des Bordnetzes erkauft. Ein entsprechend reduziertes Modell ist in Abbildung 3.12 dargestellt.

Um einen besseren Einfluss auf den Verlauf des Anlaufstroms zu bekommen, könnte in zukünft-

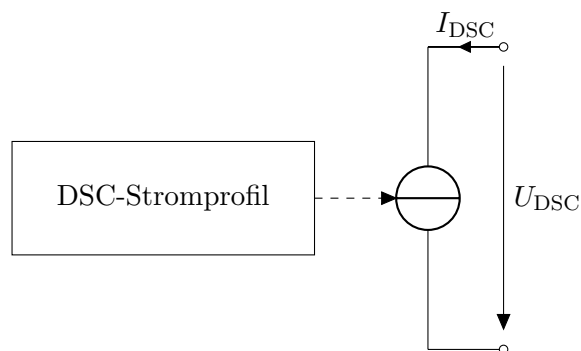


Abbildung 3.12 – Stark vereinfachtes Modell einer DSC-Einheit, das auf einer gesteuerten Stromsenke basiert. Ein hinterlegtes Profil dient zur Ansteuerung der Senke. Dabei wird die Spannungsabhängigkeit nicht korrekt berücksichtigt. Das Modell kann jedoch für Worst-Case-Betrachtungen herangezogen werden.

tigen DSC-Steuergerätegenerationen die Ansteuerung der Gleichstrommaschine mit Hilfe einer Pulsweitenmodulation erfolgen. Dadurch wäre eine definierte Begrenzung des Maximalstroms möglich, was den Bordnetzauslegungsprozess deutlich vereinfachen würde.

3.4 Kabelbaum und Karosserie

Der letzte Schritt beim Aufbau eines Bordnetzmodells stellt die Abbildung der gesamten Verbindungstechnik dar. Dazu zählen die Verbindungsleitungen, Sicherungen, Kontakte und die Karosseriemasse. Die Vorgehensweise zur Modellbildung dieser Aspekte richtet sich in der vorliegenden Arbeit nach den Erkenntnissen aus [44].

Für die Leitungsmodellierung wurde ein reines Widerstandsmodell gewählt. Diese Entscheidung liegt darin begründet, dass die Frequenzanteile in den Strömen der hier betrachteten Verbraucher zum größten Teil lediglich bis in den kleinen zweistelligen Hertzbereich reichen. Den Modellierungsrichtlinien aus [44] zufolge können deshalb die Leitungsinduktivitätsbeläge in guter Näherung vernachlässigt werden. Die Sicherungen, Kontaktierungen, Massebolzen und die Karosserie werden ebenfalls durch Widerstände modelliert.

3.5 Simulation des Energiebordnetzes

Die in dieser Arbeit betrachtete Basistopologie des Energiebordnetzes ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Der Generator, die Batterie und die Verbraucher sind über verschiedene Stromverteiler und Leitungen miteinander verbunden. In den Stromverteilern werden die verschiedenen Abgriffe meist erneut abgesichert und weiterverteilt. Drei der Verbraucher bilden die Fahrwerksregelsysteme ab. In diesem Fall sind das die Hinterachsschräglaufregelung (HSR), die Dynamische Stabilitätskontrolle (DSC) und die elektrische Lenkkraftunterstützung (EPS). Der vierte Verbraucher stellt die Grundlast (GL) des Bordnetzes dar. Die Karosserie (K) fungiert als Masserückleiter.

Mit dem vollständig aufgebauten Modell des Energiebordnetzes lassen sich die Spannungsverläufe an den Steuergeräteklammern für kritische Belastungsszenarien simulieren. Ein Beispiel für ein derartiges Szenario stellt ein Ausweichmanöver bei niedriger Geschwindigkeit dar. Die Load-Response-Funktion des Generators ist in diesem Beispiel aufgrund der niedrigen Drehzahl des Verbrennungsmotors aktiv. Damit ist die Dynamik des Generators künstlich limitiert. Das Manöver selbst besteht aus einer Vollbremsung mit gleichzeitiger Lenkbewegung. Dadurch überlagern sich die Aktivitäten von EPS, DSC und HSR. Das Resultat sind hohe Spitzenströme mit großer Dynamik. Dies hat entsprechende Spannungseinbrüche zur Folge. Die Spannungsverläufe

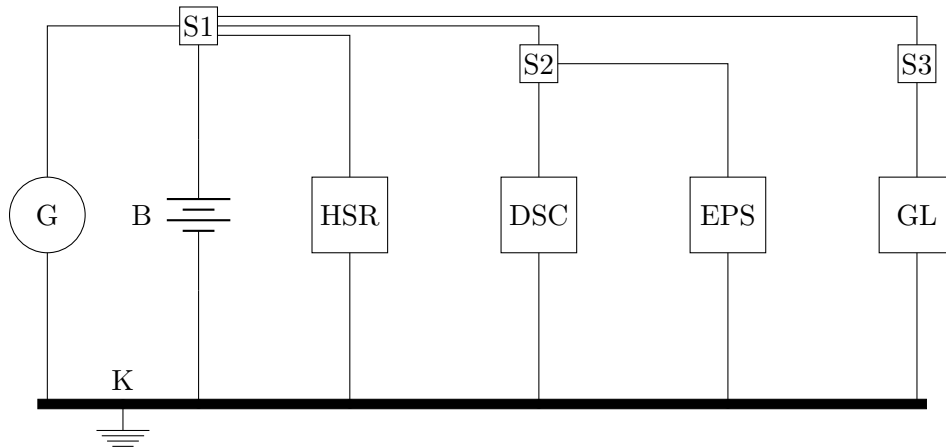


Abbildung 3.13 – Vereinfachte schematische Darstellung des Energiebordnetzes. Der Generator (G), die Batterie (B) und die Verbraucher sind über Stromverteiler (S1-S3) und Leitungen miteinander verbunden. Die Komponenten HSR, DSC, EPS sowie eine Grundlast (GL) stellen die Verbraucher dar. Die Karosserie (K) dient als gemeinsamer Mas-serückleiter.

an den Steuergeräteklennen von HSR, DSC und EPS während eines derartigen Ausweichmanövers sind in Abbildung 3.14 dargestellt. In diesem Beispiel bricht die Klemmenspannung am EPS auf einen kritischen Wert von unter 9 V ein.

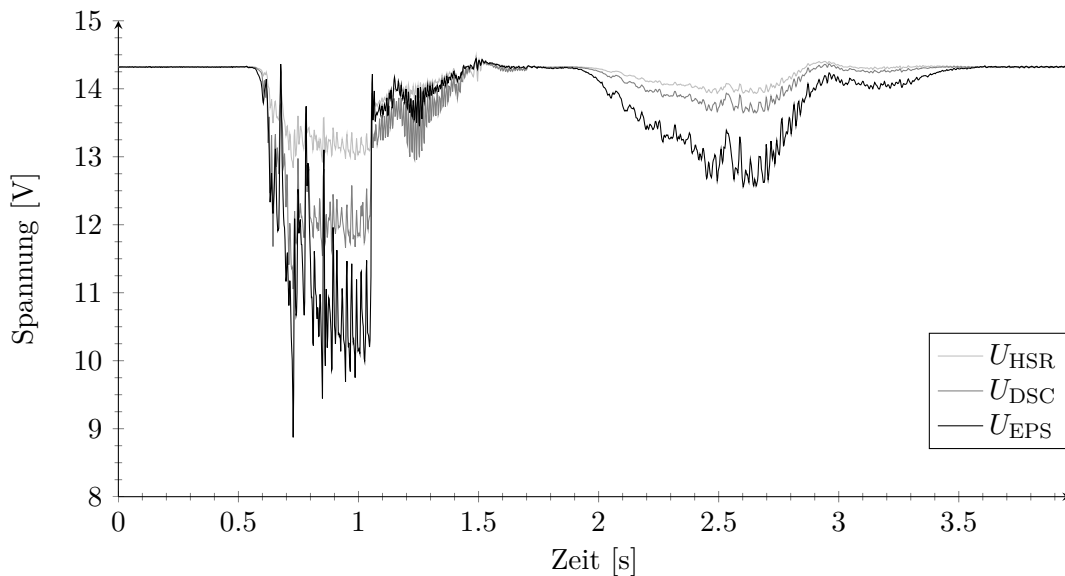


Abbildung 3.14 – Spannungsverläufe an den Steuergeräteklennen von HSR, DSC und EPS während eines Ausweichmanövers bei niedriger Geschwindigkeit. In diesem Beispiel bricht die Spannung am EPS auf unter 9 V ein.

4 Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung von Energiebordnetzen. Zunächst werden Randbedingungen definiert und eine Abgrenzung von möglichen Stabilisierungsmaßnahmen aus der Literatur vorgenommen. Danach werden die Einflüsse der Dimensionierung von Kabelquerschnitten und des Akkumulators erläutert. Im Anschluss wird das Konzept einer autonomen Verbraucherabschaltung in einer Prüfstands Umgebung umgesetzt, die die Abschaltung niederpriorer Verbraucher beim Einbruch der jeweiligen Klemmenspannung vorsieht. Es folgt die Diskussion des Potenzials durch eine zeitliche Entzerrung der Verbraucheraktivitäten. Abschließend wird die Integration von spannungsstabilisierenden Elementen in das Bordnetz erläutert. Die aktive Anbindung von Doppelschichtkondensatoren in das Bordnetz mit Hilfe eines DC/DC-Stellers wird hardwaretechnisch realisiert und in einem Prüfstand validiert.

4.1 Randbedingungen und Abgrenzung

Als Randbedingung für diese Arbeit wird definiert, dass die Verlegewege des Kabelbaumes, die Position der Stromverteiler sowie die Einbaupositionen und Anbindung der Bordnetzkomponenten unverändert bleiben. Außerdem werden keine Stabilisierungsmechanismen betrachtet, die auf einer Veränderung der Generator- oder Verbraucherdynamik aufbauen. Eine Veränderung der Generatordynamik wäre zwar prinzipiell möglich, jedoch muss diese im Bereich der Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors ohnehin schon künstlich begrenzt werden, um ein „Abwürgen“ im Falle einer plötzlichen elektrischen Belastung zu verhindern. Der Einfluss auf die Bordnetzstabilität durch eine Veränderung des Verbraucherverhaltens wurde in [44, 73] analysiert und wird an dieser Stelle nicht weiter behandelt.

In dieser Arbeit wird außerdem eine Abgrenzung von prädiktiven Systemen vorgenommen. Ein derartiger Ansatz ist in [76] zu finden. Dort wurde ein Leistungsmanagementsystem mit prädiktiven Mechanismen aufgebaut, das anhand von Sensorwerten kritische Fahrmanöver voraussagen kann. Als Reaktion für eine bevorstehende Belastung des Bordnetzes kann präventiv beispielsweise die Reduktion von Verbraucherströmen eingeleitet, oder die Generatorspannung erhöht werden. Das Problem derartiger Ansätze für die Bordnetzauslegung ist jedoch, dass prädiktive Systeme nicht in der Lage sind, alle kritischen Szenarien präzise zu erkennen. Dadurch muss sich die Auslegung trotzdem nach demjenigen Fall richten, bei dem die Vorhersage eines

kritischen Belastungsfalls nicht funktioniert. Dementsprechend ergibt sich kein tatsächlicher Vorteil für die Bordnetzauslegung, weshalb prädiktive Mechanismen im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden.

4.2 Dimensionierung der Kabelbaumleitungsquerschnitte

Mit größeren Kabelquerschnitten lassen sich die ohmschen Widerstände der Verbraucherzuleitungen reduzieren. Dadurch werden die Spannungsabfälle am Kabelbaum verringert und die Klemmenspannungen an den Verbrauchern dementsprechend verbessert [44, 73]. Problematisch ist jedoch, dass sich diese Maßnahme negativ auf das Gewicht und den Bauraum auswirken. Hinzu kommt, dass die Bündel des Kabelbaumes dicker werden und sich dadurch der maximal mögliche Biegeradius des Bündels verringert. Dies kann zu fertigungstechnischen Problemen führen, weshalb Kabelquerschnitte nicht beliebig erhöht werden können.

4.3 Dimensionierung des Blei-Säure-Akkumulators

Die elektrischen Eigenschaften des Blei-Säure-Akkumulators sind vor allem in denjenigen Situationen relevant, in denen die Verbraucherdynamik die Dynamik des Generators übersteigt. Dies trifft auf alle in dieser Arbeit betrachteten Spitzenbelastungsszenarien zu. In so einem Fall muss die Batterie das Stromdefizit im Bordnetz ausgleichen und wird dadurch kurzzeitig mit hohen Entladeströmen belastet. Wie stark die Batterieklemmenspannung selbst einbricht, hängt maßgeblich vom Innenwiderstand der Batterie ab. Dieser sinkt – wenn auch nur verhältnismäßig geringfügig – bei Batterien gleicher Technologie mit steigender Kapazität. Bei größeren Batterien bricht die Klemmenspannung dadurch etwas weniger ein. Der Großteil des Spannungseinbruchs an den Verbraucherklammern in Bordnetzen ist allerdings auf Zuleitungen, Sicherungen und Kontaktierungen zurückzuführen [77]. Aus diesem Grund ist der Einfluss des Bleiakкумуляtors auf Verbraucherspannungseinbrüche sehr gering [44]. In [140] konnte beim Einsatz von zwei baugleichen Batterien mit unterschiedlicher Kapazität überhaupt kein Einfluss nachgewiesen werden.

Problematisch ist außerdem, dass in Oberklassefahrzeugen teilweise schon die größten am Markt verfügbaren Batterien eingebaut werden. Eine weitere Vergrößerung ist damit z.T. aus Bauraumgründen gar nicht mehr möglich. Darüber hinaus wiegen Batterien mit einer Kapazität von 105 Ah ca. 30 kg. Jede weitere Vergrößerung um 10 Ah würde mit rund 3 kg zu Buche schlagen.

Aufgrund der oben diskutierten Aspekte wird der Einfluss unterschiedlicher Batteriekapazitäten auf die Spannungsstabilität in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

4.4 Autonome Verbraucherabschaltung

In diesem Unterkapitel wird das Konzept einer autonomen Verbraucherabschaltung als spannungsstabilisierende Maßnahme für Bordnetze vorgestellt. Die Grundidee dazu basiert auf einer schnellen Abschaltung niederpriorer Verbraucher in extremen Belastungssituationen. Damit sollen Leistungsreserven im Bordnetz freigegeben werden, um die Spannungsstabilität zu verbessern. Zur messtechnischen Validierung des Konzepts wird eine universelle Hardwareplattform entwickelt, auf der dieser Mechanismus implementiert wird. Es folgt die Integration der Hardware in einen Bordnetzprüfstand. Abschließend wird die Stabilitätsverbesserung messtechnisch nachgewiesen.

4.4.1 Konzept

Das Konzept der autonomen Verbraucherabschaltung sieht vor, dass sich ein Verbraucher niedriger Priorität kurzzeitig selbst abschaltet, sobald die Spannung an seinen eigenen Klemmen unter eine gewisse Schwelle fällt. Dazu sind eine Messeinrichtung und eine Logikeinheit notwendig, die das Spannungssignal einlesen und verarbeiten. Außerdem muss hardwaretechnisch die Möglichkeit bestehen, den Lastkreis schnell zu öffnen. Heutige Steuergeräte benutzen für die Ansteuerung von Heizelementen ohnehin MOSFET-Leistungshalbleiter, die eine sehr schnelle Schaltgeschwindigkeit ermöglichen. Die Entscheidung für eine Abschaltung trifft jedes mit diesem Mechanismus versehene Steuergerät selbst, also vollständig autonom. Das Prinzip ähnelt damit dem Lastabwurf, der in der Energieversorgungstechnik für die Stabilisierung von Stromnetzen in kritischen Fällen angewendet wird.

Grundsätzlich lässt sich ein derartiger Mechanismus nur für Verbraucher anwenden, die nicht sicherheitskritisch sind. Eine weitere Einschränkung ist, dass Fahrzeuginsassen die Abschaltung nicht bemerken dürfen, um Komforteinbußen zu verhindern. Damit sind vor allem Heizsysteme wie beispielsweise Sitzheizungen, Scheibenheizungen oder elektrische Zuheizer für einen autonomen Abschaltmechanismus prädestiniert. Diese Systeme haben sehr große thermische Zeitkonstanten, weshalb eine kurzzeitige Abschaltung für den Fahrzeuginsassen unbemerkt bleibt.

Nach einem eingetretenen Abschaltvorgang wird ein Verbraucher erst dann wieder eingeschaltet, wenn sich seine Klemmenspannung erholt hat. Insgesamt folgt das Funktionsprinzip demnach einer Hysterese. Jedoch wird zusätzlich eine Mindestabschaltzeit vorgesehen, damit keine unerwünschten Oszillationen entstehen können. Um das Bordnetz beim Zuschalten der Heizsysteme nicht übermäßig zu belasten, kann die Stromaufnahme mit Hilfe einer Pulsweitenmodulation langsam hochgefahren werden. Idealerweise erfolgt die Steuerung der Pulsweitenmodulation derart, dass dem Anstieg des Verbrauchersummenstroms vom Generator gefolgt werden kann.

Auf diese Weise wird verhindert, dass das Bordnetz durch die Verbraucherzuschaltung unnötig destabilisiert wird.

Für die Konfiguration der Abschaltwellenwerte sind unterschiedliche Ansätze möglich. Zum einen können die Schwellwerte beispielsweise statisch auf relativ niedrige Spannungswerte im Bereich zwischen 10 V und 11 V eingestellt werden. Dadurch greift der Abschaltmechanismus nur in Spitzenbelastungsszenarien. Um das Potenzial des Abschaltmechanismus bestmöglich in verschiedenen Situationen zu nutzen, können Abschaltwellen der Verbraucher auch variabel gestaltet werden. Dadurch wird eine Anpassung auf Veränderungen der Verbraucherklammenspannung möglich, die durch unterschiedliche Bordnetzauslastungszustände oder andere Betriebszustände des Energiemanagements verursacht werden.

4.4.2 Universelle ECU-Hardwareplattform

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine universelle ECU-Hardwareplattform entwickelt, auf der die Implementierung der autonomen Verbraucherabschaltung erfolgte. Die Hardwareplattform wurde parallel im Rahmen anderer Forschungsaktivitäten auch für die Untersuchung von Energie- und Leistungsmanagementmechanismen auf Betriebssystemebene verwendet [95].

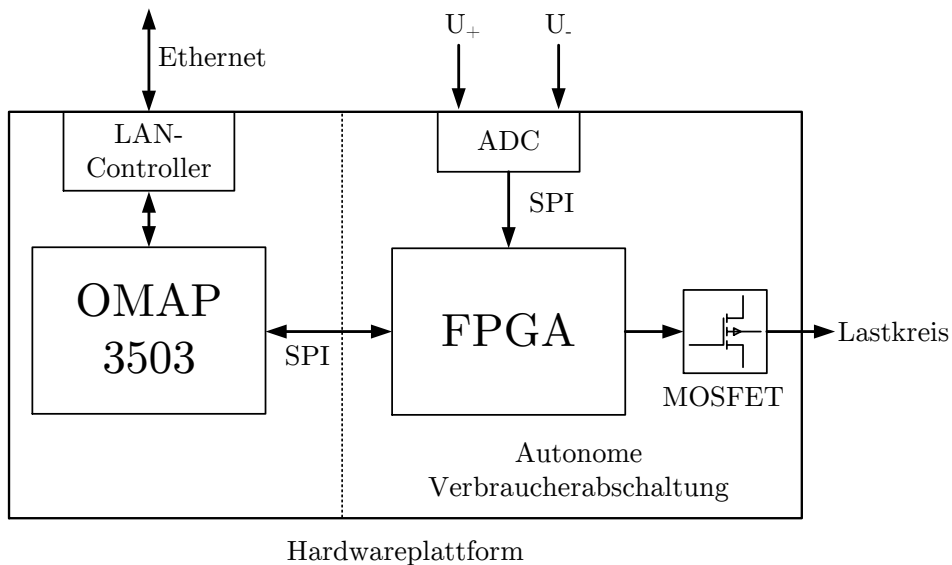


Abbildung 4.1 – Schematischer Aufbau der universellen ECU-Hardwareplattform. Der autonome Abschaltmechanismus ist auf einem FPGA implementiert. Die Spannungsmessung erfolgt über einen A/D-Wandler, der die Messwerte über einen SPI-Bus an den FPGA überträgt. Über einen OMAP-Prozessor und einen weiteren SPI-Bus lassen sich die Parameter der autonomen Verbraucherabschaltung konfigurieren. Die Kommunikation nach außen erfolgt über Ethernet.

4 Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung

Darauf wird an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen. Im Folgenden werden lediglich die für Verbraucherabschaltung relevanten Aspekte erläutert.

Das Herzstück der Hardwareplattform bilden ein Xilinx Spartan 3AN Field Programmable Gate Array (FPGA) [149] und ein Gumstix Overo Prozessorboard [52], auf dem ein OMAP 3505 Prozessor der Firma Texas Instruments arbeitet [136]. Der schematische Aufbau der Hardware ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die fertig bestückte Platine ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Der Abschaltmechanismus ist auf dem FPGA implementiert. Die Klemmenspannung wird kontinuierlich von einem Analog/Digital-Wandler (ADC) gemessen und über eine SPI-Schnittstelle (engl.: serial peripheral interface) an den FPGA übertragen. Um in der Lage zu sein, die Parametrierung des autonomen Abschaltmechanismus zu verändern, können vom OMAP-Prozessor über eine weitere SPI-Schnittstelle neue Konfigurationsdaten an den FPGA übertragen werden. Auf diese Weise können der Abschaltwellwert, der Einschaltwellwert, die Rampendauer für das Hochfahren des Verbrauchers sowie eine Abschaltverzögerung eingestellt werden. Die Abschaltverzögerung ermöglicht eine bewusste Verzögerung der Verbraucherabschaltung. Dies kann verwendet werden, um die Totzeit von Steuergeräten mit langsamen Mikrocontrollern zu simulieren. Die Verzögerung, die durch den hier verwendeten A/D-Wandler und den FPGA

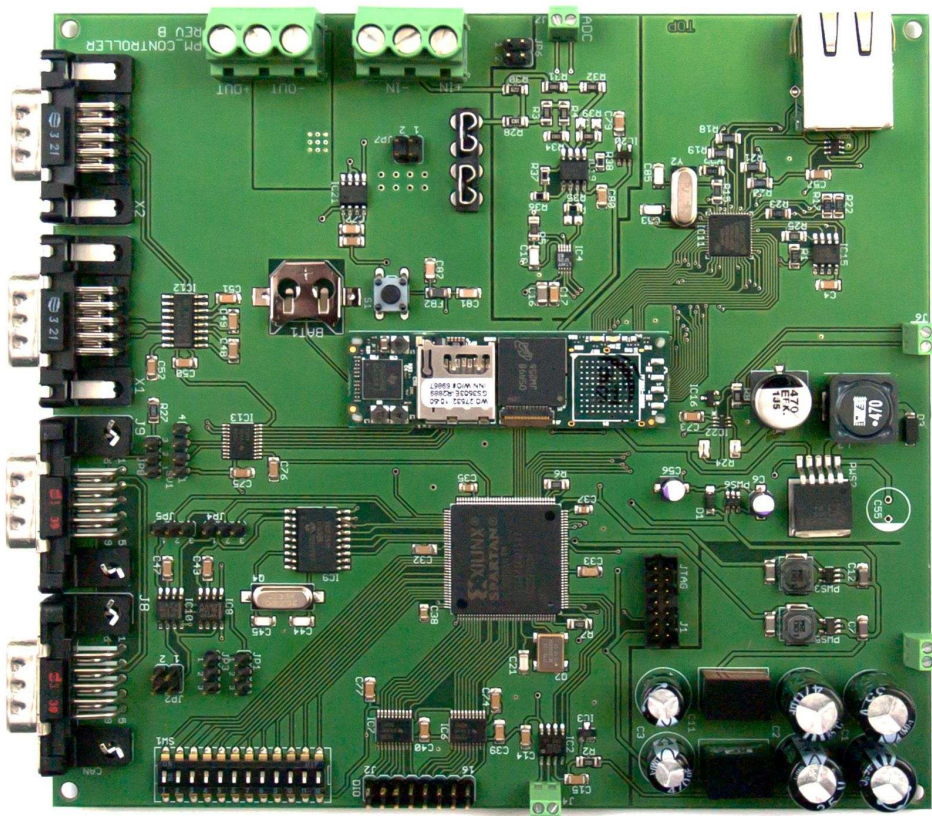


Abbildung 4.2 – Universelle ECU-Hardwareplattform, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde.

entsteht, befindet sich lediglich im Bereich von wenigen Mikrosekunden. Der OMAP-Prozessor ist außerdem in der Lage, über eine Ethernet-Schnittstelle mit der Außenwelt zu kommunizieren. So können neue Konfigurationsparameter von einem zentralen Prüfstandsrechner an die ECUs übermittelt werden.

4.4.3 Prüfstandsintegration

Am Fachgebiet Energiewandlungstechnik der Technischen Universität München existiert ein Bordnetzprüfstand, der auf der Rohkarosserie eines BMW 7er und einem Originalkabelbaum basiert [77]. Über einen LabVIEW-Prüfstandsrechner [100] können an diversen Stellen im Fahrzeug Spannungen und Ströme gemessen werden. Die Nachbildung von Fahrwerksregelsystemen erfolgt im Prüfstand durch hochdynamische, elektronische Lasten, die über analoge Schnittstellen mit den jeweiligen Verbraucherprofilen angesteuert werden. Weniger dynamische Lasten können für die Nachbildung anderer Komponenten im Fahrzeug benutzt werden. Als Energieerzeuger kann der Kfz-Generator vom benachbarten Prüfbett mit dem Bordnetz verbunden werden.

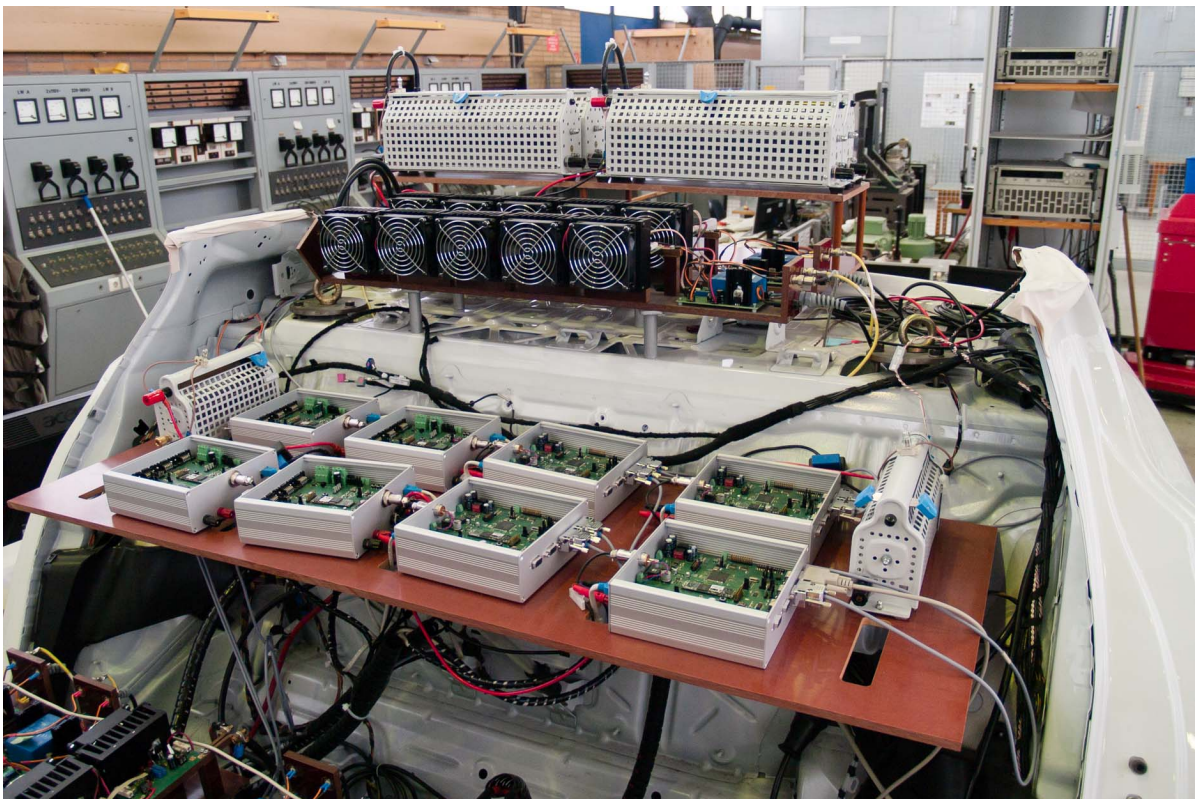


Abbildung 4.3 – Blick auf den hinteren Teil des Bordnetzprüfstands. Die Laborwiderstände links und rechts auf der Plattform im Vordergrund bilden die Sitzheizungen im Fond ab. Auf der Hutablage der Karosserie sind auf einem Podest die Widerstände zur Nachbildung der Heckscheibenheizung zu sehen.

4 Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung

Komponente	Anzahl	Lastwiderstand	Stromaufnahme bei 14 V
Heckscheibenheizung	2	0,76 Ω	36,8 A
PTC Fondklima	2	0,7 Ω	40,5 A
Sitzheizung	4	2,3 Ω	24,3 A
Gebläselüfter	1	0,46 Ω	30,2 A

Tabelle 4.1 – Liste der im Bordnetzprüfstand integrierten Lastwiderstände zur Nachbildung von Klima- und Komfortkomponenten.

Damit bietet dieser Bordnetzprüfstand die Möglichkeit, die Stabilisierungswirkung der autonomen Verbraucherabschaltung unter realitätsnahen Bedingungen zu testen.

Zur Nachbildung der Heizsysteme wurden Laborwiderstände in den Prüfstand integriert, die von den selbstentwickelten ECUs angesteuert werden. In Abbildung 4.3 ist beispielhaft der hintere Teil des Prüfstands zu sehen. Eine Übersicht der nachgebildeten Komponenten, der Widerstandswerte sowie die entsprechende Stromaufnahme bei einer Bordnetzspannung von 14 V ist in Tabelle 4.1 zu finden.

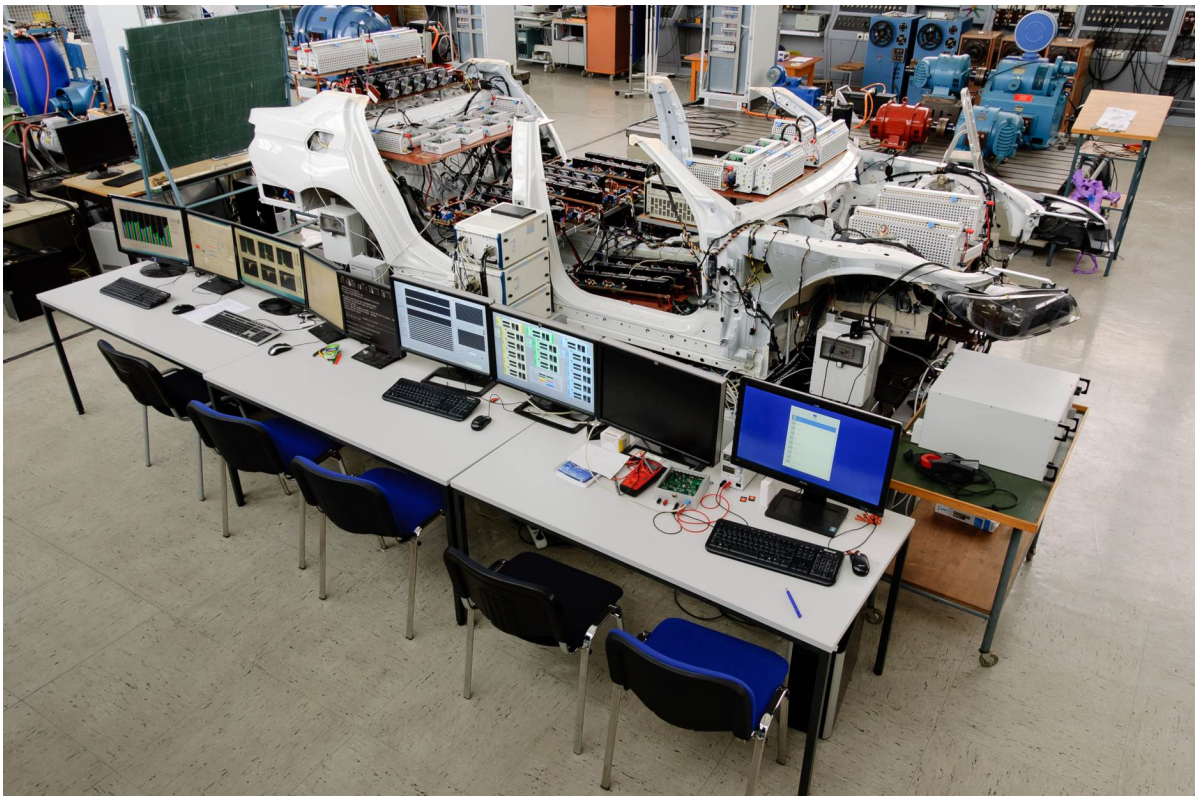


Abbildung 4.4 – Bordnetzprüfstand am Fachgebiet Energiewandlungstechnik der Technischen Universität München. Die Grundlage des Prüfstands bilden die Rohkarosserie eines BMW 7er (Baureihe F02) und ein Originalkabelbaum.

Zur komfortablen Parametrierung der autonomen Verbraucherabschaltung wurde eine Kommunikationsschnittstelle und eine Bedienoberfläche in LabVIEW entwickelt. Dadurch lassen sich von einem zentralen Prüfstands-PC alle Parameter des Abschaltmechanismus ändern und es können komplette Prüfabläufe automatisiert durchgeführt werden.

4.4.4 Messtechnische Quantifizierung der Spannungsstabilisierung

Zur Untersuchung des Einflusses der autonomen Verbraucherabschaltung auf die Spannungsstabilität wurden drei unterschiedliche Lastszenarien am Prüfstand vermessen. Das erste Szenario entspricht einem Ausweichmanöver, bei dem alle Fahrwerksregelsysteme gleichzeitig aktiv

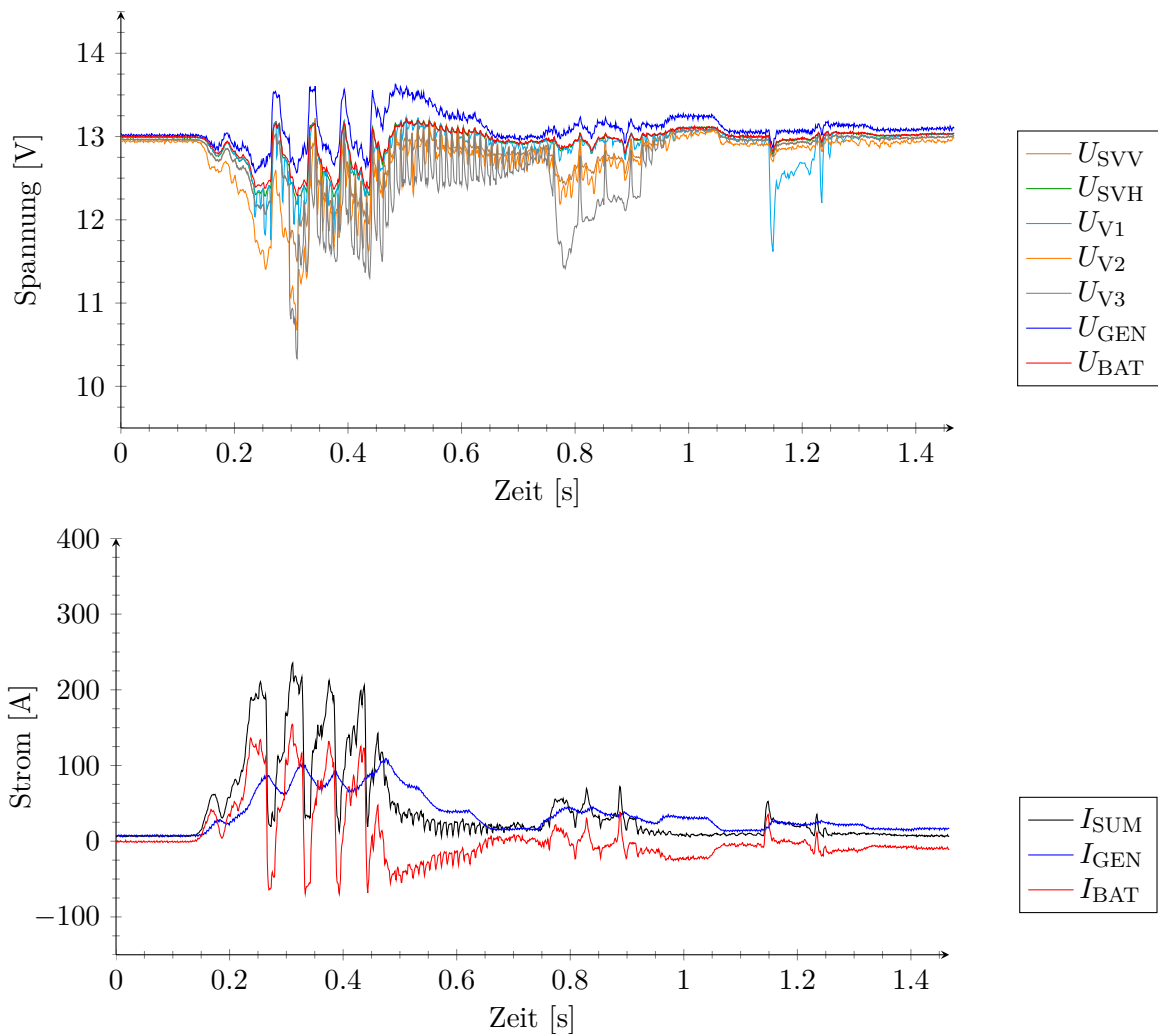


Abbildung 4.5 – Spannungs- und Stromverläufe während eines Ausweichmanövers ohne Zusatzbelastung durch Heizsysteme. Messpunkte: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN), Batterie (BAT) und Verbrauchersummenstrom (SUM).

werden. Im zweiten Szenario werden alle in Abschnitt 4.4.3 beschriebenen Laborwiderstände von den ECUs an das Bordnetz geschaltet. Dadurch wird die Maximalbelastung durch die nachgebildeten Heizsysteme simuliert. Ein derartiger Auslastungszustand des Bordnetzes kann beispielsweise in Aufheizphasen bei tiefen Außentemperaturen auftreten. Zu dieser Belastung wird zusätzlich das Ausweichmanöver überlagert. Das dritte Lastszenario entspricht dem zweiten, jedoch ist die autonome Verbraucherabschaltung in den ECUs aktiviert. In den Abbildungen 4.5, 4.6 und 4.7 sind die Spannungs- und Stromverläufe an verschiedenen Messpunkten im Bordnetz für die drei beschriebenen Lastszenarien dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Verbraucherströme zu einem Summenlaststrom I_{SUM} zusammengefasst.

Für die Messungen wurde der Kfz-Generator des im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Prüf-

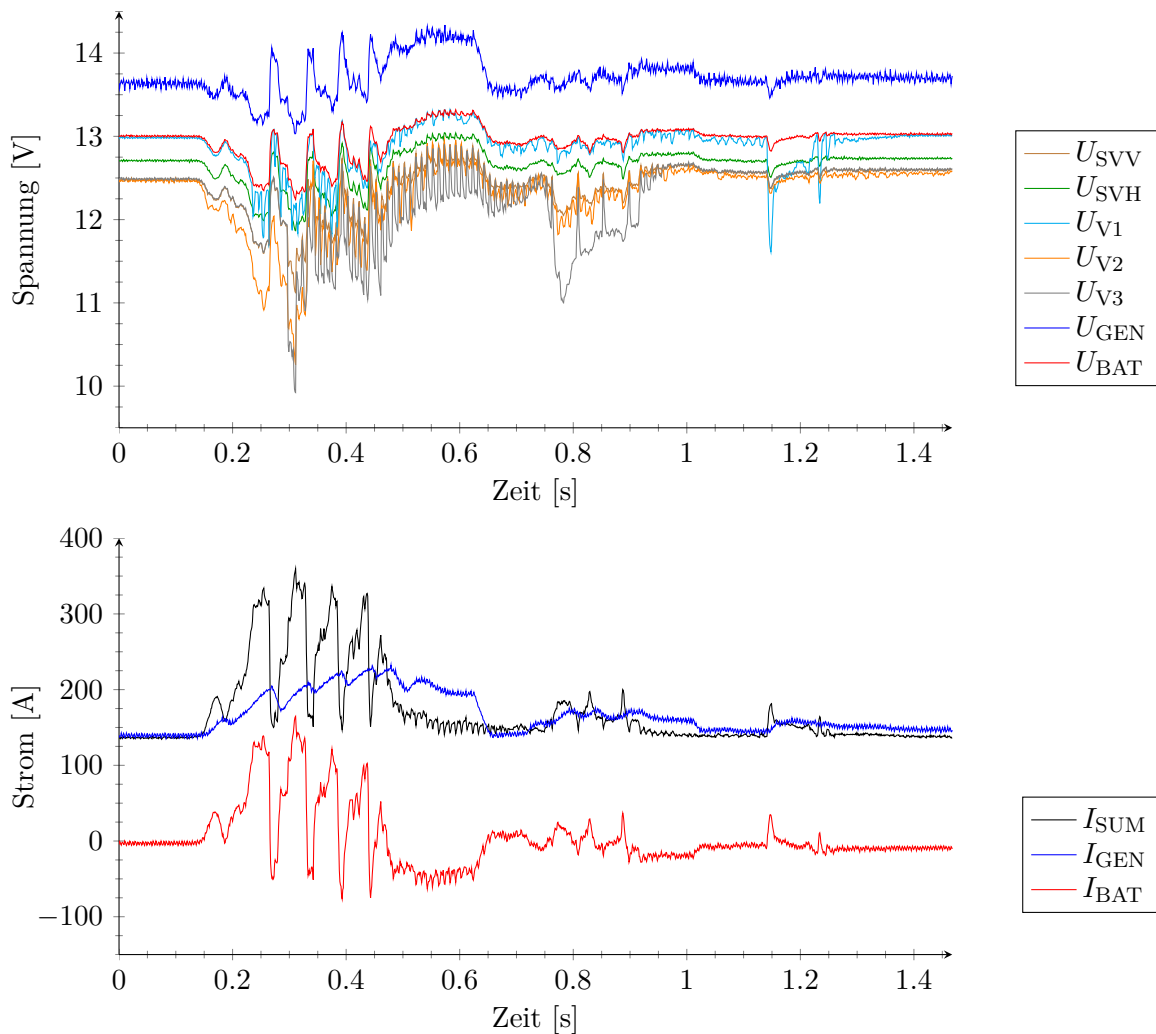


Abbildung 4.6 – Spannungs- und Stromverläufe während eines Ausweichmanövers mit Zusatzbelastung durch Heizsysteme. Messpunkte: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), Dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN), Batterie (BAT) und Verbrauchersummenstrom (SUM).

stands an das Bordnetz angeschlossen. Zunächst wurde die Load-Response-Funktion nicht benutzt, um Messungen mit der maximal möglichen Dynamik des Generators durchzuführen. Die Abschaltwellen wurden in den dargestellten Beispielen jeweils 0,8 V unter diejenige Spannung konfiguriert, die stationär bei Vollaustung durch die Heizsysteme an den jeweiligen Steuergeräteklammern anliegen. Die Abschaltverzögerung wurde in allen ECUs auf 0,5 ms parametrisiert. Dieser Wert entspricht einer realistischen Totzeit, die in Low-Cost-Steuergeräten mit langsamen Mikroprozessoren und A/D-Wandlern auftreten würde. Für möglichst realistische Vergleichsmessungen wurde am Prüfstand außerdem eine Batteriespannungsregelung implementiert, die den Spannungsabfall an der langen Generatorleitung im Bordnetz des BMW 7er F02 kompensiert. Bei einer höheren stationären Belastung des Bordnetzes wird die Genera-

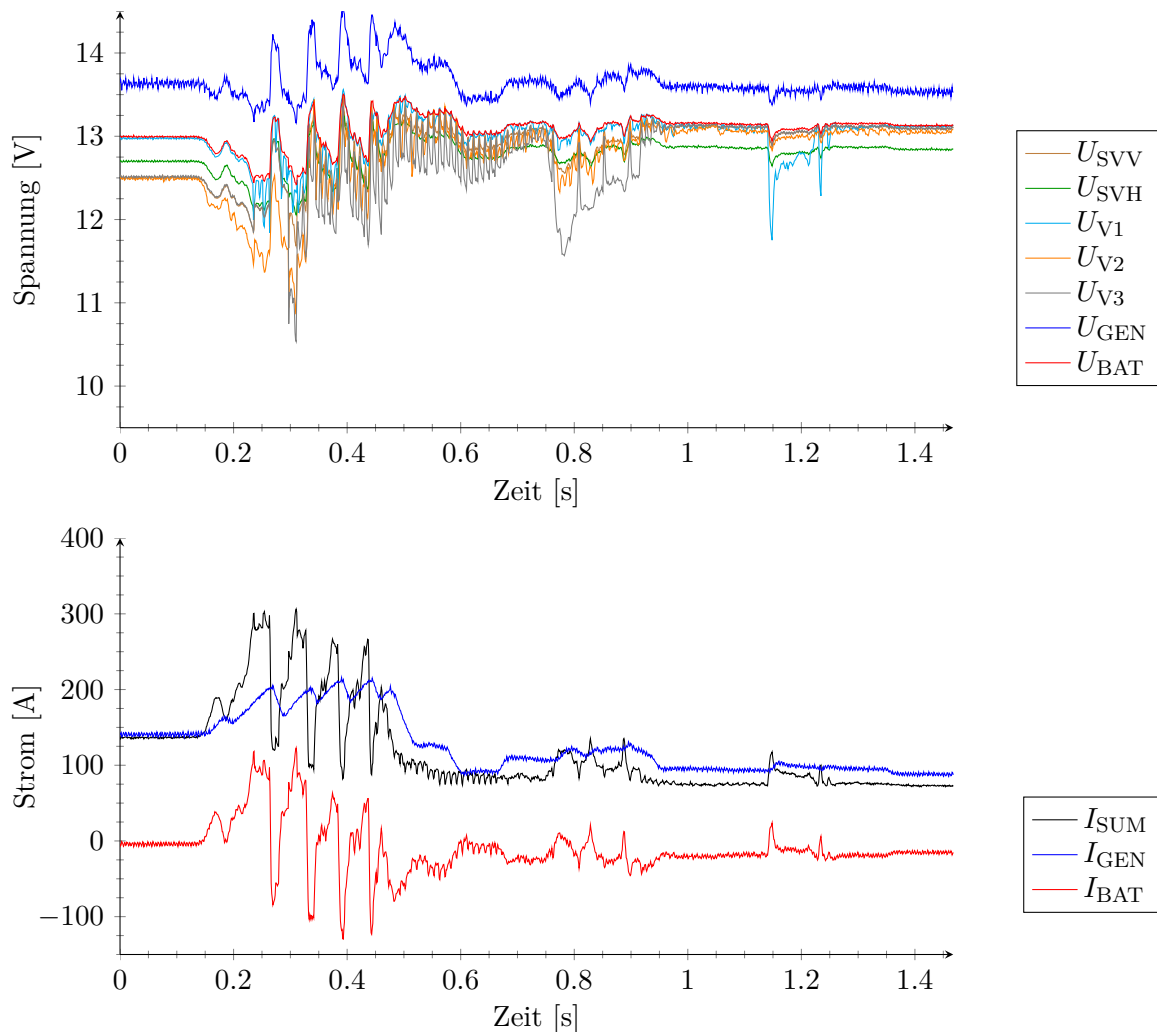


Abbildung 4.7 – Spannungs- und Stromverläufe während eines Ausweichmanövers mit Zusatzbelastung durch Heizsysteme und autonomer Verbraucherabschaltung. Messpunkte: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), Dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN), Batterie (BAT) und Verbrauchersummenstrom (SUM).

torspannung vom Regler somit angehoben, um die vorgegebene Sollspannung an der Batterie halten zu können. In den Abbildungen 4.5-4.6 betrug die Batteriesollspannung 13 V.

In Szenario 1 (Abbildung 4.5) wurde der tiefste Spannungseinbruch mit 10,33 V an Verbraucher V3 gemessen. In Szenario 2 fiel die Spannung an diesem Messpunkt auf 9,92 V. In Szenario 3 betrug der tiefste gemessene Spannungseinbruch lediglich 10,53 V. Damit brach die Spannung um 610 mV weniger ein als in Szenario 2 und liegt damit außerdem 200 mV oberhalb des Wertes aus Szenario 1. In Abbildung 4.8 sind alle Minimalspannungen an den jeweiligen Messpunkten aufgetragen, die in den Szenarien gemessen wurden.

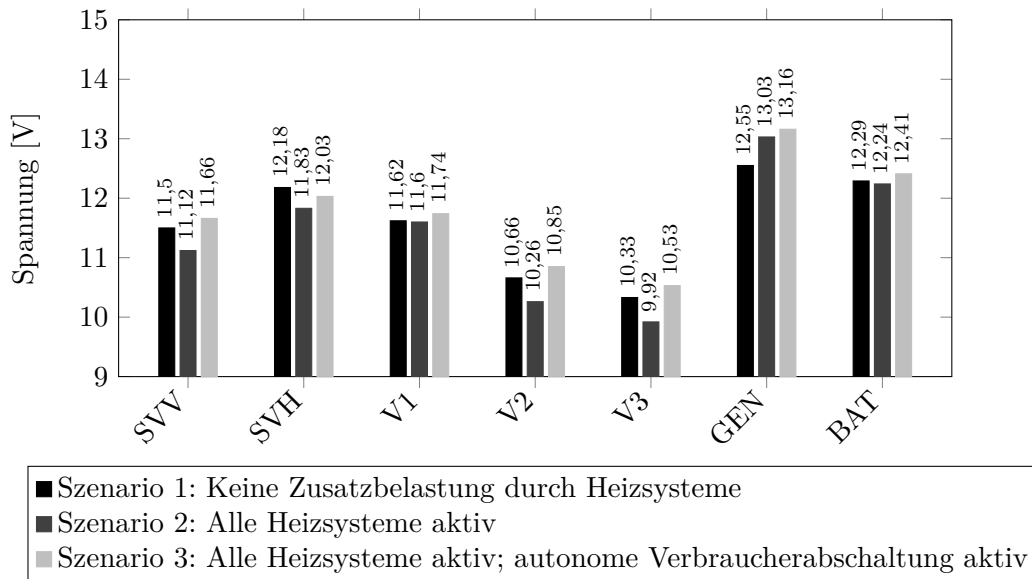


Abbildung 4.8 – Minimalwerte der gemessenen Klemmenspannungen an den folgenden Messpunkten: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), Dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN) und Batterie (BAT).

Die Messergebnisse bestätigen den Stabilisierungseffekt der autonomen Verbraucherabschaltung. Die Spannungseinbrüche fallen in Szenario 3 sogar geringer aus als in Szenario 1, bei dem keine Zusatzbelastung durch die Heizsysteme vorherrscht. Dieser Sachverhalt ist auf die Eigenschaften des Generators zurückzuführen. Der Generator verhält sich bedingt durch die große Zeitkonstante des Erregerkreises wie eine träge Stromquelle. In Szenario 3 liefert der Generator unmittelbar vor dem Ausweichmanöver ca. 140 A. Durch die Spannungseinbrüche, die während des Ausweichmanövers im Bordnetz auftreten, werden einige Heizsysteme durch die Verbraucherabschaltung abgeworfen. Der durch den Lastabwurf freigegebene Anteil des Generatorstroms fließt damit unmittelbar in die dynamischen Verbraucher. In Tabelle 4.2 sind der Batteriestrom, Generatorstrom und Verbrauchersummenstrom zum Zeitpunkt des maximalen Spannungseinbruchs aufgeführt. Zu erkennen ist, dass durch die autonome Verbraucherabschaltung (Szenario 3) der Maximalwert des Verbrauchersummenstroms um ca. 50 A geringer ausfällt als in Szenario 2. Außerdem wird die Batterie deutlich entlastet. Der maximal

auftretende Entladestrom in Szenario 3 liegt ca. 21 % unter dem Wert aus Szenario 1 und gut 25 % unter dem Wert aus Szenario 2.

	I_{BAT}	I_{GEN}	I_{SUM}
Szenario 1	155,1 A	81,9 A	237,0 A
Szenario 2	164,7 A	194,8 A	358,9 A
Szenario 3	122,8 A	186,3 A	309,1 A

Tabelle 4.2 – Batteriestrom, Generatorstrom und Verbrauchersummenstrom zum Zeitpunkt des maximalen Spannungseinbruchs.

Messungen mit limitierter Generatorndynamik

Die folgende Messreihe wurde mit künstlich limitierter Generatorndynamik durchgeführt. Die restliche Konfiguration wurde nicht verändert.

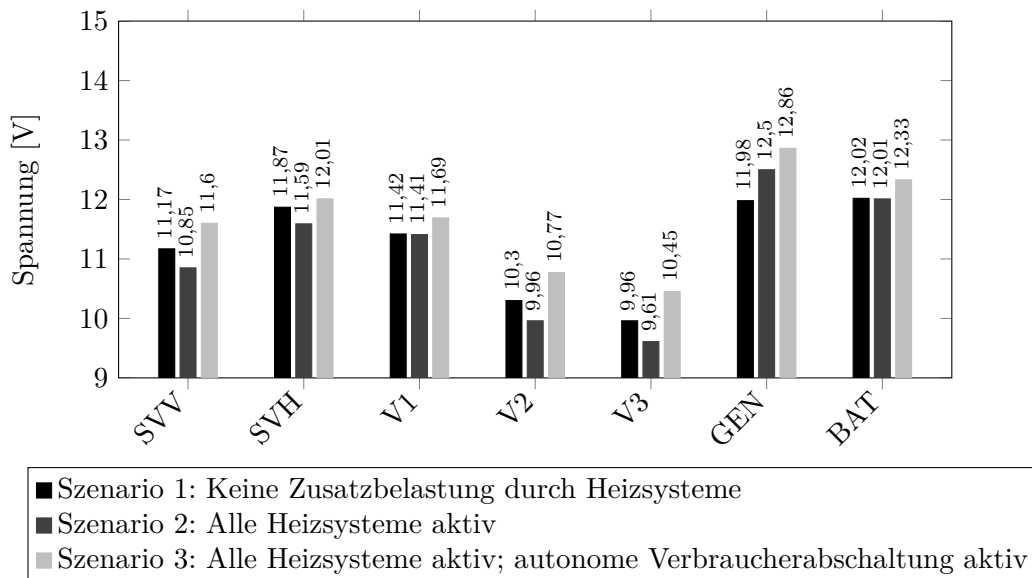


Abbildung 4.9 – Minimalwerte der gemessenen Klemmenspannungen an den folgenden Messpunkten: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), Dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN) und Batterie (BAT). Die Generatorndynamik wurde für diese Messreihe künstlich durch den Einsatz der Load-Response-Funktion limitiert.

Im Vergleich zu den Spannungsminima in Abbildung 4.8 ist zu erkennen, dass die Klemmenspannungen mit aktivierter Load-Response-Funktion insgesamt stärker einbrechen. Dies war zu erwarten, denn durch die limitierte Generatorndynamik wird nun die Batterie deutlich stärker belastet. In Tabelle 4.3 sind für diese Messreihe der Batteriestrom, Generatorstrom und Verbrauchersummenstrom zum Zeitpunkt des maximalen Spannungseinbruchs aufgeführt. Die Spitzenwerte des Batterieentladestroms sind für die Lastszenarien 1 und 2 um ca. 42 % bzw.

33 % größer als in der Messreihe mit voller Generatorodynamik. In Szenario 3 vergrößert sich der Wert lediglich um 13 %.

Der Maximalwert des Verbrauchersummenstroms verringert sich von 363,5 A in Szenario 2 auf 281,5 A in Szenario 3. Die Differenz ist mit 82 A signifikant größer als in der Messreihe mit inaktiver Load-Response-Funktion. Dieser Sachverhalt hängt damit zusammen, dass aufgrund der tieferen Spannungseinbrüche insgesamt mehr Heizsysteme durch die autonome Verbraucherabschaltung abgeworfen wurden. Der Stabilisierungseffekt ist damit geringfügig größer als in der Messreihe ohne Load-Response-Funktion.

	I_{BAT}	I_{GEN}	I_{SUM}
Szenario 1	220,1 A	24,0 A	244,0 A
Szenario 2	219,2 A	144,3 A	363,5 A
Szenario 3	138,8 A	142,7 A	281,5 A

Tabelle 4.3 – Batteriestrom, Generatorstrom und Verbrauchersummenstrom zum Zeitpunkt des maximalen Spannungseinbruchs. Die Generatorodynamik wurde für diese Messreihe künstlich durch den Einsatz der Load-Response-Funktion limitiert.

Variation der Abschaltverzögerung

In einer weiteren Messreihe wurde der Einfluss einer Variation der Abschaltverzögerung untersucht. Als Ergänzung zu den bisher verwendeten 0,5 ms als Abschaltverzögerung wurden Messreihen für die Verzögerungszeiten 0,05 ms sowie 5 ms durchgeführt. Dadurch soll zum einen in Erfahrung gebracht werden, ob sich der Einsatz leistungsfähigerer Hardware lohnt, mit der schnellere Abschaltzeiten realisiert werden können. Zum anderen ist interessant, ob sich auch

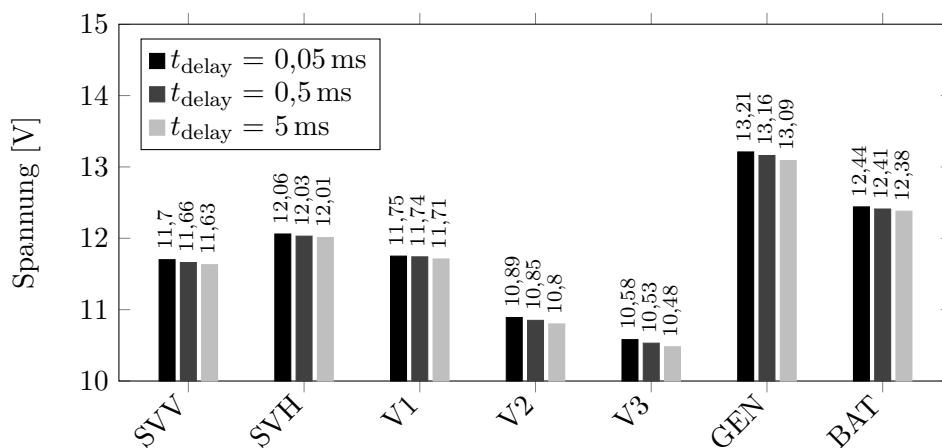


Abbildung 4.10 – Minimalwerte der gemessenen Klemmenspannungen für verschiedene Abschaltverzögerungen. Messpunkte: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), Dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN) und Batterie (BAT).

bei langsameren Systemen noch ein Stabilisierungseffekt durch die Verbraucherabschaltung ergibt. Die Verzögerungszeit von 5 ms dient dabei als Anhaltspunkt für das Verhalten von Relais, die z.T. noch für Heckscheibenheizungen eingesetzt werden. In Abbildung 4.10 sind die Spannungsminima für das Lastszenario 3 in Abhängigkeit der Abschaltverzögerungen dargestellt. Der Generator arbeitete in den Messreihen mit seiner vollen Dynamik. Die Batteriesollspannung betrug wie in den vorhergegangenen Messreihen 13 V. Die Messergebnisse zeigen am Beispiel des Verbrauchers V3, dass eine Verringerung der Abschaltverzögerung von 0,5 ms auf 0,05 ms in einer um 40 mV höheren Spannung resultiert. Eine Verlängerung der Abschaltverzögerung von 0,5 ms auf 5 ms resultiert in einer Verringerung der Spannung um 50 mV. Verglichen mit den Spannungsminima aus Tabelle 4.8 kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass selbst bei einer Abschaltungsverzögerung von 5 ms noch ein stabilisierender Effekt durch die Verbraucherabschaltung entsteht. Eine Verringerung der Abschaltverzögerung hat zwar eine Erhöhung Verbraucherklammenspannung zur Folge, jedoch muss abgewogen werden, ob dies in Anbetracht des ohnehin ausreichenden Stabilisierungseffekts überhaupt notwendig ist.

4.4.5 Vorteile für den Bordnetzauslegungsprozess

Durch den Einsatz der autonomen Verbraucherabschaltung für Heizsysteme entsteht eine deutliche Verbesserung der Spannungsstabilität in kritischen Lastszenarien. Die Tatsache, dass die in Abschnitt 4.4.4 gemessenen Spannungseinbrüche in Lastszenario 3 (Heizsysteme aktiv; autonome Verbraucherabschaltung aktiv) sogar geringer ausfallen als in Lastszenario 1 (keine Zusatzbelastung durch Heizsysteme), bietet für den gesamten Bordnetzauslegungsprozess entscheidende Vorteile. Demnach lässt sich die Anzahl der zu betrachtenden Lastfälle für die Auslegung deutlich reduzieren. Darüber hinaus wird die Handhabung unterschiedlicher Ausstattungsvarianten hinsichtlich der Spannungsstabilität vereinfacht. Gleichzeitig ist die autonome Verbraucherabschaltung als reaktives System in Bezug auf den Stabilisierungseffekt wirksamer und deutlich leichter zu implementieren als prädiktive Mechanismen, die Verbraucher vor einer kritischen Belastung abschalten [76].

4.5 Zeitliche Entzerrung der Verbraucheraktivitäten

Besonders kritische Spannungseinbrüche treten in Bordnetzen immer dann auf, wenn mehrere Verbraucher gleichzeitig aktiv werden und sich deren Stromaufnahme überlagert. Eine zeitliche Entzerrung von Lastspitzen ist daher wünschenswert. In [8, 73] wurde bereits messtechnisch nachgewiesen, dass die zeitliche Entzerrung von Verbraucheraktivitäten eine Verringerung von Lastspitzen – und damit eine Verbesserung der Spannungsstabilität ermöglicht.

Vor allem in Bezug auf Fahrwerksregelsysteme, wie beispielsweise die elektrische Lenkkraftunterstützung und die Hinterachsschräglaufregelung, sind Entzerrungsmaßnahmen jedoch äußerst kritisch zu sehen. Da diese Systeme sicherheitsrelevant sind und sich in bestimmten Fahrsituationen eine Überlagerung nicht vermeiden lässt, muss ein Bordnetz grundsätzlich für derartige Lastfälle ausgelegt sein.

Ein mögliches Potenzial ist dennoch bei denjenigen Verbrauchern verborgen, deren zeitliche Entzerrung keinen unmittelbaren Nachteil für die Sicherheit oder den Komfort der Insassen hervorruft. Für die technische Realisierung von Entzerrungsmaßnahmen gibt es unterschiedliche Ansätze. Zum einen ist denkbar, Verbraucher mit schnellen, deterministischen Bussystemen zu vernetzen und Verbraucheraktivitäten zentral zu koordinieren. Eine andere Möglichkeit besteht darin, über Spannungsschwankungen an den Steuergeräteklemmen Informationen über die Aktivität anderer Verbraucher zu gewinnen [73]. Des Weiteren wird in [10] ein Modell für ein Powermanagement-System vorgeschlagen, das im Scheduling auf Betriebssystemebene sogenannte Leistungspläne vorsieht. Mit diesen Leistungsplänen ist es möglich, die Verbraucheraktivitäten zeitlich präzise zu steuern. Auf die gesamte Bussystem- und Steuergerätearchitektur des Fahrzeuges extrapoliert, kann damit bereits in der Auslegungsphase dafür gesorgt werden, dass sich bestimmte Verbraucheraktivitäten nicht überlagern können.

Die verschiedenen oben genannten Ansätze sind mit gänzlich unterschiedlichem Entwicklungs- und Kostenaufwand verbunden. Gleichzeitig unterscheiden sie sich in Bezug auf Effektivität und Zuverlässigkeit. Aufgrund der stetig wachsenden Anzahl von elektrischen Verbrauchern ist es in jedem Fall essenziell, zukünftige Bordnetze mit Leistungsmanagement-Mechanismen auszustatten, die ungünstige Überlagerungen von Komfort- und Kundenfunktionen verhindern.

4.6 Passive Anbindung von Doppelschichtkondensatoren

Eine Möglichkeit zur Reduktion von Spannungseinbrüchen bietet die Integration von Doppelschichtkondensatoren (DSKs) in das Bordnetz. Durch Parallelschalten eines DSK-Moduls an Hochleistungsverbraucher können Verbraucherlastspitzen gepuffert werden. Das Bordnetz wird mit Hilfe dieser lokalen Bereitstellung von Energiereserven entlastet. Spannungseinbrüche an den Verbraucherklammern können dadurch wirksam verringert werden [44, 116]. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird diese Art der Bordnetzstabilisierung als Passive Spannungsstabilisierungsmaßnahme (PSSM) bezeichnet. Aufgrund der passiven Anbindung der DSKs wird lediglich ein geringer Anteil des Energieinhalts der Kondensatoren für die Stabilisierung verwendet.

In Abbildung 4.11 ist ein möglicher Modellansatz zur Modellierung des Klemmenverhaltens von Doppelschichtkondensatoren abgebildet [83, 150]. Durch parallele RC-Glieder mit unterschiedlichen Zeitkonstanten kann eine Charakterisierung vom Sekunden- bis in den Minutenbereich vorgenommen werden. Im „immediate branch“ (Index i) wird das Kurzzeitverhalten abgebildet. Zudem wird das nichtlineare Verhalten des Doppelschichtkondensators mit einer spannungsabhängigen Kapazität $C_{i1} = f(U)$ in diesem Zweig mitberücksichtigt. Im „delayed branch“ (Index d) und „long-term branch“ (Index l) wird das Verhalten des Kondensators im Minutenbereich nachgebildet, das durch die Ladungsspeicherung im Elektrolyten durch Polarisation entsteht. Zur Berücksichtigung der Selbstentladung dient ein Widerstand R_{leak} . Mit diesem Modell kann das Verhalten eines DSK-Moduls zwar gut nachgebildet werden, jedoch ist die Parametrierung sehr aufwendig. Da die Hersteller von Doppelschichtkondensatormodulen nur wenige Informationen in den Datenblättern vermerken, müssen reale Module zunächst vermessen

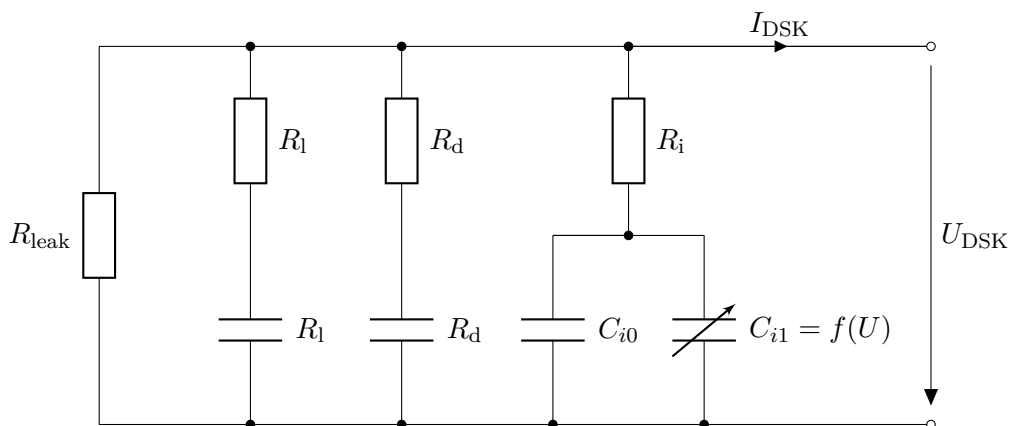


Abbildung 4.11 – Ersatzschaltbild eines Doppelschichtkondensators [83, 150]. Die Selbstentladung wird durch den Widerstand R_{leak} nachgebildet. Die RC-Glieder des „long-term branch“ (Index l) und „delayed branch“ (Index d) modellieren das Verhalten im Minutenbereich. Der „immediate branch“ verfügt zudem über eine spannungsabhängige Kapazität zur Nachbildung von Nichtlinearitäten.

werden. Auf Grundlage der Messergebnisse kann dann eine Parametrierung erfolgen.

Da für die Untersuchung der Spannungsstabilität ohnehin nur sehr kurze Zeitbereiche betrachtet werden, können Selbstentladung und Effekte im Minutenbereich für die Modellerstellung in dieser Arbeit vernachlässigt werden. Um nicht jeden Kondensatortyp vermessen zu müssen, wurde außerdem die Spannungsabhängigkeit der Kapazität vernachlässigt. Dadurch reduziert sich das Modell auf eine Kapazität und einen Innenwiderstand, wie in Abbildung 4.12 dargestellt. Diese beiden Parameter sind in den Datenblättern der Hersteller angegeben. Somit ist eine einfache Nachbildung unterschiedlichster Kondensatortypen anhand der Herstellerangaben möglich.

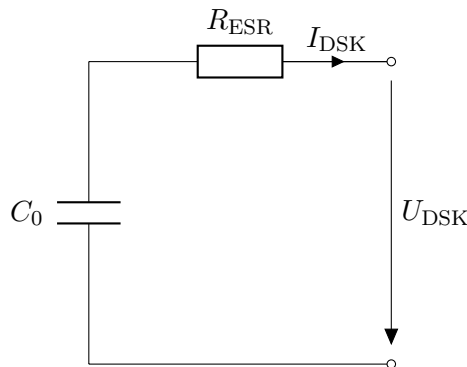


Abbildung 4.12 – Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Doppelschichtkondensators auf Basis eines Widerstands und einer Kapazität.

4.7 Aktive Anbindung von Doppelschichtkondensatoren

Um den Energieinhalt eines DSK-Moduls für die Spannungsstabilisierung besser zu nutzen, können Speicher und Bordnetz durch einen DC/DC-Steller entkoppelt werden. Der Energiefluss zwischen Bordnetz und DSK-Modul kann damit gezielt beeinflusst werden. Die Idee zur dezentralen Stabilisierung einzelner Bordnetzverbraucher wurde in [57] erstmals skizziert. In [73] wurde ein Hardwarekonzept entwickelt, das eine DSK-Modulspannung unterhalb der Bordnetzspannung vorsieht. Die Spannungsstabilisierung erfolgt dort im Hochsetzbetrieb und benutzt energiespeicherseitig den Spannungsbereich von 8 V und 10,5 V. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die grundsätzliche Art der dezentralen Spannungsstabilisierung durch einen DC/DC-Steller und einen Energiespeicher als Aktive Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme (ASSM) bezeichnet.

In diesem Abschnitt wird zunächst das Konzept einer Stabilisierungseinheit vorgestellt, das mit einer DSK-Modulspannung oberhalb der Bordnetzspannung arbeitet. Basierend auf diesem Konzept erfolgt die hardwaretechnische Realisierung eines DC/DC-Stellers und eines Doppelschichtkondensatormoduls. Die Funktionsweise des Systems wird im Bordnetzprüfstand

nachgewiesen. Abschließend wird auf die Nachbildung der ASSM in der Bordnetzsimulation eingegangen.

4.7.1 Konzept

Für den nutzbaren Spannungsbereich eines angeschlossenen Energiespeichermoduls im Stabilisierungsbetrieb wird in der vorliegenden Arbeit der Bereich von 15 V bis maximal 50 V gewählt. Damit liegt die gewählte Maximalspannung in einem Bereich, in dem auf besondere Vorkehrungen hinsichtlich des Berührungsschutzes verzichtet werden kann. Der Nennstrom des DC/DC-Stellers wird auf 80 A bei einer Spannung von 12 V festgelegt, was einer Leistung von 960 W entspricht. Diese Leistungsdaten wurden auf der Grundlage von Voruntersuchungen gewählt und richten sich danach, eine Spannungsstabilisierung des größten dynamischen Hochleistungsverbrauchers zu ermöglichen. In dieser Arbeit handelt es sich dabei um die elektrische Lenkkraftunterstützung. Die Auslegung zielt dabei jedoch nicht darauf ab, den kompletten Strombedarf der EPS zu decken, sondern lediglich besonders kritische Spannungseinbrüche zu verhindern. Dementsprechend sieht das Konzept vor, einen gewissen Spannungseinbruch zu erlauben und erst beim Unterschreiten definierter Schwellwerte die Stabilisierung zu aktivieren. Die Wahl der Topologie fällt auf eine H-Brückenschaltung, mit der ein Vierquadrantenbetrieb möglich ist. Der schematische Aufbau der Schaltung ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

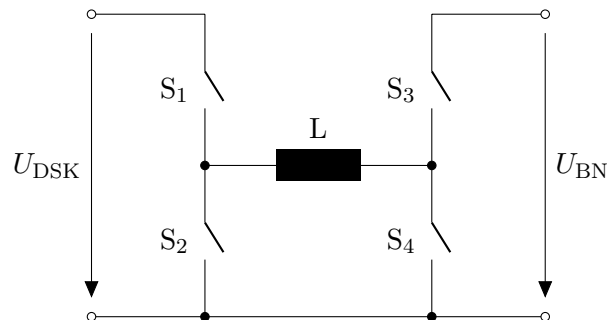


Abbildung 4.13 – Schematische Darstellung der Schaltungstopologie. Die gewählte H-Brückenschaltung ermöglicht einen Betrieb als Vierquadrantensteller.

Aufladevorgang

Für den Aufladevorgang kann die H-Brücke im Falle eines leeren DSK-Moduls zunächst als synchroner Tiefsetzsteller (engl.: synchronous buck converter) betrieben werden. Die Topologie für den Tiefsetzstellerbetrieb ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Für das Verhältnis von Bordnetzspannung U_{BN} und der DSK-Modulspannung U_{DSK} in Abhängigkeit des Tastverhältnisses (engl.: $D = \text{duty cycle}$) gilt [37]:

$$\frac{U_{DSK}}{U_{BN}} = D \quad (4.1)$$

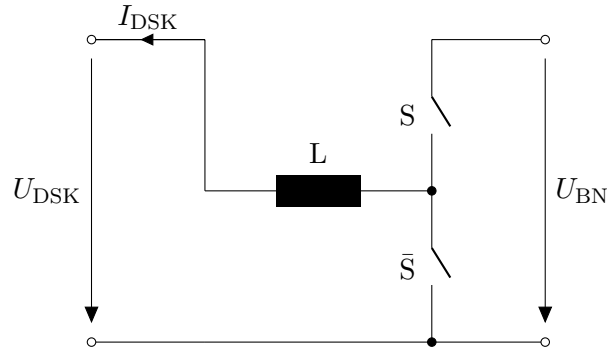


Abbildung 4.14 – Aufladung des DSK-Moduls im Tiefsetzstellerbetrieb für $U_{\text{DSK}} < U_{\text{BN}}$.

Um extreme Tastverhältnisse im Bereich $U_{\text{DSK}} \approx U_{\text{BN}}$ zu vermeiden, wird bei Annäherung der DSK-Modulspannung an die Bordnetzspannung zunächst auf einen synchronen Tief-Hochsetzstellerbetrieb (engl.: synchronous non-inverting buck-boost converter) umgeschaltet. In dieser Betriebsart takten alle vier Schalter (siehe Abbildung 4.15). Für das Verhältnis von Bordnetzspannung U_{BN} und DSK-Modulspannung U_{DSK} gilt [37]:

$$\frac{U_{\text{DSK}}}{U_{\text{BN}}} = \frac{D}{1 - D} \quad (4.2)$$

Damit beträgt das Tastverhältnis für identische Bordnetz- und DSK-Modulspannung 50 %, was problemlos eingestellt werden kann.

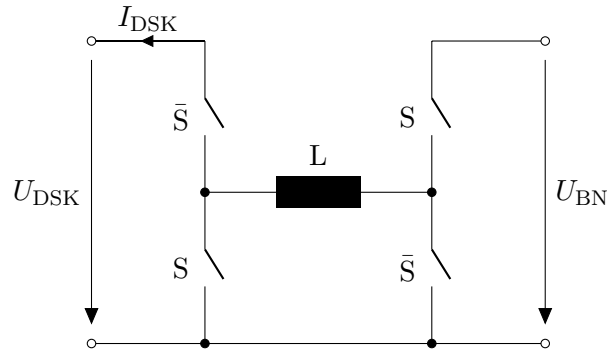


Abbildung 4.15 – Im Bereich $U_{\text{DSK}} \approx U_{\text{BN}}$ wird die Schaltung als synchroner Tief-Hochsetzsteller betrieben.

Für den weiteren Aufladevorgang bis hin zur gewünschten Ladeschlussspannung wird die Topologie im synchronen Hochsetzstellermodus (engl.: synchronous boost converter) betrieben (siehe Abbildung 4.16). Für diese Betriebsart gilt [37]:

$$\frac{U_{\text{DSK}}}{U_{\text{BN}}} = \frac{1}{1 - D} \quad (4.3)$$

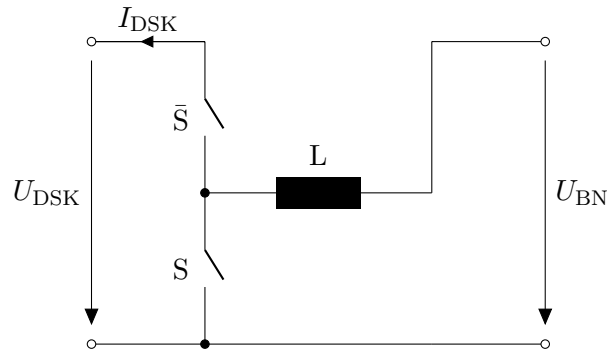


Abbildung 4.16 – Für $U_{\text{DSK}} > U_{\text{BN}}$ wird die Schaltung im synchronen Hochsetzstellermodus betrieben, um das DSK-Modul bis zur Nennspannung aufladen zu können.

Um beim Umschalten der Topologien unerwünschte Oszillationen zu verhindern, werden an den jeweiligen Spannungsgrenzen Hysteresen vorgesehen. In Abbildung 4.17 ist der schematische Ablauf eines Aufladevorgangs mit den entsprechenden Übergängen zwischen den unterschiedlichen Topologien dargestellt.

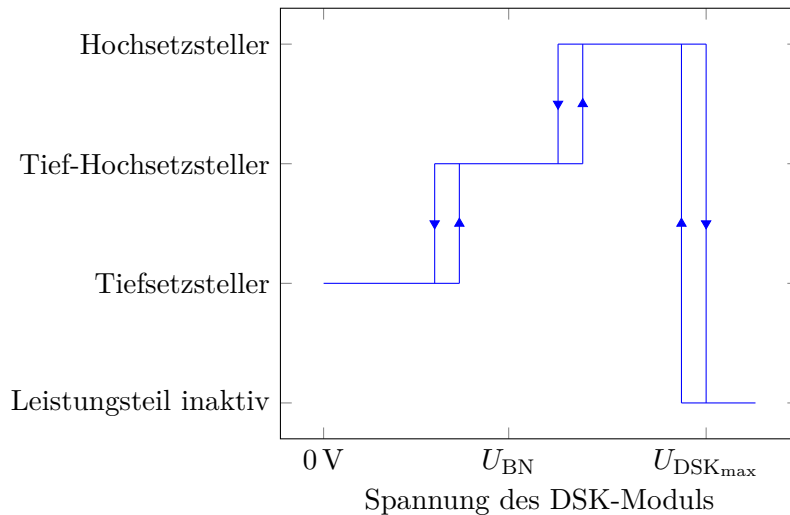


Abbildung 4.17 – Schematische Darstellung eines Aufladevorgangs. An den entsprechenden Spannungsgrenzen sind Hysteresen vorgesehen, um beim Umschalten der Topologien unerwünschte Oszillationen zu verhindern.

Stützvorgang

Sobald das DSK-Modul geladen ist ($U_{\text{DSK}} > U_{\text{BN}}$), kann der Stabilisierungsmodus aktiviert werden. Dabei fungiert die Topologie als synchroner Tiefsetzsteller, um Energie aus dem DSK-Modul in das Bordnetz einzuspeisen (siehe Abbildung 4.18). Für den Stützbetrieb gilt [37]:

$$\frac{U_{\text{BN}}}{U_{\text{DSK}}} = D \quad (4.4)$$

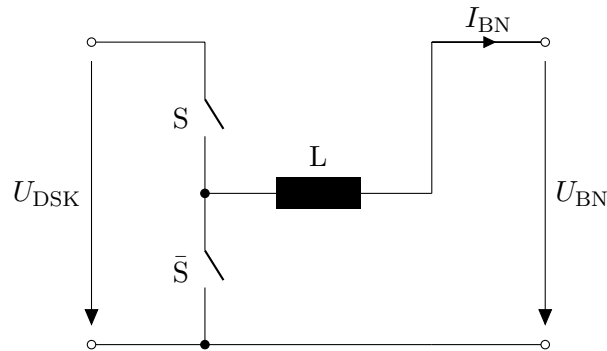


Abbildung 4.18 – Für die Stabilisierung der Bordnetzspannung arbeitet die Topologie als synchroner Tiefsetzsteller ($U_{\text{DSK}} > U_{\text{BN}}$).

Um der Selbstentladung der Doppelschichtkondensatoren entgegenzuwirken, wird in dieser Betriebsart beim Unterschreiten eines definierten Spannungswertes das DSK-Modul nachgeladen.

4.7.2 DC/DC-Steller

Für die hardwaretechnische Realisierung des DC/DC-Stellers wurde ein dsPIC30F Mikroprozessor des Herstellers Microchip ausgewählt [137]. Der Aufbau der H-Brücke wurde mit vier Leistungshalbleitern des Typs IRLS4030 der Firma International Rectifier aufgebaut [62], die mit einer Taktfrequenz von 50 kHz betrieben werden. Mit einer dauerhaften Stromtragfähigkeit von 180 A und einer maximalen Sperrspannung von 100 V bieten diese Transistoren ausreichend Auslegungsreserven. Die Ansteuerung der Leistungshalbleiter wird von Gate-Treibern der Firma International Rectifier übernommen [61]. Den Gate-Treibern stehen isolierte Gleichspannungswandler zur Seite, die ein dauerhaftes Durchschalten der High Side MOSFETs ermöglichen. Dadurch kann der Steller problemlos in den unterschiedlichen Topologien aus Abschnitt 4.7.1 betrieben werden. Als Induktivität kommen zwei in Serie geschaltete Drosseln der Firma Coilcraft mit je 3,3 μH zum Einsatz [28]. Die Messung des Drosselstroms erfolgt mit einem Bauteil der Firma Allegro, dessen Messprinzip auf dem Hall-Effekt basiert [53]. Das ausgewählte Bauteil, der Allegro ACS758LCB-100B [3], ermöglicht die Messung von ± 100 A bei einer Bandbreite von 120 kHz. Die Ausgangspins des Bauteils sind galvanisch isoliert, was eine direkte Anbindung an den Mikroprozessor ohne weitere Maßnahmen ermöglicht.

Da die gesamte Schaltung thermisch nicht für den Dauerbetrieb, sondern lediglich für den kurzzeitigen Stützbetrieb ausgelegt ist, wurde ein Sensor zur Erfassung der Temperatur des

4 Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung

Leistungsteils vorgesehen. Die Auswertung des analogen Sensors erfolgt über einen A/D-Wandlereingang des Mikroprozessors. Auf diese Weise können die Leistungshalbleiter vor unerwünscht hohen Temperaturen geschützt werden.

Um eine einfache Bedienung des DC/DC-Stellers für Messungen am Bordnetzprüfstand zu ermöglichen, wurde eine USB-Schnittstelle vorgesehen, die eine Kommunikation zwischen Mikroprozessor und Prüfstands-PC ermöglicht. Dazu wurde ein Baustein des Typs FT232R integriert [42], der eine Umsetzung von USB [138] auf das vom dsPIC30F unterstützte UART-Protokoll ermöglicht [13]. Um unerwünschte Ausgleichsströme zwischen Prüfstands-PC und DC/DC-Steller über die Masseverbindung des USB-Interface zu verhindern, ist die UART-Verbindung mit dem Baustein ADuM3201 der Firma Analog Devices galvanisch getrennt [6]. Die Stromversorgung des USB-UART-Wandlers wird über die USB-Schnittstelle realisiert. Damit wird eine vollständige galvanische Trennung von angeschlossenem PC und DC/DC-Steller gewährleistet.

Für den Austausch von Informationen zwischen Prüfstands-PC und Mikroprozessor wurde ein Kommunikationsprotokoll implementiert, über das Steuerbefehle und Konfigurationsparameter übertragen werden können. Zudem werden über das Protokoll zyklische Statusmeldungen vom Mikroprozessor an den Host gesendet. Prüfstandsseitig wurde eine grafische Oberfläche in LabVIEW aufgebaut, die den Zugriff auf alle wichtigen Funktionen und Parameter des Stellers erlaubt und Statusmeldungen anzeigt.

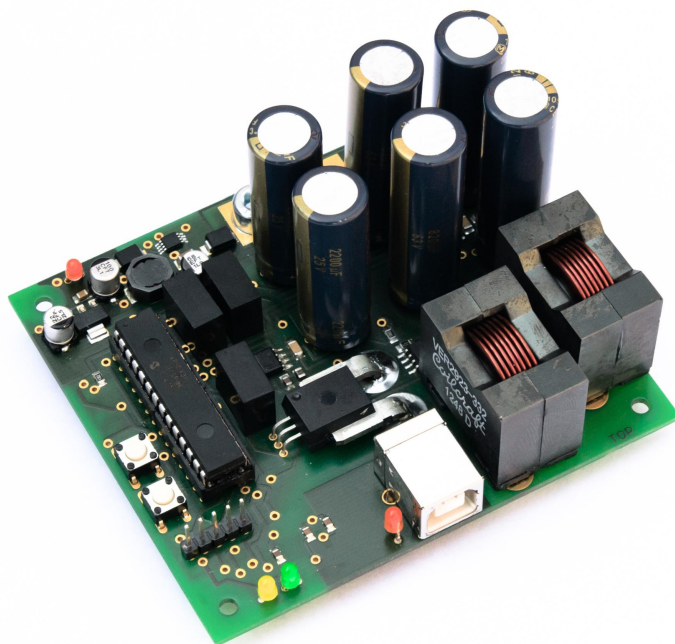


Abbildung 4.19 – Fertig aufgebauter DC/DC-Steller für die Spannungsstabilisierung des Kfz-Energiebordnetzes.

4.7.3 Doppelschichtkondensator-Modul

Zum Betrieb des Gesamtsystems wurde ein Energiespeicher mit Doppelschichtkondensatoren aufgebaut. Das entwickelte DSK-Modul besteht aus 12 in Serie geschalteten 50 F-Kondensatoren des Types BCAP0050 der Firma Maxwell [91]. Die Nennspannung des Moduls beträgt damit 32,4 V und die Nennkapazität 4,2 F.

In das Speichersystem wurde eine Schaltung zur Symmetrierung der Kondensatorspannungen integriert. Damit wird verhindert, dass die Spannungen der einzelnen Kondensatoren aufgrund fertigungstechnisch bedingter Kapazitätsunterschiede beim Laden auseinanderdriften. Zur Symmetrierung der Kondensatoren werden jeweils die Spannungen von zwei in Serie verschalteten Kondensatoren verglichen. Eine auftretende Spannungsdifferenz wird durch gezieltes Entladen des Kondensators mit der höheren Spannung zu Null geregelt. Dieses Prinzip ist seriell kaskadiert, wodurch die Symmetrierung aller Kondensatorspannungen ermöglicht wird. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 4.20 dargestellt. Die im Prinzipschaltbild dargestellten gesteuerten Widerstände wurden durch Transistorendstufen realisiert. Die Regelung der Symmetrierströme und die Ansteuerung dieser Endstufen erfolgt jeweils durch eine Operationsverstärkerschaltung.

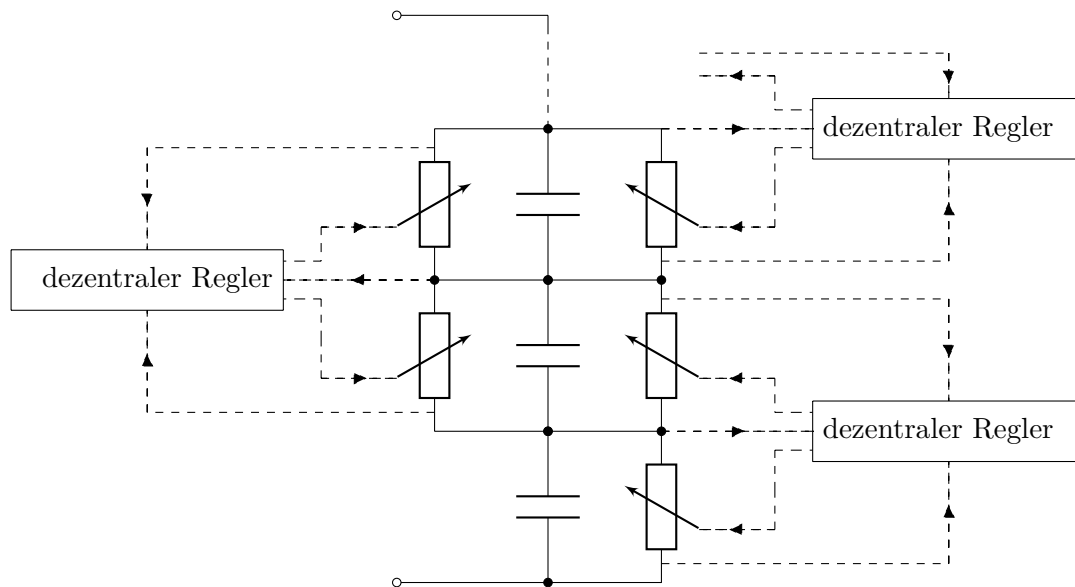


Abbildung 4.20 – Funktionsprinzip der Spannungssymmetrierung des DSK-Moduls. Dezentrale Regler sorgen dafür, dass die Spannungen von jeweils zwei in Serie geschalteten Kondensatoren gleich sind. Auftretende Spannungsdifferenzen werden durch gezielte Entladung des Kondensators mit der höheren Spannung ausgeglichen.

Um die Funktion der Symmetrierung zu demonstrieren, wurden zwei in Serie geschaltete Kondensatoren vor Beginn eines Ladevorgangs künstlich mit einer Spannungsdifferenz versehen. Anschließend wurden die beiden Kondensatoren mit einem IU-Ladeverfahren aufgeladen. Die

4 Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung

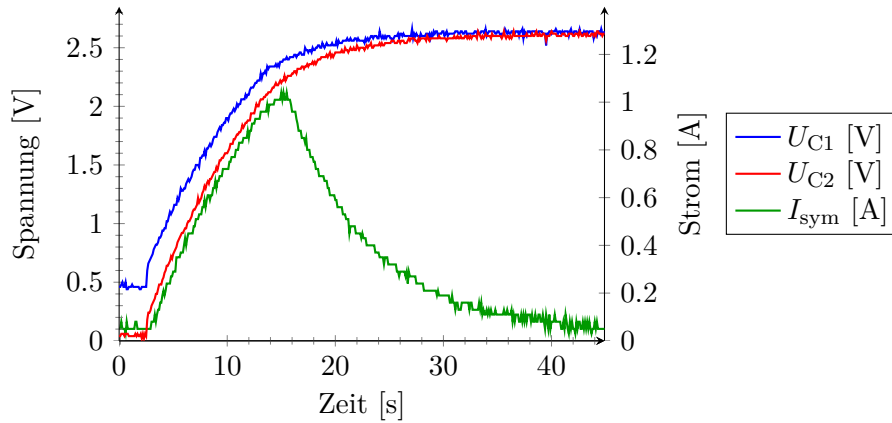


Abbildung 4.21 – Verlauf zweier Kondensatorspannungen U_{C1} und U_{C2} sowie des Symmetrierungsstroms I_{sym} während eines Aufladevorgangs. Zur Demonstration der Spannungssymmetrierung wurde ein Kondensator manuell mit 0,5 V vorgeladen.

Strombegrenzung betrug für den Aufladevorgang 10 A, die Ladeschlussspannung 5,2 V. In Abbildung 4.21 sind die Spannungen der beiden Kondensatoren U_{C1} und U_{C2} , sowie der Symmetrierungsstrom I_{sym} für den gesamten Aufladevorgang dargestellt. Beide Kondensatoren erreichen jeweils 2,6 V am Ende des Ladevorgangs. Das Messergebnis bestätigt die Funktion der Spannungssymmetrierung.

In einer weiteren Messung wurde ein Aufladevorgang des leeren DSK-Moduls bis auf 28 V durchgeführt. Der DC/DC-Steller wird dazu zunächst als Tiefsetzsteller, dann als Tief-Hochsetzsteller und abschließend als Hochsetzsteller betrieben (vgl. Abschnitt 4.7.1). In Abbildung 4.22 ist der Spannungsverlauf des DSK-Moduls U_{DSK} sowie der entnommene Strom aus dem 14 V-Bordnetz I_{BN} dargestellt. Bei ca. 4 s und 8 s sind jeweils zwei kurze Stromeinbrüche zu sehen, die durch die Umschaltung der Stellertopologie zustande kommen.

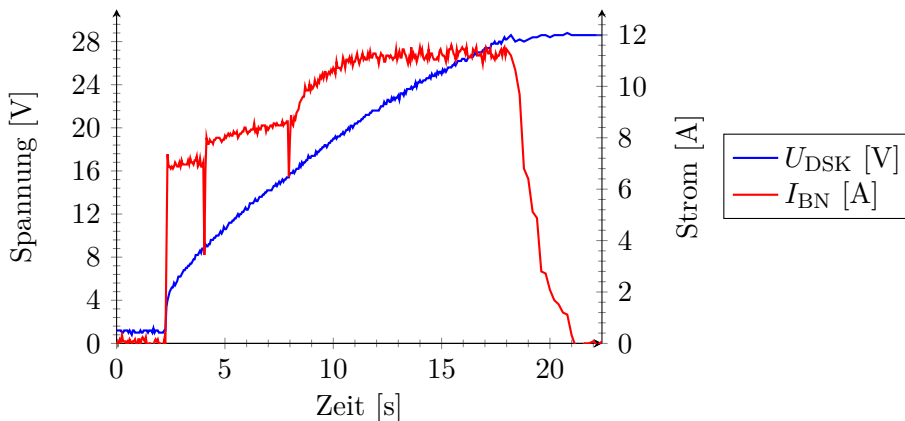


Abbildung 4.22 – Aufladevorgang des DSK-Moduls über den DC/DC-Steller auf eine DSK-Modulspannung von 28 V. Die Stromeinbrüche bei ca. 4 s und 8 s entstehen durch die Umschaltung der Topologie des Stellers.

Das fertig aufgebaute DSK-Modul ist in Abbildung 4.23 zu sehen.

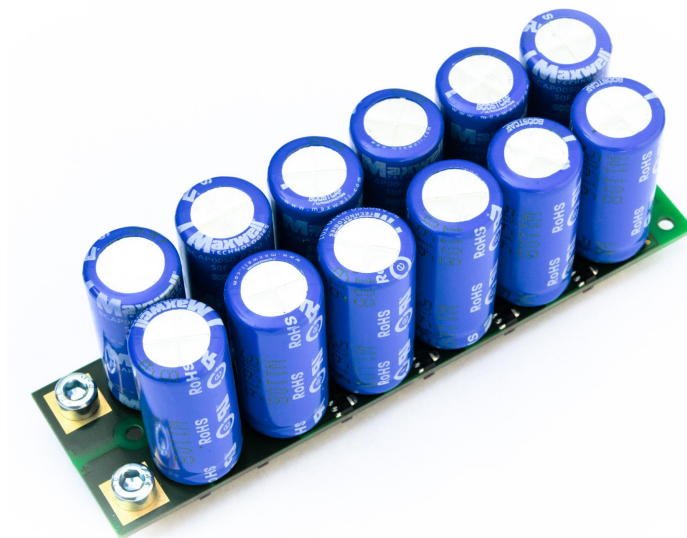


Abbildung 4.23 – DSK-Modul mit 12 in Serie geschalteten 50 F Kondensatoren. Die Nennspannung des Moduls beträgt 32,4 V, die Nennkapazität 4,2 F.

4.7.4 Messtechnischer Nachweis der Spannungsstabilisierung

Für den Funktionsnachweis der Spannungsstabilisierung durch die ASSM wurde das System in den Bordnetzprüfstand integriert. Der Steller wurde an den Verbraucher V3 angebunden, dessen Klemmenspannung bereits in den Messungen aus Abschnitt 4.4.4 die tiefsten Einbrüche aufwies. Zur künstlichen Erzeugung eines noch größeren Spannungseinbruchs wurde der Generator für die Messungen vom Bordnetz abgekoppelt. Als Belastungsszenario dient wie in Abschnitt 4.4.4 ein Ausweichmanöver. Zur Erzeugung einer hohen Grundauslastung des Bordnetzes wurden zusätzlich alle Heizsysteme aktiviert.

Das Lastszenario wurde für den Vergleich einmal ohne und einmal mit aktivierter Spannungsstabilisierung durch den DC/DC-Steller und das Doppelschichtkondensatormodul durchgeführt. In Abbildung 4.24 sind der Verlauf der Klemmenspannung U_{V3} von Verbraucher V3 sowie der dazugehörige Verbraucherstrom I_{V3} aufgetragen. Die Klemmenspannung bricht auf einen Wert von 8,6 V bei einem Strom von 36,9 A ein.

In Abbildung 4.25 ist der Spannungsverlauf mit Spannungsstabilisierung aufgetragen. Der Spannungseinbruch wird wirksam auf 10 V begrenzt. Neben dem Verbraucherstrom sind für den Stabilisierungsfall auch die Ströme aufgetragen, die vom Energiebordnetz und von der Stabilisierungseinheit während des Belastungsszenarios abgegeben wurden. Das Bordnetz muss für den vorliegenden Lastfall lediglich 15,5 A liefern, was im Vergleich zum Spitzenwert aus

4 Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung

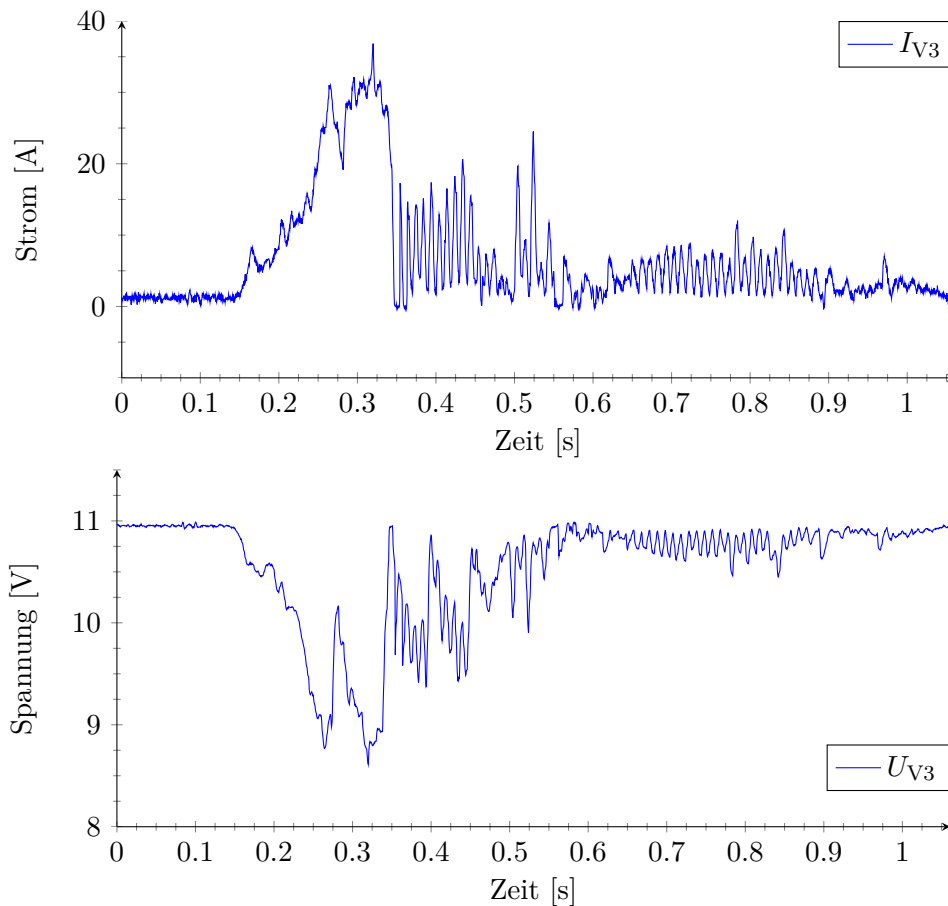


Abbildung 4.24 – Strom- und Spannungsverlauf an den Steuergeräteklammern des Verbrauchers V3 während eines Ausweichmanövers. Für die Messungen wurde zur Erzeugung besonders großer Spannungseinbrüche der Generator vom Bordnetzprüfstand abgeklemmt.

Abbildung 4.25 einer Reduktion von 58 % entspricht. Gleichzeitig reduziert sich der Spitzenwert des Verbraucherstrom V3 von 36,9 A in Abbildung 4.24 auf 31,7 A in Abbildung 4.25. Diese Reduktion liegt in der Leistungscharakteristik des Verbrauchers V3 begründet.

	Ohne ASSM	Mit ASSM
Minimale Spannung	8,6 V	10 V
Spitzenwert des Verbraucherstroms	36,9 A	31,7 A
Spitzenwert des Bordnetzstroms	-	15,5 A

Tabelle 4.4 – Auflistung der minimal gemessenen Spannungen sowie der Spitzenwerte von Verbraucherstrom und Bordnetzstrom für den Betrieb mit und ohne Spannungsstabilisierung durch die ASSM.

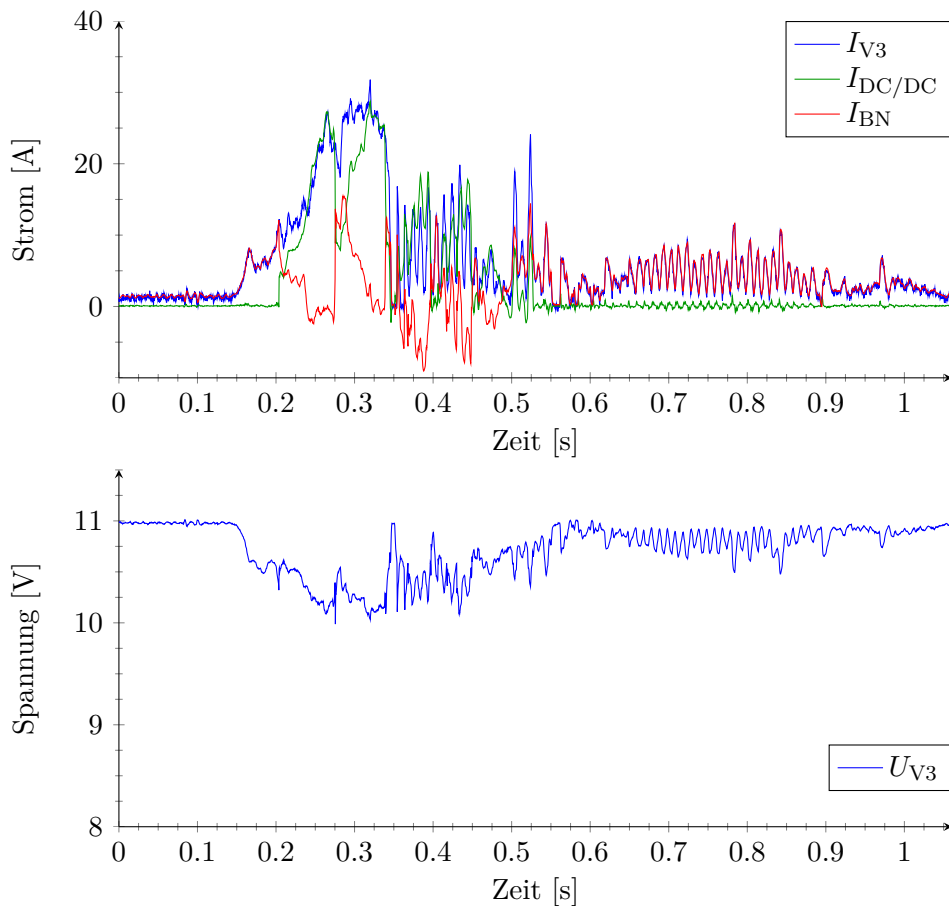


Abbildung 4.25 – Strom- und Spannungsverlauf an den Steuergeräteklennen des Verbrauchers V3 während eines Ausweichmanövers bei aktiver Spannungsstabilisierung durch die ASSM. Neben dem Verbraucherstrom I_{V3} sind auch die Ströme I_{BN} vom Bordnetz und $I_{DC/DC}$ vom DC/DC-Wandler aufgetragen. Für die Messungen wurde zur Erzeugung besonders großer Spannungseinbrüche der Generator vom Bordnetzprüfstand abgeklemmt.

Zur besseren Übersichtlichkeit sind die minimal gemessenen Spannungen sowie die Spitzenwerte von Verbraucherstrom und Bordnetzstrom für beide Messungen in Tabelle 4.4 aufgetragen.

4.7.5 Nachbildung in der Bordnetzsimulation

Zur Nachbildung der Aktiven Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme in der Bordnetzsimulation wurde ein Modell aufgebaut, dessen Grundstruktur in Abbildung 4.26 dargestellt ist. Für die Betrachtung der Spannungsstabilität ist es nicht notwendig, einzelne Schalthandlungen des Stellers zu simulieren. Da die Dynamik eines DC/DC-Stellers außerdem um ein Vielfaches größer ist als die Verbraucherdynamik der Bordnetzkomponenten, kann in guter Näherung eine ideale Stromquelle als Grundlage für die Modellierung verwendet werden. Diese Stromquelle bildet den

Stromregelkreis eines DC/DC-Stellers ab. Der Stromquelle ist ein Spannungsregler überlagert. Auf der Seite des DSK-Moduls wird das Modell analog dazu mit einer Stromsenke aufgebaut. Über einen zentralen Modellierungsblock erfolgt die Berechnung der bordnetzseitigen Ausgangsleistung über die Multiplikation der aufgenommenen Leistung des DSK-Moduls mit einem hinterlegten Wirkungsgrad. Über diesen Modellierungsblock erfolgt außerdem die Steuerung der Betriebsmodi sowie die Regelung der Ausgangsspannung während des Stabilisierungsbetriebs. Des Weiteren können DSK-seitig und bordnetzseitig Strombegrenzungen konfiguriert werden.

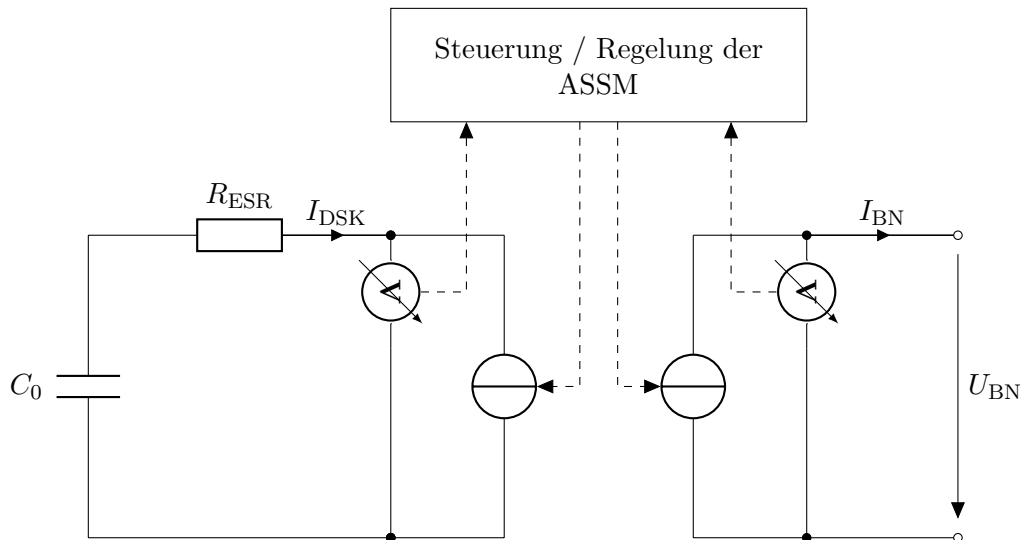


Abbildung 4.26 – Schematische Modellstruktur der Aktiven Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme (ASSM) zur Nachbildung in der Bordnetzsimulation.

4.7.6 Auslegungsaspekte

Die Auslegung einer Aktiven Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme hängt von einer Vielzahl von Rahmenbedingungen ab. Zunächst hat die Höhe des Spannungssollwerts für den Stabilisierungsvorgang einen Einfluss auf mehrere auslegungsrelevante Aspekte. Je höher die Sollspannung am Einspeisepunkt des DC/DC-Stellers während der Stabilisierung gewählt wird, desto mehr Leistung und Energie sind von der ASSM für die wirksame Spannungsstabilisierung eines Spitzenbelastungsszenarios gefordert. Das Bordnetz wird für höhere Sollspannungen der ASSM damit entlastet. Jedoch muss der DC/DC-Steller dafür hinsichtlich der Leistung und das DSK-Modul hinsichtlich Leistung und Energie ausgelegt werden. Wird jedoch ein tieferer Spannungseinbruch zugelassen, verlagert sich die zu liefernde Leistung und Energie wieder auf das Bordnetz. Die ASSM kann dementsprechend kleiner dimensioniert werden.

Ein anderes Auslegungskriterium stellt die Häufigkeit von Stabilisierungsvorgängen dar. Während ein DC/DC-Steller für gelegentliche, kurze Stabilisierungsvorgänge sehr kompakt gebaut

4 Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung

werden kann, verursachen mehrere, dicht aufeinanderfolgende Spannungseinbrüche deutlich mehr Verlustleistung. Dementsprechend muss das thermische Design der Schaltung an das gewünschte Nutzungsprofil angepasst werden. Bei sehr kurz aufeinanderfolgenden Stützvorgängen kann es außerdem vorkommen, dass nicht genug Zeit für das Nachladen des DSK-Moduls bleibt. Dies muss bei der Dimensionierung des Energiespeichers unbedingt beachtet werden.

Aufgrund der dynamischen Wechselwirkungen zwischen Generator, Batterie und den Bordnetzverbrauchern während eines Spitzenbelastungsszenarios ist es unmöglich, eine analytische Auslegung der ASSM durchzuführen. Aus diesem Grund empfiehlt sich in jedem Fall die simulative Untersuchung des gesamten Systemverbundes, um Aussagen über die geforderte Leistung und die Energiemenge für eine Spannungsstabilisierung zu erhalten.

5 Rechnergestützte Optimierung

In diesem Kapitel wird eine Methode zur rechnergestützten Auslegung von spannungsstabilen Energiebordnetzen erarbeitet. Durch die Kopplung der Bordnetzsimulation mit einer Optimierung soll damit die Möglichkeit geschaffen werden, eine gewichtsoptimale Topologie und Komponentendimensionierung zur zuverlässigen Versorgung von Bordnetzverbrauchern zu ermitteln.

Zunächst werden im ersten Abschnitt des Kapitels Randbedingungen definiert und eine inhaltliche Abgrenzung vorgenommen. Im zweiten Abschnitt wird das Optimierungsproblem definiert. Dazu werden zunächst die Freiheitsgrade dargestellt, die in dieser Arbeit zur Stabilisierung des Bordnetzes genutzt werden. Dabei wird die diskrete Natur des vorliegenden Optimierungsproblems erläutert. Für die verschiedenen Möglichkeiten zur Spannungsstabilisierung werden die jeweiligen Parameterräume festgelegt. Es folgt eine Beschreibung des Suchraums für das Optimierungsproblem. Abschließend werden die zu optimierende Zielgröße und die Nebenbedingungen definiert. Der dritte Abschnitt liefert eine Übersicht potenziell geeigneter Optimierungsalgorithmen. Dabei wird die grundlegende Funktionsweise der jeweiligen Algorithmen dargestellt. Abschließend wird die Eignung der Algorithmen für das vorliegende Problem diskutiert und eine Auswahl getroffen. Basierend auf der getroffenen Auswahl wird im vierten Abschnitt eine Möglichkeit erarbeitet, das vorliegende Optimierungsproblem auf direktem Wege innerhalb des vorliegenden diskreten Parameterraums zu optimieren. Dazu werden diskrete Varianten des Particle Swarm Optimierungsalgorithmus aus der Literatur analysiert. Anschließend wird eine Modifikation des Algorithmus vorgenommen, um ein zufriedenstellendes Konvergenzverhalten zu erhalten. Im darauffolgenden fünften Abschnitt wird die Schnittstelle des Optimierungsalgorithmus zur Bordnetzsimulation beschrieben. Im sechsten Abschnitt wird eine Konfiguration des Algorithmus vorgenommen, um eine bestmögliche Performanz der Optimierung zu erzielen. Abschließend werden exemplarische Optimierungsergebnisse dargestellt und diskutiert.

5.1 Randbedingungen und Abgrenzung

Die in diesem Kapitel beschriebene Optimierung eines spannungsstabilen Energiebordnetzes stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit hinsichtlich der Gesamtauslegung. Auf eine Dimensionierung von Leitungsquerschnitten hinsichtlich thermischer Aspekte wird verzichtet.

Es wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass die thermische Auslegung der Leitungen im Entwicklungsprozess vor der Betrachtung von Spannungsstabilitätsanforderungen erfolgt. Demnach können die Leitungsquerschnitte aus der thermischen Auslegung als Untergrenze für eine nachgelagerte Betrachtung der Spannungsstabilität herangezogen werden.

Des Weiteren werden keine Lebensdauer- und Alterungsaspekte von Bauteilen betrachtet, die eventuell bei passiv angeordneten Doppelschichtkondensatoren aufgrund des Generatorstromrippels eine Rolle spielen können. Außerdem werden sämtliche Temperaturabhängigkeiten vernachlässigt. Für alle elektrischen Bauteilparameter sowie Widerstandswerte von Leitungen wird an dieser Stelle Raumtemperatur angenommen. Dasselbe gilt für die Modelle von Verbrauchern, Generator sowie Batterie.

Analog zu den Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung aus Kapitel 4 bleiben die Verlegewege des Kabelbaums sowie die Position der Stromverteiler unverändert. Dasselbe gilt für die Einbaupositionen der Bordnetzkomponenten. Der Fokus liegt damit auf der Spannungsstabilisierung eines bereits bestehenden Bordnetzes.

5.2 Definition des Optimierungsproblems

Als Ausgangssituation für die Optimierung dient die in Abschnitt 3.5 beschriebene Basistopologie eines Energiebordnetzes. Zur besseren Übersichtlichkeit ist die schematische Darstellung des Bordnetzes in Abbildung 5.1 erneut dargestellt. Das Bordnetz besteht aus einem Generator, einer Batterie und Verbrauchern, die über insgesamt drei Stromverteiler und diverse Leitungen

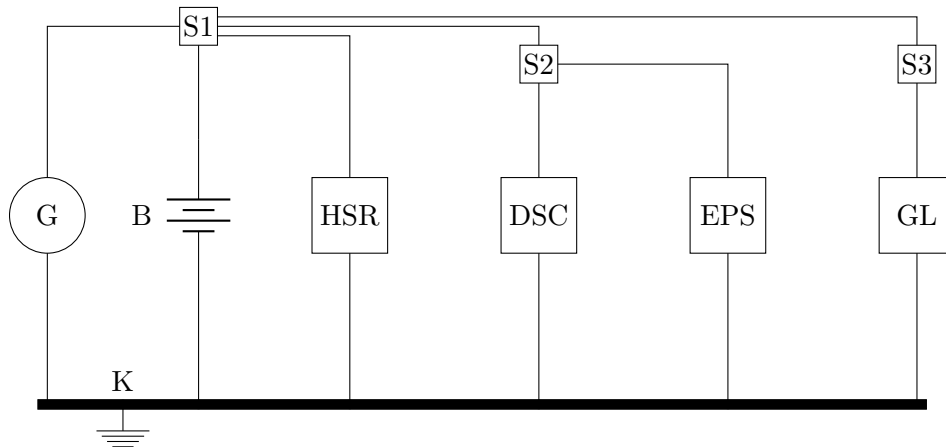


Abbildung 5.1 – Schematische Darstellung des Energiebordnetzes, das als Ausgangssituation für die Optimierung dient. Der Generator (G), die Batterie (B) und die Verbraucher sind über Stromverteiler (S1-S3) und Leitungen miteinander verbunden. Die Komponenten HSR, DSC, EPS sowie eine Grundlast (GL) stellen die Verbraucher dar. Die Karosserie (K) dient als gemeinsamer Masserückleiter.

miteinander verbunden sind. Die Hinterachsschräglaufregelung, die Dynamische Stabilitätskontrolle sowie die elektrische Lenkkraftunterstützung sind dynamische Hochleistungsverbraucher aus dem Bereich der Fahrwerksregelsysteme. Mit einer Grundlast (GL) ist die Leistungsaufnahme verschiedenster Steuergeräte zusammengefasst, die für den Fahrbetrieb notwendig sind. Die Karosserie dient als gemeinsamer Masserückleiter. Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, brechen die Spannungen an den Verbraucherklemmen in Spitzenlastszenarien zum Teil drastisch ein. An den Klemmen der EPS können beispielsweise Spannungseinbrüche bis unter 9 V auftreten.

5.2.1 Freiheitsgrade und Parameterräume

Dimensionierung von Leitungsquerschnitten

Eine Möglichkeit zur Reduktion von Spannungseinbrüchen an den Verbraucherklemmen stellt die Erhöhung von Leitungsquerschnitten dar. Mit einer Vergrößerung der Querschnitte können die ohmschen Verluste in den Leitungen reduziert werden, was den Betrag von Spannungseinbrüchen verringert (vgl. Abschnitt 4.2). Für die Optimierung werden die Leitungen L1 bis L7 als veränderbar definiert, die in Abbildung 5.2 hervorgehoben sind. Diese Leitungen dienen zur Versorgung der Fahrwerksregelsysteme HSR, DSC und EPS. Die Möglichkeit der Spannungsstabilisierung durch veränderbare Leitungsquerschnitte wird an dieser Stelle mit der Variablen x_{L_i} mit $i = 1, 2, \dots, n_L$ definiert. Der Wert n_L entspricht dabei der Anzahl veränderbarer Leitungen und ist damit in diesem Fall $n_L = 7$.

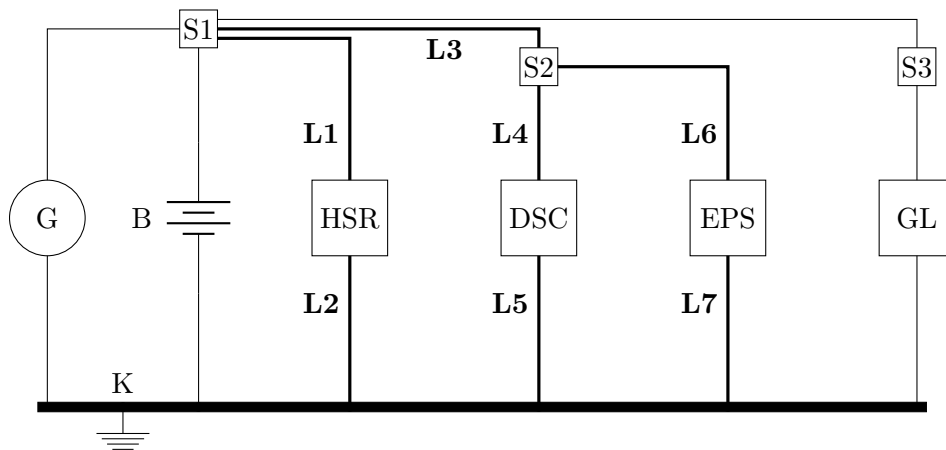


Abbildung 5.2 – Vereinfachte schematische Darstellung des Energiebordnetzes. Ausgehend vom Stromverteiler S1 sind über die Leitungen L1 bis L7 und einen weiteren Stromverteiler S2 die Fahrwerksregelsysteme HSR, DSC und EPS an den Generator (G) und die Batterie (B) angebunden. Die Grundlast (GL) ist über den dritten Stromverteiler S3 an das Bordnetz gekoppelt. Die Karosserie (K) dient als gemeinsamer Masserückleiter.

Für die Wahl der jeweiligen Leitungsquerschnitte stehen lediglich diskrete Standardwerte zur Verfügung, die von Zulieferfirmen vorgegeben werden. In dieser Arbeit werden exemplarisch folgende Querschnittswerte verwendet:

$$D_L = \{6; 10; 16; 25; 35\} \text{ mm}^2$$

Die oben definierte Variable x steht jedoch nicht für einen konkreten Querschnittswert, sondern repräsentiert einen diskreten Schritt innerhalb eines zugewiesenen Definitionsbereiches, der durch eine Abbildung beschrieben werden kann. Für die veränderbaren Leitungsquerschnitte kann diese Abbildung als Bijektion mit einer indizierten Teilmenge aus dem Bereich der natürlichen Zahlen $\mathbb{N}, \mathbb{N}_{|D_L|} := \{1, 2, \dots, |D_L|\}, x_{L_i} \in \mathbb{N}_{|D_L|}$ ausgedrückt werden:

$$\mathbb{N}_{|D_L|} \mapsto D_L \subset \mathbb{R} \quad \text{und} \quad |D_L| = 5 \quad (5.1)$$

Integration von Komponenten zur Spannungsstabilisierung

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion von Spannungseinbrüchen stellt die lokale Anbindung von spannungsstabilisierenden Komponenten an die Klemmen kritischer Verbraucher dar. Für die Optimierung werden die Klemmen K1 bis K3 der Komponenten HSR, DSC sowie EPS als potenzielle Anbindungspunkte definiert, wie in Abbildung 5.3 dargestellt.

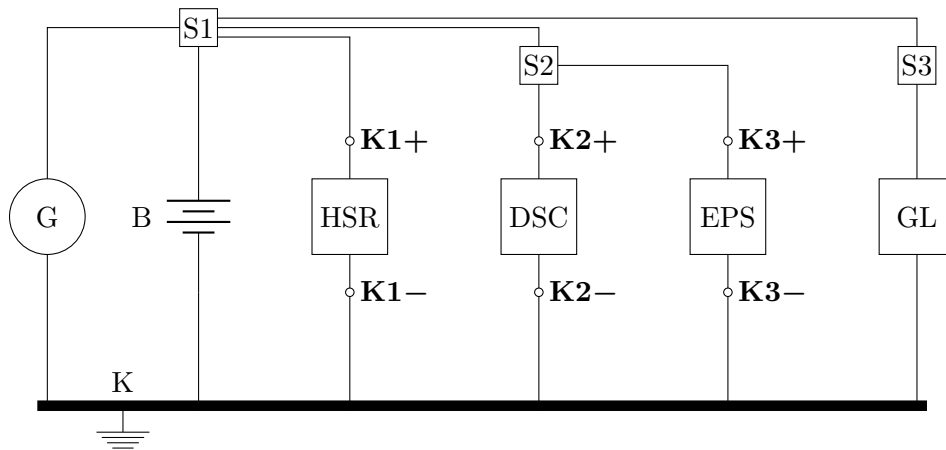


Abbildung 5.3 – Vereinfachte schematische Darstellung des Energiebordnetzes. Der Generator (G), die Batterie (B) und die Verbraucher sind über Stromverteiler (S1-S3) und Leitungen miteinander verbunden. Die Fahrwerksregelsysteme HSR, DSC und EPS sowie eine Grundlast (GL) stellen die Verbraucher dar. Die Klemmen der Fahrwerksregelsysteme sind mit K1 bis K3 bezeichnet und bieten die Möglichkeit zur Anbindung von Spannungs-Stabilisierungsmaßnahmen. Die Karosserie (K) dient als gemeinsamer Masserückleiter.

a) *Passive Anbindung von Doppelschichtkondensatoren*

Als erste Variante zur lokalen Spannungsstabilisierung dienen für die Optimierung in dieser Arbeit passiv angebundene Doppelschichtkondensatoren. Diese Art der Bordnetzstabilisierung wurde in Abschnitt 4.6 als Passive Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme bezeichnet. Eine schematische Darstellung einer PSSM-Einheit zur lokalen Anbindung an die Klemmen eines Verbrauchers ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

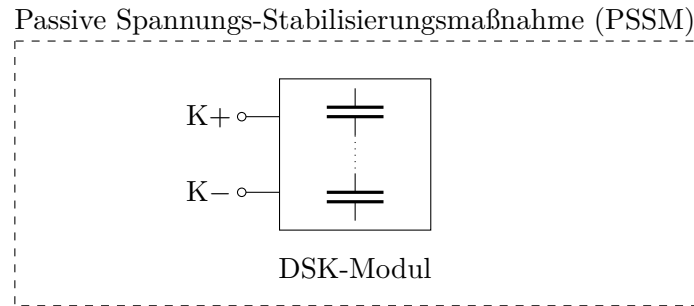


Abbildung 5.4 – Schematische Darstellung einer Passiven Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme (PSSM).

Durch die direkte Anbindung der DSKs an das Bordnetz muss die Nennspannung eines PSSM-Moduls größer sein als die maximal auftretende Bordnetzspannung. Bei einer Nennspannung von 2,7 V pro Kondensator benötigt man bei einer maximalen Bordnetzspannung von 14,4 V mindestens 6 in Serie geschaltete Kondensatoren. Die Nennspannung eines Moduls beträgt damit 16,2 V. Bei einer festen Anzahl von 6 seriellen DSKs ist der einzige Freiheitsgrad für die Dimensionierung eines PSSM-Moduls die Nennkapazität $C_{N,PSSM}$. Diese Art der Spannungsstabilisierung wird in der Optimierung mit der Variablen $x_{C_{N,PSSM,i}}$ mit $i = 0, 1, \dots, n_{K_{PSSM}}$ definiert. Der Wert $n_{K_{PSSM}}$ steht dabei für die Anzahl möglicher Verbraucherklammern, an denen eine Komponente zur Spannungsstabilisierung angeschlossen werden kann. In diesem Fall ist damit $n_{K_{PSSM}} = 3$.

Für den Aufbau eines PSSM-Moduls stehen für die Optimierung insgesamt acht unterschiedliche Einzelkapazitätswerte C_e aus der HC-, BC- und K2-Serie der Firma Maxwell von 5 F bis 650 F zur Verfügung [90–92]. In Tabelle 5.1 sind die verschiedenen Kapazitätswerte C_e sowie die resultierenden Gesamtkapazitätswerte $C_{N,PSSM}$ bei serieller Verschaltung mit den jeweiligen elektrischen Parametern aufgelistet.

Dementsprechend gilt inklusive der Diskretisierungsstufe 0 F, die einem Verzicht auf die lokale Stabilisierung durch eine PSSM entspricht:

$$D_{C_{N,PSSM}} = \{0; 0,83; 1,67; 4,17; 8,33; 16,67; 25,00; 51,67; 108,33\} \text{ F}$$

C_e [F]	R_e [mΩ]	m_C [g]	$C_{N,PSSM}$ [F]	R_{PSSM} [mΩ]	m_{PSSM} [g]	I_{max} [A]
5	170,0	2,3	0,83	1020,0	13,8	3,6
10	75,0	4,0	1,67	450,0	24,0	7,7
25	42,0	7,5	4,17	252,0	45,0	16,5
50	20,0	13,0	8,33	120,0	78,0	33,8
100	15,0	23,0	16,67	90,0	138,0	54,0
150	14,0	35,0	25,00	84,0	210,0	65,3
310	2,2	60,0	51,67	13,2	360,0	270,0
650	0,8	160,0	108,33	4,8	960,0	680,0

Tabelle 5.1 – Auflistung der Parameter von einzelnen DSKs aus der HC-, BC- und K2-Serie der Firma Maxwell [90–92] sowie die resultierenden Parameter bei serieller Verschaltung von 6 Kondensatoren.

Wie in (5.1) erfolgt eine Abbildung des Definitionsbereichs auf eine Teilmenge aus dem Bereich der natürlichen Zahlen $\mathbb{N}, x_{C_{N,PSSM,i}} \in \mathbb{N}_{|D_{C_{N,PSSM}}|}$:

$$\mathbb{N}_{|D_{C_{N,PSSM}}|} \mapsto D_{C_{N,PSSM}} \subset \mathbb{R}, |D_{C_{N,PSSM}}| = 9 \quad (5.2)$$

b) Aktive Anbindung von Doppelschichtkondensatoren

Als zweite Variante zur lokalen Spannungsstabilisierung dient für die Optimierung in dieser Arbeit die Aktive Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme, die in Abschnitt 4.7 vorgestellt wurde. Die ASSM besteht aus einem DC/DC-Steller und einem DSK-Modul, wie in Abbildung 5.5 schematisch dargestellt.

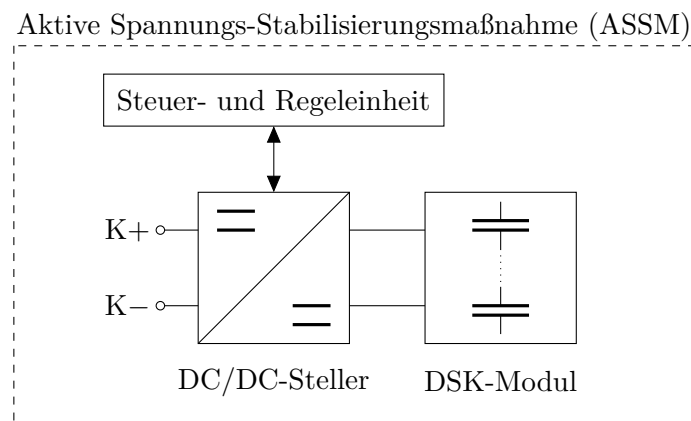


Abbildung 5.5 – Schematische Darstellung einer Aktiven Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme (ASSM), die aus einem DC/DC-Steller und einem DSK-Modul besteht.

Durch die Entkopplung der Doppelschichtkondensatoren vom Bordnetz ergeben sich neue Freiheitsgrade bei der Auslegung. So kann bei der ASSM die Nennspannung des DSK-Moduls unabhängig von der Bordnetzspannung gewählt werden. Die Grenzen sind dabei durch den DC/DC-Steller vorgegeben. Das Konzept aus Abschnitt 4.7 sieht einen Spannungsbereich von 15 V bis 50 V für das DSK-Modul vor. Bei einer Nennspannung von 2,7 V pro Doppelschichtkondensator sind damit insgesamt 13 verschiedene Modul-Nennspannungen möglich:

$$D_{V_{N,ASSM}} = \{16,2; 18,9; 21,6; 24,3; 27; 29,7; 32,4; 35,1; 37,8; 40,5; 43,2; 45,9; 48,6\} \text{ V}$$

Der Freiheitsgrad für die Wahl der DSK-Nennspannung wird mit der Variablen $x_{V_{N,ASSM},i}$ mit $i = 0,1, \dots, n_{K_{ASSM}}$ definiert. Wie bei der passiven Spannungsstabilisierung PSSM beträgt $n_{K_{ASSM}} = 3$ und steht für die Anzahl möglicher Verbraucherklammern, an denen eine ASSM angeschlossen werden kann. Es gilt:

$$\begin{aligned} x_{V_{N,ASSM},i} &\in \mathbb{N}_{|D_{V_{N,ASSM}}|}, \\ \mathbb{N}_{|D_{V_{N,ASSM}}|} &\mapsto D_{V_{N,ASSM}} \subset \mathbb{R}, |D_{V_{N,ASSM}}| = 13 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Neben der Nennspannung des DSK-Moduls können wie bei der PSSM sechs unterschiedliche Einzelkapazitätswerte C_e aus der HC-Serie der Firma Maxwell [91] für den Aufbau des DSK-Moduls verwendet werden. Die elektrischen Parameter sowie das Gewicht eines einzelnen Kondensators sind in Tabelle 5.2 aufgelistet.

C_e [F]	R_e [mΩ]	m_C [g]
5	170,0	2,3
10	075,0	4,0
25	042,0	7,5
50	020,0	13,0
100	015,0	23,0
150	014,0	35,0

Tabelle 5.2 – Auflistung der Parameter einzelner DSKs aus der HC-Serie der Firma Maxell [91], die für den Aufbau eines Moduls für die ASSM verwendet werden können.

Analog zur Definition verschiedener Kapazitätswerte für die PSSM gilt an dieser Stelle für die ASSM:

$$D_{C_{N,ASSM}} = \{0; 5; 10; 25; 50; 100; 150\} \text{ F} \quad (5.4)$$

$$x_{C_{N,ASSM},i} \in \mathbb{N}_{|D_{C_{N,ASSM}}|},$$

$$\mathbb{N}_{|D_{C_{N,ASSM}}|} \mapsto D_{C_{N,ASSM}} \subset \mathbb{N}, |D_{C_{N,ASSM}}| = 7 \quad (5.5)$$

Wie bei der PSSM entspricht die Diskretisierungsstufe 0 F demjenigen Fall, bei dem keine ASSM zur Spannungsstabilisierung verwendet wird.

Die Sollspannung des Reglers der ASSM stellt den dritten Freiheitsgrad bei der Auslegung dar. Da die Reglerdynamik beschränkt ist, kann die Spannung an der ASSM bei dynamischen Verbraucherlastsprüngen kurzzeitig unter den geforderten Sollwert fallen. Aus diesem Grund muss die Reglersollspannung auf einen zunächst unbekanntem Wert oberhalb der geforderten Minimalspannung gelegt werden, um diesem Problem zu begegnen. Falls dieser Regler-Offset für eine bestimmte Spannungsanforderung zu groß ist, wird während eines Stabilisierungsvorgangs unnötig viel Energie benötigt. Auf der anderen Seite führt ein zu geringer Offset dazu, dass die geforderte Mindestspannung nicht eingehalten werden kann. Für die Optimierung sind ausgehend von einer minimal geforderten Bordnetzspannung U_{\min} folgende 10 positive Offset-Werte möglich:

$$D_{V_{\text{SOLL-OFFSET}}} = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0\} \text{ V}$$

Für die Optimierung wird dieser Freiheitsgrad mit der Variablen $x_{V_{\text{SOLL-OFFSET}}}$ bezeichnet. Es gilt:

$$x_{V_{\text{SOLL-OFFSET}},i} \in \mathbb{N}_{|D_{V_{\text{SOLL-OFFSET}}}|},$$

$$\mathbb{N}_{|D_{V_{\text{SOLL-OFFSET}}}|} \mapsto D_{V_{\text{SOLL-OFFSET}}} \subset \mathbb{R}, |D_{V_{\text{SOLL-OFFSET}}}| = 10 \quad (5.6)$$

5.2.2 Suchraum

Basierend auf den im vorherigen Abschnitt definierten Freiheitsgraden und Parameterräumen kann der gesamte Suchraum Ω durch den folgenden Ausdruck definiert werden:

$$\Omega := \left\{ \mathbb{N}_{|D_L|} \right\}^{n_L} \times \left\{ \mathbb{N}_{|D_{C_{N,PSSM}}|} \right\}^{n_{K_{PSSM}}} \times \left\{ \mathbb{N}_{|D_{V_{N,ASSM}}|} \times \mathbb{N}_{|D_{C_{N,ASSM}}|} \times \mathbb{N}_{|D_{V_{\text{SOLL-OFFSET}}}|} \right\}^{n_{K_{ASSM}}} \quad (5.7)$$

Eine Bordnetzkonfiguration innerhalb dieses Suchraums wird nachfolgend mit der Variablen \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \Omega$, beschrieben.

Die maximale Größe des Suchraums umfasst damit rund $4,3 \cdot 10^{16}$ kombinatorische, diskrete Bordnetzkonfigurationen \mathbf{x} in $d = 19$ Dimensionen. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird jedoch eine Begrenzung auf maximal eine ASSM-Komponente ($n_{K_{ASSM}} = 1$) festgelegt, um die Handhabbarkeit hinsichtlich der Simulations- und Optimierungszeit in Grenzen zu halten. Der Suchraum reduziert sich damit auf rund $5,1 \cdot 10^{10}$ mögliche Bordnetzkonfigurationen in 13 Dimensionen.

5.2.3 Zielgröße und Nebenbedingungen

Das Ziel der Optimierung ist, eine gewichtsoptimale Topologie und Komponentendimensionierung für die spannungsstabile Versorgung der Bordnetzkomponenten zu erhalten. Zunächst gilt für das Gewicht der Ausgangskonfiguration \mathbf{x} des Bordnetzes unter Vernachlässigung aller nicht veränderbarer Komponenten:

$$m_{\text{Gesamt}}(\mathbf{x}) = m_{\text{Leitungen}}(\mathbf{x}) \quad (5.8)$$

An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass die Ausgangskonfiguration \mathbf{x} keine stabile Versorgung des Bordnetzes ermöglicht. Das bedeutet, dass bei der Belastung durch das Referenzszenario Spannungseinbrüche bis unter 10 V auftreten können. Die Optimierung soll innerhalb des oben definierten Suchraums Ω diejenige gewichtsoptimale Bordnetzkonfiguration \mathbf{x}' ermitteln, die eine Einhaltung vordefinierter Mindestspannungen ermöglicht. Für das Gesamtgewicht der neuen Bordnetzkonfiguration \mathbf{x}' gilt:

$$m_{\text{Gesamt}}(\mathbf{x}') = m_{\text{Leitungen}}(\mathbf{x}') + m_{\text{PSSMs}}(\mathbf{x}') + m_{\text{ASSMs}}(\mathbf{x}') \quad (5.9)$$

Das Gesamtgewicht $m_{\text{Gesamt}}(\mathbf{x}')$ steigt dabei monoton mit jeder Parametererhöhung innerhalb der jeweiligen Parameterräume.

Die zu optimierende Zielfunktion Z wird durch die Differenz aus dem Gewicht der Ausgangskonfiguration \mathbf{x} und dem Gewicht der optimalen Bordnetzkonfiguration \mathbf{x}' definiert:

$$Z(\mathbf{x}') := m_{\text{Gesamt}}(\mathbf{x}') - m_{\text{Gesamt}}(\mathbf{x}) \quad (5.10)$$

Ein Optimierungsergebnis liefert damit das Differenzgewicht der Komponenten und Querschnittsvergrößerungen, die zur Stabilisierung einer Ausgangskonfiguration des Bordnetzes benötigt werden.

Die Einhaltung einer vordefinierten Mindestspannung U_{\min} wird über eine Nebenbedingung definiert. Demnach muss der zeitliche Verlauf der Spannungen an kritischen Verbraucherstellen U_K während eines Belastungsszenarios stets größer sein als die geforderte Mindestspannung.

Es gilt damit:

$$\min_{\mathbf{x} \in \Omega} Z(\mathbf{x}') \quad \text{mit} \quad U_K(t) \geq U_{\min} \quad , \quad \forall t, \quad \forall K \quad (5.11)$$

Diese Nebenbedingung schreibt eine einheitliche Mindestspannung U_{\min} für alle relevanten Verbraucherstellen K vor. Alternativ können für jeden Verbraucher auch unterschiedliche Mindestspannungen vorgegeben werden.

Eine weitere Nebenbedingung ergibt sich bei einer Integration von passiv angebotenen Doppelschichtkondensatoren in das Bordnetz. Durch die direkte Verbindung der DSKs mit dem Bordnetz kann kein Einfluss auf resultierende Entladestromspitzen in einem Belastungsfall genommen werden. Aus diesem Grund muss stets überprüft werden, ob die im Datenblatt angegebenen Maximalwerte nicht überschritten werden (vgl. Tabelle 5.1). Es gilt am Beispiel einer einzelnen PSSM:

$$\min_{\mathbf{x} \in \Omega} Z(\mathbf{x}') \quad \text{mit} \quad I_{\text{PSSM}}(t) \leq I_{\max} \quad , \quad \forall t \quad (5.12)$$

Beim Einsatz mehrerer PSSM-Komponenten kommen analog dazu weitere Nebenbedingungen hinzu.

Um die Erfüllung der oben beschriebenen Nebenbedingungen für verschiedene Bordnetzkonfigurationen \mathbf{x} zu überprüfen, muss jeweils eine Simulation durchgeführt werden. Dadurch ergibt sich ein hoher Rechenaufwand für die Auswertung der Nebenbedingungen, während die Berechnung der Zielfunktion $Z(\mathbf{x}')$ trivial ist.

5.2.4 Anforderungen an den Optimierungsalgorithmus

Das vorliegende Optimierungsproblem gehört zur Klasse der kombinatorischen Optimierung [78]. Das Problem ist analytisch nicht beschreibbar und es liegen keinerlei Informationen über Stetigkeit sowie Differenzierbarkeit vor. Durch den äußerst großen Suchraum und die hohe Anzahl von Dimensionen (vgl. Abschnitt 5.2.2 und 5.2.1) kommen zur Lösung des Problems lediglich stochastische, metaheuristische Algorithmen in Betracht [46].

Aufgrund der rechenintensiven Überprüfung der Nebenbedingungen (vgl. Abschnitt 5.2.3) ist es wünschenswert, dass eine schnelle Konvergenz bei gleichzeitiger Auffindung eines globalen Optimums erreicht werden kann. Die Rechenintensivität erfordert außerdem eine Anpassung des Optimierungsvorgangs an heutige Rechnerarchitekturen. So sollten nach Möglichkeit alle

Prozessorkerne einer Rechnerplattform für die Optimierung genutzt werden können, um den Vorgang zu beschleunigen.

Des Weiteren liegen alle zu optimierenden Größen in diskreter Form vor (vgl. Abschnitt 5.2.1). Damit handelt es sich um ein rein diskretes Optimierungsproblem. Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten, sollte die Optimierung unmittelbar diskret erfolgen. Dadurch kann eine Überführung des Problems ins Kontinuierliche erspart werden, was zunächst eine abschnittsweise Linearisierung, und anschließend eine Diskretisierung erfordern würde.

5.3 Optimierungsalgorithmen

In diesem Abschnitt werden potenziell geeignete Algorithmen für das vorliegende Problem betrachtet. Wie in Abschnitt 5.2.4 als grundsätzliche Anforderung beschrieben, werden an dieser Stelle lediglich gängige Vertreter aus dem Bereich der stochastischen, metaheuristischen Algorithmen in Betracht gezogen. Nach einer Beschreibung der unterschiedlichen Algorithmusfunktionsweisen erfolgt eine Diskussion der jeweiligen Eignung für das betrachtete Problem.

5.3.1 Tabu-Suche

Die Tabu-Suche (engl.: Tabu Search, TS) wurde Ende der Achtzigerjahre von F. Glover entwickelt [47, 48]. Die grundlegende Idee der TS besteht darin, während eines Optimierungsvorgangs eine sogenannte Tabuliste zu erstellen. Auf dieser Liste wird der bisherige Suchverlauf abgespeichert. Zur Steigerung der Sucheffizienz werden im einfachsten Fall alle in der Liste eingetragenen Lösungen für die weitere Suche verboten. Dadurch wird vermieden, dass die Suche im Bereich eines lokalen Minimums stagniert. Wenn nämlich der gesamte Bereich eines lokalen Minimums abgesucht ist, muss ein neuer Weg für die Suche nach einem globalen Optimum eingeschlagen werden. Die Entscheidung der Suchrichtung erfolgt dabei nach dem Zufallsprinzip.

5.3.2 Simulierte Abkühlung

Die Idee der simulierten Abkühlung (engl.: Simulated Annealing, SA) wurde erstmals 1983 von Kirkpatrick et al. veröffentlicht [71]. Dabei handelt es sich um ein naturanaloges Verfahren zur Optimierung komplexer Probleme, das an den physikalischen Vorgang der Abkühlung eines Metalls angelehnt ist. Findet eine Abkühlung langsam genug statt, können die Atome eine optimale Kristallstruktur bilden. Eine reine Kristallstruktur repräsentiert den besten energetischen Zustand und damit das globale Optimum. Falls der Abkühlungsprozess zu schnell durchgeführt wird, können Defekte im Kristallgitter entstehen.

Der SA-Algorithmus testet ausgehend von einem zufällig initialisierten Parametersatz benachbarte Parametersätze in Bezug auf deren Zielfunktion und Nebenbedingungen. Falls sich die Zielfunktion eines benachbarten Parametersatzes verbessert und gleichzeitig alle Nebenbedingungen erfüllt werden, bewegt sich der Algorithmus zu diesem Nachbarn. Falls der Nachbar hinsichtlich seiner Zielfunktion schlechter oder gleich gut ist, bewegt sich der Algorithmus mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu diesem Nachbar. Wie hoch eine entsprechende Wahrscheinlichkeit ist, wird durch die Temperatur definiert. Im Laufe des Optimierungsprozesses sinkt die Temperatur des fiktiven Materials stetig. Damit wechselt der Algorithmus anfänglich seine Position häufiger und erkundet dadurch den Suchraum. Im weiteren Verlauf des Abkühlprozesses verharrt der Algorithmus zunehmend im Bereich seines bisher gefundenen Optimums und sucht in der näheren Umgebung nach besseren Nachbarn. Ein Positionswechsel zu einem schlechteren Nachbarn wird aufgrund der stetig sinkenden Temperatur dann immer unwahrscheinlicher. Wenn die simulierte Abkühlung zu schnell erfolgt, kann der Algorithmus unter Umständen lediglich ein lokales Optimum auffinden.

5.3.3 Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre Algorithmen (EA) orientieren sich an der biologischen Evolution, in der ein Anpassungsprozess einzelner Arten oder Individuen an vorherrschende Umweltbedingungen erfolgt. Dabei verändert sich der genetische Code einer Population von einer Generation zur nächsten. Die Evolutionären Algorithmen gehören wie die SA zur Klasse der naturanalogen Optimierungsverfahren.

Die grundlegenden Evolutionsmechanismen der Algorithmen sind die Mutation und die Selektion. Bei der Mutation können im Verlauf einer Zellteilung kleine Fehler bei der Replikation des genetischen Codes vorkommen. Die Selektion sorgt dafür, dass diejenigen Individuen überleben, die sich am besten an die Umwelt anpassen. Insgesamt gibt es vier verschiedene Ausprägungen evolutionärer Algorithmen:

- Genetische Algorithmen (GA)
- Evolutionsstrategien (ES)
- Genetische Programmierung (GP)
- Evolutionäre Programmierung (EP)

Diese klassischen Formen der EA unterscheiden sich unter anderem in Bezug auf die Darstellungsweise von Suchräumen, die Vorgehensweise bei der Selektion und die Art und Weise, wie eine Elterngeneration in den Selektionsprozess miteinbezogen wird. Neben den vier ursprünglichen Ausprägungen gibt es heute eine unüberschaubare Anzahl von Mischformen, die zum Teil nicht mehr eindeutig diesen Urformen zugewiesen werden können [145].

5.3.4 Schwarmintelligenz

Ganz allgemein zeichnet sich Schwarmintelligenz (engl.: Swarm Intelligence, SI) dadurch aus, dass Individuen einer Gruppe durch die Interaktion untereinander und die Interaktion mit ihrer Umwelt intelligentes Verhalten aufweisen können. Als Vorbild für die Verhaltensweise intelligenter Schwärme dienen beispielsweise Vogel- oder Fischeschwärme sowie das Bakterienwachstum. Algorithmen mit Schwarmintelligenz gehören damit wie die SA und die EA zur Klasse der naturanalogen Optimierungsverfahren.

Ameisenalgorithmus

Der Ameisenalgorithmus (engl.: Ant Colony Optimization, ACO) ist an die Verhaltensweise von Ameisen auf der Futtersuche angelehnt. Ameisen scheiden entlang ihres Weges einen Duftstoff aus. Wenn ein Weg von mehreren Ameisen benutzt wird, steigt damit die Konzentration des Duftstoffes auf diesem Weg. Dies führt dazu, dass andere Ameisen diesen Weg mit höherer Wahrscheinlichkeit gehen als einen Weg mit weniger Duftstoffkonzentration. Wenn ein Ameisennest mit einer Futterquelle über mehrere, unterschiedlich lange Wege verbunden ist, so erhöht sich mit der Zeit die Konzentration des ausgeschiedenen Duftstoffes auf dem kürzesten Weg am schnellsten. Dies hängt damit zusammen, dass die Ameisen den Hin- und Rückweg auf der kürzesten Verbindung deutlich schneller absolvieren als die Ameisen auf den längeren Wegen [31].

Nahrungssuche von Bakterien

Ein anderer Algorithmus mit Schwarmintelligenz ahmt das Verhalten von Bakterien auf der Nahrungssuche nach (engl.: Bacterial Foraging Optimization Algorithm, BFOA). Die Idee dafür geht auf eine Veröffentlichung von Passino im Jahr 2002 zurück und lehnt sich an das Verhalten von *E. coli* Bakterien an [104]. Ein Bakterium geht bei der Nahrungssuche demnach so vor, dass es möglichst viel Energie in einer bestimmten Zeit erhält. Gleichzeitig kommunizieren die Bakterien untereinander. Auf diese Art und Weise ziehen Bakterien in einem nahrungsreichen Gebiet umliegende Bakterien an und verstärken so das Wachstum in diesem Bereich. In nahrungsrärmeren Gebieten sterben dagegen Bakterien ab. Auf den Algorithmus übertragen wird so dafür gesorgt, dass eine Population konstant bleibt und sich hin zu einem energetischen Optimum orientiert. Eine weitere Beobachtung Passinos war außerdem, dass einzelne Bakterien gelegentlich zufällig deplatziert waren. Übertragen auf den Algorithmus wird so dafür gesorgt, dass wahrscheinlichkeitsbasiert andere Bereiche des Suchraumes erkundet werden.

Partikelschwarm

Die Partikelschwarmoptimierung (engl.: Particle Swarm Optimization, PSO) wurde von J. Kennedy und R. Eberhart Mitte der Neunzigerjahre veröffentlicht [66]. Die PSO orientiert sich an den Verhaltensweisen von Vogel- und Fischeschwärmen. Der Algorithmus bewegt Partikel durch

den Suchraum und sucht so nach einem Parametersatz mit einer optimalen Zielfunktion. Die Partikel werden dabei wie Masseteilchen behandelt, die eine Geschwindigkeit, eine Position und ggf. auch eine Massenträgheit haben. Auf der Suche nach dem Optimum wird jeder Partikel von seinem eigenen bisherigen Bestpunkt und dem Bestpunkt der gesamten Partikelpopulation gelenkt. Auf diese Weise orientiert sich der Schwarm in Richtung des globalen Optimums [68].

5.3.5 Diskussion und Auswahl

Bei der Auswahl eines geeigneten Algorithmustyps für das vorliegende Optimierungsproblem werden zunächst die Tabu-Suche (TS) und die Simulierte Abkühlung (SA) ausgeschlossen. Bei der TS ist zu erwarten, dass die Fortbewegung des Algorithmus zu ungerichtet ist und aufgrund des äußerst großen Parameterraums kein zufriedenstellendes Ergebnis in endlicher Zeit erreicht werden kann. Der Ausschluss der SA hängt mit der vergleichsweise langsamen Konvergenzgeschwindigkeit zusammen, die für eine zuverlässige Auffindung des Optimums gewählt werden muss. Als nächstes wird der BFOA ausgeschlossen. Dies wird damit begründet, dass aufgrund der hohen Dimensionalität des vorliegenden Problems die Populationsgröße sehr groß sein müsste, um genügend benachbarte Bakterien abbilden zu können. Dadurch wäre wie bei der TS und SA eine vergleichsweise schlechte Performanz zu erwarten.

Aus den übrig bleibenden Algorithmen wird der PSO den evolutionären Algorithmen und dem Ameisenalgorithmus vorgezogen. Der PSO bietet im Hinblick auf die hohe Dimensionalität, die notwendige Konvergenzgeschwindigkeit und die Komplexität des vorliegenden Problems im Vergleich die besten Voraussetzungen. Außerdem ist der PSO grundsätzlich sehr gut für eine Parallelisierung auf Mehrkern-Rechnerarchitekturen geeignet, was hinsichtlich der rechenintensiven Auswertung der Nebenbedingungen (vgl. Abschnitt 5.2.3) äußerst wichtig ist. Ein weiterer Entscheidungsgrund für die PSO hängt mit der diskreten Natur des vorliegenden Problems zusammen. In der Literatur existieren bereits Arbeiten, die den direkten Umgang mit diskreten Optimierungsproblemen adressieren [67, 139].

5.4 Implementierung einer diskreten Partikelschwarmoptimierung

Auf Basis der in Abschnitt 5.3.5 getroffenen Wahl zugunsten der Partikelschwarmoptimierung als Algorithmustyp erfolgt in diesem Unterkapitel die Implementierung der Optimierung. Im Fokus steht dabei die Anpassung des Optimierungsalgorithmus auf die diskrete Natur des zu optimierenden Problems. Zunächst wird die ursprüngliche Form der kontinuierlichen Partikelschwarmoptimierung vorgestellt. Anschließend werden diskrete Abwandlungen der ursprünglichen Form betrachtet und deren Funktionsweise analysiert. Abschließend erfolgt eine Modifikation des Algorithmus auf die vorliegende Problemstellung.

5.4.1 Kontinuierliche Partikelschwarmoptimierung

Die ursprüngliche Version des Particle Swarm Optimization von J. Kennedy und R. Eberhart aus dem Jahr 1995 wurde für die Lösung von Problemen im Raum der reellen Zahlen eingeführt [66]. Zu Beginn eines Optimierungsvorgangs werden bei der PSO die Partikel nach dem Zufallsprinzip im Suchraum platziert. Jedes Partikel merkt sich seine bisher beste Position innerhalb des Suchraumes, die mit p_{id} bezeichnet wird. Neben diesem persönlichen Bestwert kennt jedes Partikel gleichzeitig den Bestwert der gesamten Partikelpopulation, der mit p_{gd} bezeichnet wird. Alle Partikel orientieren sich bei der Bewegung durch den Suchraum nach den beiden Punkten p_{id} und p_{gd} . Wie stark sich die Partikel dabei nach einem der beiden Punkte orientieren, wird durch zwei Gewichtungsfaktoren Ψ_p und Ψ_g vorgegeben. Zusätzlich wird die Bewegung der Partikel in Richtung der Punkte p_{id} und p_{gd} mit einer gleichförmig verteilten Zufallszahl versehen, um die Gefahr des Verharrens einzelner Partikel in lokalen Minima zu verhindern. Die Geschwindigkeit der Partikel wird durch die folgende Gleichung ausgedrückt [66]:

$$v_{id}^{(t+1)} = v_{id}^{(t)} + \Psi_p \cdot \mathcal{U}[0,1] \cdot (p_{id} - x_{id}^{(t)}) + \Psi_g \cdot \mathcal{U}[0,1] \cdot (p_{gd} - x_{id}^{(t)}) \quad (5.13)$$

Die Indizes i und d stehen dabei für die Partikelnummer und die Dimension des Suchraumes. Für die Aktualisierungsregel der Partikelpositionen gilt [66]:

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \quad (5.14)$$

Um zu vermeiden, dass Partikel um ein Minimum schwingen, wird die maximal mögliche Geschwindigkeit limitiert [66]:

$$|v_{id}| < V_{\max} \quad (5.15)$$

Als Erweiterung dieser ursprünglichen Version der PSO hat sich ein Trägheitsfaktor ω etabliert, um einen Einfluss auf die Beweglichkeit der Partikel zu bekommen [36]:

$$v_{id}^{(t+1)} = \omega \cdot v_{id}^{(t)} + \Psi_p \cdot \mathcal{U}[0,1] \cdot (p_{id} - x_{id}^{(t)}) + \Psi_g \cdot \mathcal{U}[0,1] \cdot (p_{gd} - x_{id}^{(t)}) \quad (5.16)$$

Zur Verbesserung der Sucheigenschaften kann die Trägheit ω im Verlauf der Optimierung angepasst werden. So kann am Anfang der Optimierung zunächst mit einer höheren Trägheit begonnen werden, um die globalen Sucheigenschaften zu verstärken. Mit steigender Anzahl der Iterationen kann die Trägheit anschließend schrittweise verringert werden, um die lokale Suche eines gefundenen Optimums zu verfeinern [129, 130].

5.4.2 Binäre Partikelschwarmoptimierung

Als Abwandlung der kontinuierlichen PSO wurde 1997 von J. Kennedy und R. Eberhart eine binäre Version mit der Bezeichnung Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) veröffentlicht [67]. Diese Variante wurde mit der Motivation entwickelt, diskrete Probleme aus dem Bereich des Scheduling und Routings zu lösen.

Jedes x_{id} kann demnach lediglich einen ganzzahligen Wert in $\{0,1\}$ annehmen. Diese Beschränkung der Partikelbewegung wird durch eine Sigmoid-Transformation dargestellt:

$$S(v_{id}) = \frac{1}{1 + e^{-v_{id}}} \quad \text{mit} \quad |v_{id}| < V_{\max} \quad (5.17)$$

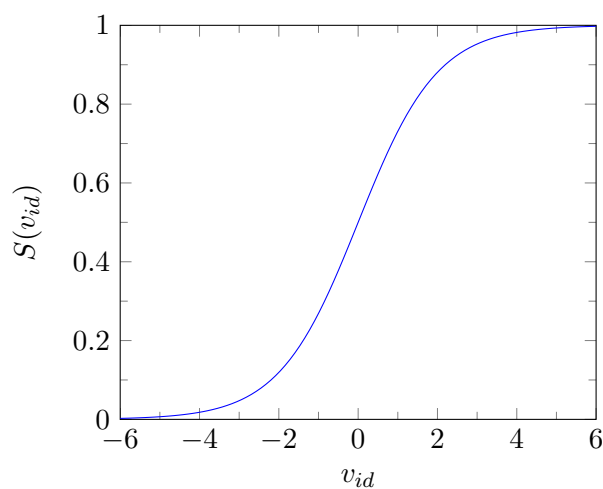


Abbildung 5.6 – Sigmoid-Transformation von der Bewegung v_{id} zum Wahrscheinlichkeitsschwellwert S .

Die Sigmoid-Transformation ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Anders als in (5.16) berechnet sich v_{id} bei der BPSO wie folgt [67]:

$$v_{id}^{(t+1)} = v_{id}^{(t)} + \Psi_p \cdot (p_{id} - x_{id}^{(t)}) + \Psi_g \cdot (p_{gd} - x_{id}^{(t)}) \quad (5.18)$$

Damit wurden sowohl die gleichverteilte Zufallszahl sowie der Trägheitsfaktor entfernt. Die stochastische Komponente des Algorithmus verlagert sich an dieser Stelle auf die Bestimmung der Partikelposition aus der aktuellen Geschwindigkeit [67]:

$$x_{id}^{(t+1)} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \mathcal{U}[0,1] < S(v_{id}^{(t+1)}) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.19)$$

Die Trägheitskomponente wird komplett entfernt, um einen Drift von v_{id} zum Wert 0 zu verhindern.

Der Unterschied der BPSO zur kontinuierlichen Urform aus [66] liegt vor allem in der abweichenden Interpretation der Partikelgeschwindigkeit v_{id} . Während bei der PSO die Variable v_{id} eine tatsächliche Partikelgeschwindigkeit innerhalb des Suchraumes repräsentiert, wird v_{id} in der BPSO mit Hilfe der Sigmoid-Transformation als Wahrscheinlichkeitsschwellwert S interpretiert. So besteht für einen bestimmten Wert x_{id} stets eine gewisse Restwahrscheinlichkeit, dass sich die Position noch einmal ändert [67]. Die Höhe dieser Restwahrscheinlichkeit kann durch den Parameter V_{\max} beeinflusst werden. Ein großer Wert für V_{\max} führt demnach zu einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit, dass x_{id} seine Position beibehält. Umgekehrt führt ein kleines V_{\max} zu einer höheren Änderungsrate.

5.4.3 Diskrete Partikelschwarmoptimierung

Eine diskrete Variante der PSO wurde 2007 von Veeramachaneni et al. veröffentlicht [139]. Im Gegensatz zum BPSO kann x_{id} in der vorgestellten Erweiterung ganzzahlige Werte im Definitionsbereich $\{1, 2, \dots, M_d\}$, $M_d \in \mathbb{N}$ annehmen. M_d entspricht damit der Anzahl von Diskretisierungsstufen innerhalb einer Dimension d . Die Sigmoid-Transformation aus (5.17) wird in der Veröffentlichung wie folgt modifiziert [139]:

$$S(v_{id}) = \frac{M_d}{1 + e^{-v_{id}}} \quad (5.20)$$

In Abbildung 5.7 ist links eine entsprechende Sigmoid-Funktion dargestellt. Die Bewegungsgleichung entspricht mit

$$v_{id}^{(t+1)} = \omega \cdot v_{id}^{(t)} + \Psi_p \cdot \mathcal{U}[0,1] \cdot (p_{id} - x_{id}^{(t)}) + \Psi_g \cdot \mathcal{U}[0,1] \cdot (p_{gd} - x_{id}^{(t)})$$

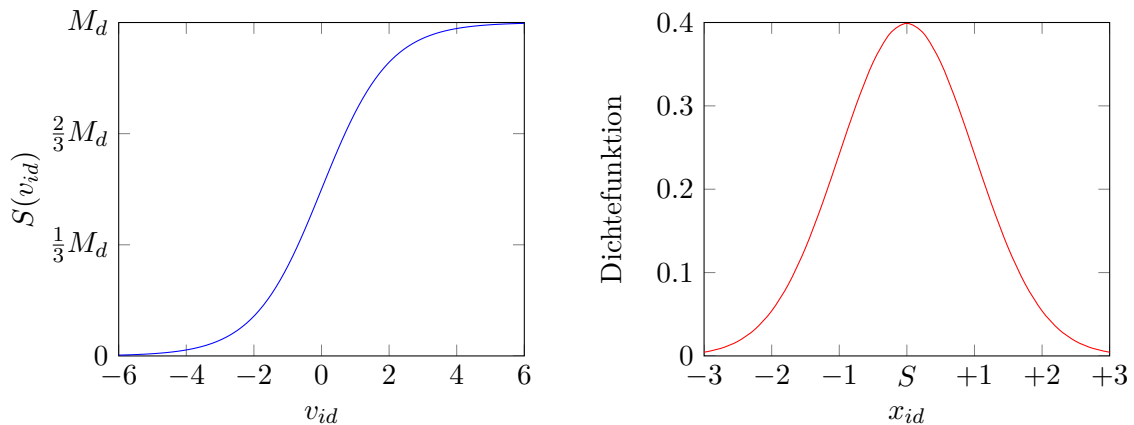


Abbildung 5.7 – Sigmoidtransformation für den Wahrscheinlichkeitsschwellwert $S(v_{id})$ gemäß (5.20) (links) und die Dichtefunktion der Standardnormalverteilung mit $\sigma^2 = \sigma_N M_d = 1$ (rechts).

unverändert der Form des kontinuierlichen PSO-Algorithmus aus (5.16).

Für die Berechnung der Position wird eine normalverteilte Zufallsvariable $\mathcal{N}(S(v_{id}), \sigma_N M_d)$ generiert und anschließend gerundet (vgl. Abbildung 5.7 rechts). Die Aktualisierungsregel lautet demnach wie folgt [139]:

$$x_{id}^{(t+1)} = \text{round} \left[\mathcal{N} \left(S \left(v_{id}^{(t+1)} \right), \sigma_N M_d \right) \right] \quad (5.21)$$

Untersuchungen haben im Rahmen dieser Arbeit jedoch gezeigt, dass das Konvergenzverhalten des Algorithmus zu wünschen übrig lässt. Zur Veranschaulichung dieses Sachverhaltes ist in Abbildung 5.8 ein beispielhafter Optimierungsverlauf dargestellt, in dem diskrete Werte im Definitionsbereich $\{0, 1, \dots, 6\}$ angenommen werden können. Der optimale Wert ist in diesem Beispiel die Position 0. Obwohl der Algorithmus bis zur 16. Iteration bereits mehrfach in diesem Bestpunkt angekommen ist, benötigt er danach 18 weitere Schritte, um in Iteration 34 wieder auf die Position 0 zurückzukehren. Dieses Verhalten erfüllt die Anforderungen an die nötige Effizienz und Konvergenzgeschwindigkeit für das zu optimierende Problem nicht. Letztlich ist die Ursache der veränderten Konvergenzeigenschaften auf die Interpretation der Bewegungsvariablen v_{id} hinsichtlich der Positionsbestimmung aus (5.21) zurückzuführen, die gänzlich von der ursprünglichen Form der kontinuierlichen PSO abweicht (vgl. Abschnitt 5.4.1).

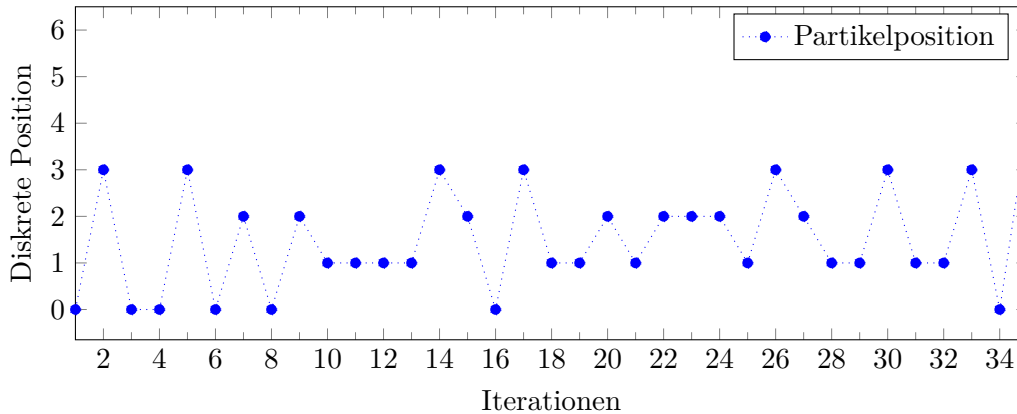


Abbildung 5.8 – Beispielhafter Optimierungsverlauf nach dem Algorithmus aus [139]. Der optimale Punkt dieses Beispiels ist die Position 0.

5.4.4 Modifikation der Diskreten Partikelschwarmoptimierung

Zur Verbesserung der Konvergenzeigenschaften des im vorhergegangenen Abschnitt beschriebenen Algorithmus [66] wird für die Optimierung in dieser Arbeit eine Modifikation der Positionsberechnung vorgenommen:

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^{(t)} + \text{Round} \left[\mathcal{N} \left(v_{id}^{(t+1)}, \sigma_N M_d \right) \right] \quad (5.22)$$

Diese Aktualisierungsregel basiert auf der kontinuierlichen Partikelschwarmoptimierung aus (5.14) und entspricht wieder einer reinen Positions-Bewegungs-Interpretation. Wie in Abschnitt 5.4.3 bereits erwähnt, steht M_d für die Anzahl von Diskretisierungsstufen innerhalb einer Dimension d . M_d kann demnach Werte im Definitionsbereich $\{1, 2, \dots, M_d\}$, $M_d \in \mathbb{N}$ annehmen. Als Modifikation ist eine Rundung und eine normalverteilte Zufallsvariable hinzugekommen. Die Integration der stochastischen Komponente stellt sicher, dass mit einer gewissen Restwahrscheinlichkeit auch die Umgebung eines bereits gefundenen Optimums abgesucht wird. Die Berechnung der Bewegung entspricht unverändert der kontinuierlichen Form aus (5.16):

$$v_{id}^{(t+1)} = \omega \cdot v_{id}^{(t)} + \Psi_p \cdot \mathcal{U}[0,1] \cdot (p_{id} - x_{id}^{(t)}) + \Psi_g \cdot \mathcal{U}[0,1] \cdot (p_{gd} - x_{id}^{(t)})$$

Zur Verbesserung der Sucheigenschaften kann optional die Trägheit ω im Verlauf einer Optimierung sukzessive von ω_{\max} auf ω_{\min} verringert werden (vgl. Abschnitt 5.4.1) [129, 130]:

$$\omega(i_{\text{iter}}) = \omega_{\min} + \frac{n_{\text{iter,max}} - i_{\text{iter}}}{n_{\text{iter,max}}} \cdot (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \quad (5.23)$$

Außerdem kann optional die Variable σ_N während des Optimierungsverlaufs verringert werden. Ein größeres σ_N erhöht anfangs die Wahrscheinlichkeit, mit der die Umgebung eines gefundenen Bestpunktes abgesucht wird. Gegen Ende sorgt ein kleineres σ_N für verbesserte Konvergenzeigenschaften. Es gilt:

$$\sigma_N(i_{\text{iter}}) = \sigma_{N,\min} + \frac{n_{\text{iter,max}} - i_{\text{iter}}}{n_{\text{iter,max}}} \cdot (\sigma_{N,\max} - \sigma_{N,\min}) \quad (5.24)$$

Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird dieser Algorithmus als Modified Discrete Particle Swarm Optimization (MDPSO) bezeichnet.

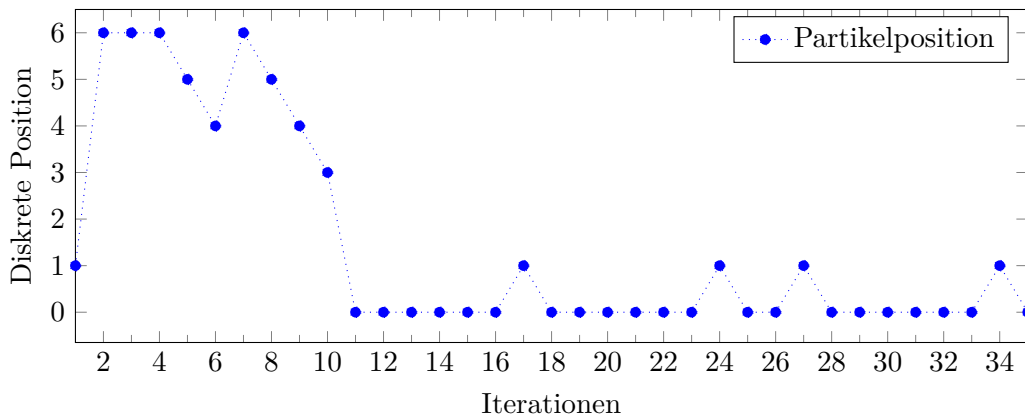


Abbildung 5.9 – Beispielhafter Optimierungsverlauf nach dem MSPDO-Algorithmus. Der optimale Punkt dieses Beispiels ist die Position 0.

Die verbesserten Eigenschaften hinsichtlich des Konvergenzverhaltens sind in Abbildung 5.9 anhand eines beispielhaften Optimierungsverlaufs dargestellt. Wie in Abschnitt 5.4.3 ist in diesem Beispiel der optimale Wert die Position 0. Nach einer anfänglichen Suche durch den Parameterraum findet der Algorithmus in Iteration 11 den Bestpunkt. Anschließend wird die Suche lediglich in der näheren Umgebung fortgesetzt. Im Vergleich zum Beispiel aus Abschnitt 5.4.3 kehrt der MDPSO nach Verlassen des Bestpunktes wieder zuverlässig auf die Position 0 zurück.

5.5 Schnittstelle zur Bordnetzsimulation

Die Modellierung des Bordnetzes erfolgt im Rahmen dieser Arbeit in der Beschreibungssprache Modelica [98]. Als dazugehöriges Simulations-Frontend kommt die Software Dymola [30] zum Einsatz. Für die Ausführung des Optimierungsalgorithmus, die Berechnung der Zielfunktion sowie die Überprüfung der Nebenbedingungen wird die Software Matlab [86] verwendet. Dieses Unterkapitel beschreibt die Wirkzusammenhänge der unterschiedlichen Vorgänge während eines Optimierungsvorgangs. Im ersten Abschnitt wird zunächst erläutert, wie die Erfüllung der Nebenbedingungen für eine bestimmte Bordnetzkonfiguration überprüft wird. Es folgt eine Betrachtung, wie die Auswertung der Nebenbedingungen möglichst effizient auf modernen Rechenarchitekturen erfolgen kann. Im dritten Abschnitt wird beschrieben, wie im Zuge der Optimierung automatisierte Modelländerungen zur Untersuchung anderer Topologien vorgenommen werden. Abschließend wird der vollständige Optimierungsablauf veranschaulicht.

5.5.1 Simulative Untersuchung der Nebenbedingungen

Während des Optimierungsvorgangs muss für jede vom Algorithmus vorgeschlagene Bordnetzkonfiguration \mathbf{x} jeweils eine Simulation des vorgegebenen Belastungsszenarios durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 5.2.3). Sofern mit dem Simulationstool Dymola eine Kompilierung des Bordnetzmodells durchgeführt wurde, liegt eine sogenannte *Dymosim*-Datei als ausführbares Programm vor, das vollständig autonom ausgeführt werden kann. Alle Startwerte und Parameter für die ausführbare Simulationsdatei sind in einer separaten Datei *dsin.mat* abgelegt. Durch eine gezielte Änderung entsprechender Werte in dieser Datei ist es möglich, vom Optimierungsalgorithmus ausgegebene Parameter an die Simulation zu übergeben. Anschließend kann die ausführbare *Dymosim*-Datei über einen Kommandozeilenaufruf direkt aus Matlab gestartet werden. Sobald eine Simulation mit den Eingangsparametern aus *dsin.mat* abgeschlossen ist, werden die Simulationsergebnisse in der Ausgabedatei *dsres.mat* abgespeichert. Diese Datei kann wiederum von Matlab eingelesen werden, um für die Optimierung relevante Nebenbedingungen zu überprüfen (vgl. Abschnitt 5.2.3).

5.5.2 Parallelisierung

Um die rechenintensive Auswertung der Nebenbedingungen möglichst effizient durchzuführen, sollten nach Möglichkeit alle Prozessorkerne einer modernen PC-Architektur gleichzeitig ausgenutzt werden. Die Partikelschwarmoptimierung liefert hierfür ideale Voraussetzungen, denn alle Partikel einer Iteration sind voneinander unabhängig. Für einen einzelnen Partikel kann damit die Berechnung der Zielfunktion sowie die simulative Auswertung der Nebenbedingung losgelöst von allen anderen Partikeln erfolgen. Bezogen auf das vorliegende Optimierungsproblem bedeutet dies, dass die Dymola-Simulationen für alle Partikel einer Iteration auf die zur Verfügung stehenden Prozessorkerne verteilt werden können. Daraus ergibt sich die Empfehlung, dass für eine bestmögliche Nutzung der Rechenleistung die Anzahl der Partikel stets ein ganzzahliges Vielfaches der zur Verfügung stehenden CPU-Kerne sein sollte. In dieser Arbeit steht eine Simulations-Workstation mit 16 physikalischen Rechenkernen zur Verfügung. Die verwendeten Prozessoren verfügen zusätzlich über eine sogenannte Hyperthreading-Technologie (HT), die jeden Prozessorkern in zwei virtuelle Prozessorkerne unterteilt. Dadurch ist es möglich, die Rechenleistung der einzelnen Kerne effizienter zu nutzen [79]. Insgesamt stehen somit 32 virtuelle Rechenkern zur Verfügung.

5.5.3 Automatisierte Modelländerung

Wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, sollen für die Optimierung des Bordnetzes verschiedene Spannungs-Stabilisierungsmaßnahmen an unterschiedliche Verbraucherklammern angeschlossen werden können. Durch das Hinzufügen oder Entfernen von Stabilisierungsmaßnahmen ändert sich allerdings das Gleichungssystem des gesamten Modells. Eine veränderte Topologie muss dementsprechend neu kompiliert werden. Aus numerischen Gründen verbietet es sich, an allen zu stabilisierenden Stellen im Modell Komponenten anzubinden und entsprechende Parameter bei Bedarf auf 0 zu setzen. Dies kann zu unerlaubten Divisionen führen, was einen Simulationsabbruch verursachen würde. Gleichzeitig ist es hinsichtlich der Optimierungslaufzeit sinnvoll, so wenig Komponenten wie möglich zu simulieren.

Um in der Lage zu sein, während des Optimierungsverlaufs unterschiedliche Spannungs-Stabilisierungsmaßnahmen ein- bzw. auszubauen, wurde eine automatisierte Modelländerung implementiert. Dieser Automatismus analysiert nach jedem Iterationsschritt, ob der vom Optimierungsalgorithmus ausgegebene Parametersatz eine Veränderung des Modells erfordert. Auf Basis dieser Analyse wird im Bedarfsfall die Modelica-Datei editiert, in der das Simulationsmodell hinterlegt ist. In dieser Modelica-Datei werden die vom Optimierungsalgorithmus vorgegebenen Spannungs-Stabilisierungsmechanismen an die entsprechenden Bordnetzverbraucher angebunden. Nachdem die automatisierte Editierung abgeschlossen ist, wird die Datei

mit dem modifizierten Simulationsmodell über ein Skript in Dymola geladen und anschließend kompiliert.

5.5.4 Optimierungsablauf

Die in den vorhergegangenen Abschnitten beschriebenen Wirkzusammenhänge eines Optimierungsverlaufs sind zur Veranschaulichung in Abbildung 5.10 dargestellt.

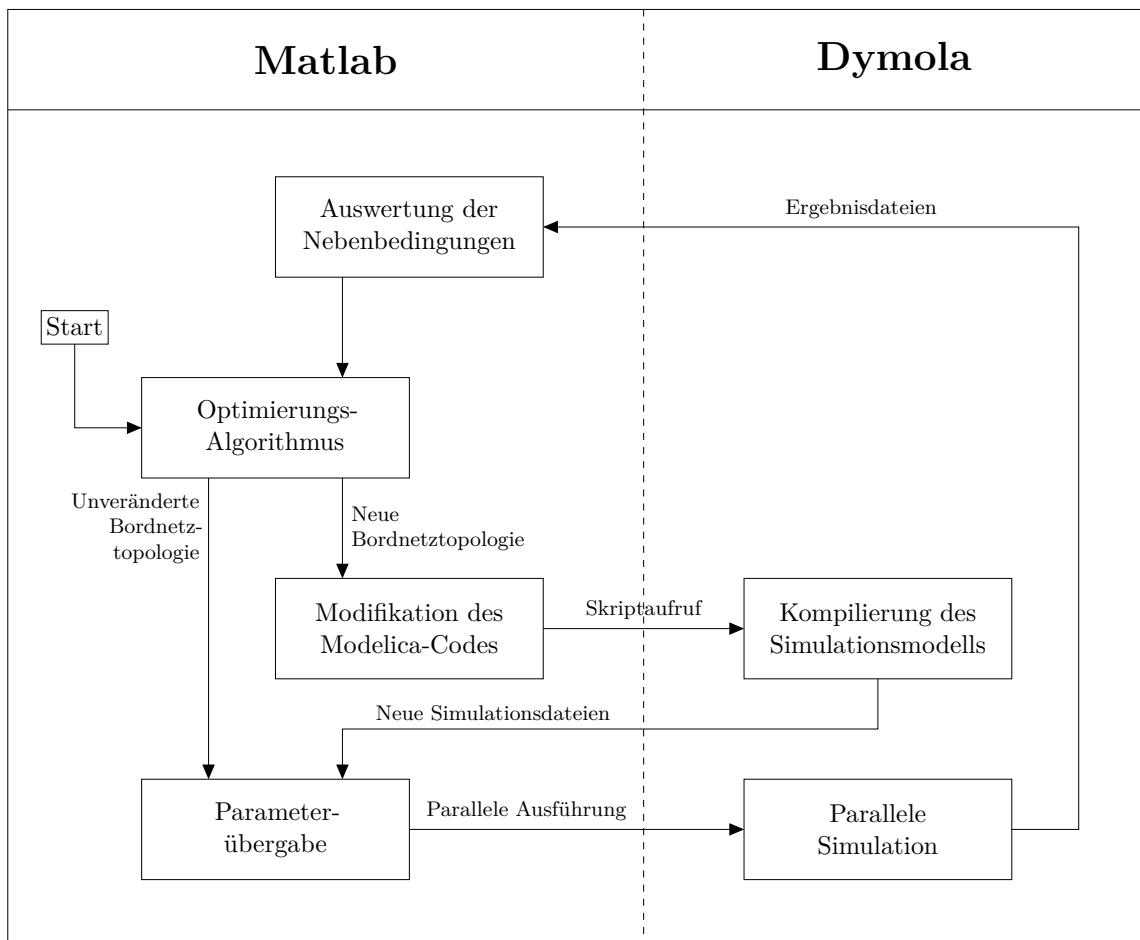


Abbildung 5.10 – Schema eines Optimierungsverlaufs. Der in Matlab implementierte Optimierungsalgorithmus liefert in jeder Iteration neue Parametersätze für alle Partikel. Falls ein Parametersatz die Veränderung der Bordnetztopologie erfordert, wird der Modelica-Code automatisch modifiziert. Die modifizierte Datei wird anschließend in Dymola kompiliert. Für Partikel, die keine Veränderung der Topologie erfordern, kann dieser Schritt entfallen. Anschließend werden die Parametersätze zur Simulation an die entsprechenden Simulationsdateien übergeben. Die Ausführung erfolgt dabei parallel auf allen zur Verfügung stehenden CPU-Kernen. Nach Abschluss der Simulationvorgänge wird überprüft, welche Partikel die vorgegebenen Nebenbedingungen erfüllen.

5.6 Konfiguration des Algorithmus

Aufgrund des großen Suchraums und der rechenintensiven Auswertung von Nebenbedingungen ist die Konfiguration des Algorithmus von entscheidender Bedeutung für die Performanz. Dieses Unterkapitel beleuchtet den Einfluss der zur Verfügung stehenden Parameter auf die Qualität des Optimierungsergebnisses und die dafür benötigte Zeit.

Im ersten Abschnitt wird zunächst definiert, wie die Performanz der Optimierung in dieser Arbeit bewertet wird. Darauf folgend wird im zweiten Abschnitt die Konfiguration der Algorithmusparameter vorgenommen. Der dritte Abschnitt beschäftigt sich mit der Fragestellung, welches Verhältnis aus der Anzahl von Optimierungsdurchläufen und der Anzahl der Iterationen pro Durchlauf schnellstmöglich zu einem Ergebnis führt. Weiterhin wird in diesem Abschnitt betrachtet, wie sich die Variation der Partikelzahl auf die Optimierungszeit auswirkt.

5.6.1 Bewertung der Performanz

Für die Bewertung der Performanz wird an dieser Stelle das globale Minimum Z^* als bekannt angenommen. Es entspricht für eine Spannungsanforderung U_{\min} jeweils dem Bestwert aller im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Optimierungsdurchläufe (Sets). Zur Bewertung der Ergebnisqualität eines einzelnen Sets wird zunächst eine relative Güte r definiert:

$$r = \frac{Z^*}{Z_{i_{\text{set}}}} \quad (5.25)$$

Der Wert $r = 1$ bedeutet, dass am Ende eines Durchlaufs das Optimum gefunden wurde. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit werden außerdem Ergebnisse mit $r \geq 0,95$ betrachtet, da eine Abweichung von 5% aufgrund von Modellierungsungenauigkeiten bereits ein gutes Resultat darstellt. Basierend auf (5.25) wird außerdem die Wahrscheinlichkeit definiert, mit der ein Ergebnis der Güte r nach einem Set erzielt werden kann:

$$p_r = \frac{n_r}{n_{\text{set}}} \quad (5.26)$$

Dabei ist n_r die Anzahl der Durchläufe, in denen ein Ergebnis mit der Güte r erzielt wurde. Die Variable n_{set} steht für die Anzahl an hintereinanderfolgenden Optimierungsdurchläufen. Die Wahrscheinlichkeit p_r stellt insgesamt den wichtigsten Wert für die Konfiguration des Algorithmus dar, denn er hat den größten Einfluss auf die resultierende Optimierungszeit.

Als weitere Größe wird die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl.: root mean square error, RMSE) für jeden Optimierungsdurchlauf berechnet.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{set}}} \sum_{i_{\text{set}}=1}^{n_{\text{set}}} (Z_{i_{\text{set}}} - Z^*)^2} \quad (5.27)$$

Dieser Wert lässt jedoch lediglich qualitative Rückschlüsse auf das Konvergenzverhalten zu.

5.6.2 Parameterkonfiguration

Für die Konfiguration der Parameter wurde zunächst untersucht, wie viele Iterationen n_{iter} und wie viele Durchläufe n_{set} benötigt werden, um qualitative Aussagen über die Performanz treffen zu können. Basierend auf einigen Tests konnte n_{iter} auf 50 festgelegt werden. Nach dieser Iterationsanzahl stellte sich bei unterschiedlichsten Parameterkonfigurationen bereits eine erhebliche Abflachung des Konvergenzverhaltens ein, was damit bereits qualitative Aussagen über die Ergebnisqualität zulässt. Hinsichtlich n_{set} stellte sich durch weitere Untersuchungen heraus, dass sich der RMSE-Wert nach spätestens 30 Durchläufen nicht mehr signifikant ändert. Die Werte $n_{\text{iter}} = 50$ und $n_{\text{set}} = 30$ werden damit zum Aufbau der Statistik in diesem Abschnitt für jeden Testlauf einer Algorithmuskonfiguration herangezogen. Die Anzahl der Partikel wird auf 32 festgelegt, um die Rechenleistung der zur Verfügung stehenden Simulations-Workstation bestmöglich auszunutzen (vgl. Abschnitt 5.5.2).

Als Spannungsanforderung U_{min} werden in diesem Kapitel 11,5 V gewählt. Dieser vergleichsweise hohe Wert für die minimal auftretende Bordnetzspannung bei Belastung durch das Referenzszenario stellt eine große Herausforderung für den Algorithmus dar, da für diese Nebenbedingung viele lokale Minima zu erwarten sind.

In Tabelle 5.3 sind die Algorithmusparameter der MDPSO (vgl. Abschnitt 5.4.4) mit entsprechenden Wertebereichen aufgelistet. Die Parameter Ψ_p und Ψ_g werden jeweils auf das Intervall $[0,75; 2,25]$ beschränkt. In Anlehnung an die Veröffentlichung von Clerc [27] wird außerdem die Summe $\Psi_p + \Psi_g$ auf 3 festgelegt. Damit sind Konfigurationen mit unterschiedlich starken Gewichtungen auf den globalen oder individuellen Bestwert möglich.

Parameter	Wertebereich	Bemerkung
Ψ_p	0,75 . . . 2,25	Gewichtung des individuellen Bestwertes
Ψ_g	0,75 . . . 2,25	Gewichtung des globalen Bestwertes
ω	0,2 . . . 0,6	Variation des Trägheitsfaktors
σ_N	0,05 . . . 0,4	Variation der Wahrscheinlichkeitsverteilung

Tabelle 5.3 – Variablen und Wertebereiche zur Konfiguration des MDPSO-Algorithmus.

Die Variable σ_N wird auf das Intervall $[0,05;0,4]$ beschränkt. Mit der unteren Grenze wird auf der einen Seite gewährleistet, dass mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit noch eine Positionsänderung in bereits konvergierten Dimensionen erfolgen kann. Auf der anderen Seite dient die obere Limitierung dazu, dass bei einer Aktualisierung der Partikelposition noch eine ausreichende Abhängigkeit von der vorherigen Position durch die Wahrscheinlichkeitsfunktion gewährleistet wird.

Der letzte konfigurierbare Wert ist die Partikelträgheit ω . Nach unten wird ω auf 0,2 limitiert, um nicht allzu schnell in lokalen Minima stecken zu bleiben. Die obere Limitierung auf $\omega = 0,6$ sorgt dafür, dass Partikel nicht zu weit über ein Minimum hinauslaufen und noch zufriedenstellende Konvergenzeigenschaften vorhanden sind.

Aufgrund des hohen Zeitaufwandes ist es an dieser Stelle nicht möglich, alle denkbaren Parameterkombinationen zu analysieren. Aus diesem Grund werden zunächst die Gewichtungsfaktoren Ψ_p und Ψ_g variiert, um die grundlegenden Sucheigenschaften zu konfigurieren. Anschließend erfolgt auf Basis der besten Gewichtungskonfiguration die Analyse anderer Wertebereiche für ω und σ_N .

Variation der Gewichtungsfaktoren

Die Variation von Ψ_p und Ψ_g erfolgt im Rahmen der jeweils zugewiesenen Wertebereiche aus Tabelle 5.3 in Schritten von 0,25. Wie oben beschrieben, wird die Summe $\Psi_p + \Psi_g$ auf 3 festgelegt. Die Variablen ω und σ_N verringern sich gemäß (5.23) und (5.24) während eines Durchlaufs. Beide Wertebereiche wurden vorher festgelegt und werden für die Analyse unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren nicht verändert. In Tabelle 5.4 sind für die unterschiedlichen Kombinationen von Ψ_p und Ψ_g die Anzahl der Durchläufe aufgelistet, in denen das Ergebnis

	Einstellparameter				Ergebnisse		
	Ψ_p	Ψ_g	ω	σ_N	0% Abw.	5% Abw.	<i>RMSE</i>
1.1	0,75	2,25	0,6...0,2	0,35...0,2	4	14	4,7
1.2	1,0	2,0	0,6...0,2	0,35...0,2	8	14	4,7
1.3	1,25	1,75	0,6...0,2	0,35...0,2	9	20	4,5
1.4	1,5	1,5	0,6...0,2	0,35...0,2	7	14	4,1
1.5	1,75	1,25	0,6...0,2	0,35...0,2	5	13	5,1
1.6	2,0	1,0	0,6...0,2	0,35...0,2	8	14	5,0
1.7	2,25	0,75	0,6...0,2	0,35...0,2	6	12	5,2

Tabelle 5.4 – Ergebnisübersicht für die Variation der Gewichtungsfaktoren Ψ_p und Ψ_g . Es wurden jeweils 30 Durchläufe mit jeweils 50 Iterationen für $U_{\min} = 11,5 V$. Insgesamt wurden 32 Partikel verwendet.

0% (Güte $r = 1$) beziehungsweise 5% (Güte $r \geq 0,95$) vom Optimum abweicht. Zusätzlich ist der RMSE-Wert angegeben.

Basierend auf Tabelle 5.4 sind in Abbildung 5.11 die Wahrscheinlichkeiten p_r gemäß (5.26) und der jeweilige RMSE-Wert für alle Kombinationen der Gewichtungsfaktoren dargestellt. Die besten Ergebnisse wurden mit $\Psi_p = 1,25$ und $\Psi_g = 1,75$ erzielt. Damit orientieren sich die Partikel während der Optimierung leicht zum globalen Bestwert. Die Wahrscheinlichkeit, dass nach einem Durchlauf mit 50 Iterationen ein Ergebnis mit der Güte $r = 1$ gefunden wird, beträgt dort 0,3. Für ein Ergebnis mit der Güte $r \geq 0,95$ liegt die Wahrscheinlichkeit bei 0,67.

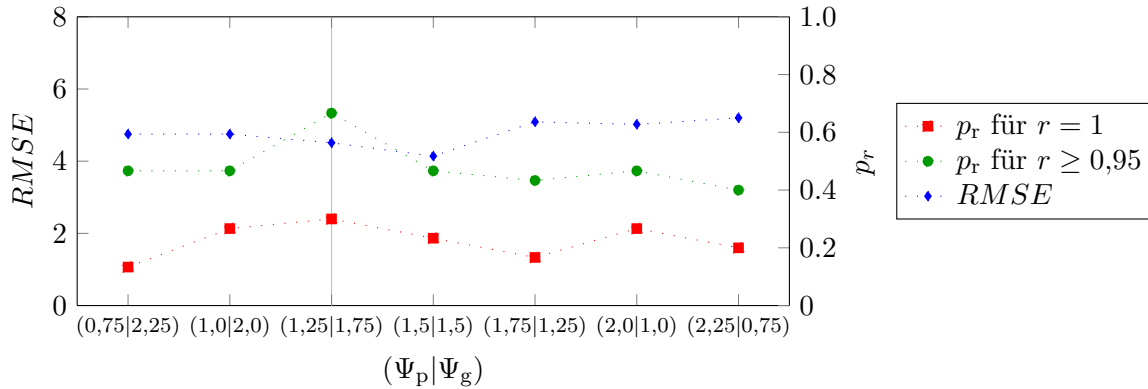


Abbildung 5.11 – Grafische Darstellung der Wahrscheinlichkeit p_r für $r = 1$ und $r \geq 0,95$ sowie des RMSE-Werts in Abhängigkeit verschiedener Kombinationen der Gewichtungsfaktoren Ψ_p und Ψ_g .

Variation der Partikelträgheit

Nun werden mit den Gewichtungsfaktoren $\Psi_p = 1,25$ und $\Psi_g = 1,75$ die Wertebereiche für die Trägheit ω variiert. Während eines Durchlaufs wird die Trägheit gemäß (5.23) schrittweise von dem jeweiligen Anfangswert auf den Endwert verringert. Die drei betrachteten Wertebereiche sind mit den jeweiligen Ergebnissen in Tabelle 5.5 aufgelistet.

	Einstellparameter				Ergebnisse		
	Ψ_p	Ψ_g	ω	σ_N	0% Abw.	5% Abw.	RMSE
2.1	1,25	1,75	0,4 ... 0,2	0,35 ... 0,2	10	17	3,7
2.2	1,25	1,75	0,6 ... 0,2	0,35 ... 0,2	9	20	4,5
2.3	1,25	1,75	0,6 ... 0,4	0,35 ... 0,2	6	18	5,0

Tabelle 5.5 – Ergebnisübersicht für verschiedene Wertebereiche der Partikelträgheit ω .

Analog zur Vorgehensweise bei der Variation der Gewichtungsfaktoren sind in Abbildung 5.12 die Wahrscheinlichkeiten für ein Ergebnis mit der Güte $r = 1$ und $r \geq 0,95$ sowie der zugehörige RMSE-Wert abgebildet. Das schlechteste Ergebnis liefert die dritte Konfiguration. Für die erste

Konfiguration ist die Wahrscheinlichkeit für ein Ergebnis mit $r = 1$ zwar etwas höher und der RMSE-Wert etwas geringer, jedoch fällt die Wahl aufgrund der höheren Wahrscheinlichkeit für ein Ergebnis mit $r \geq 0,95$ auf die zweite Konfiguration. Der Wertebereich für ω entspricht damit unverändert dem vorhergehend verwendeten Bereich bei der Variation der Gewichtungsfaktoren. Die Wahrscheinlichkeitswerte betragen unverändert $r_1 = 0,3$ und $r_{0,95} = 0,67$.

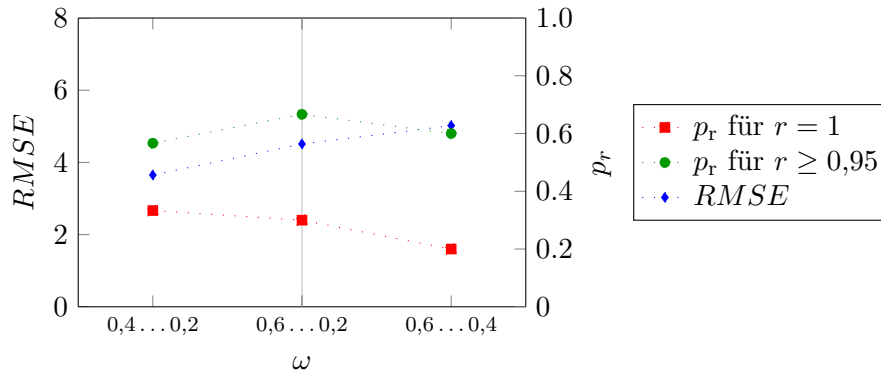


Abbildung 5.12 – Grafische Darstellung der Wahrscheinlichkeit p_r für $r = 1$ und $r \geq 0,95$ sowie des RMSE-Werts in Abhängigkeit des Wertebereichs für die Partikelträgheit ω .

Variation der Wahrscheinlichkeitsverteilung

Abschließend werden die Wertebereiche für die Variable σ_N variiert. Diese verringern sich analog zum Trägheitsfaktor ω innerhalb eines Durchlaufs mit jeder Iteration gemäß (5.24). In Tabelle 5.6 sind die Ergebnisse für vier verschiedene Wertebereiche aufgelistet.

	Einstellparameter				Ergebnisse		
	Ψ_p	Ψ_g	ω	σ_N	0% Abw.	5% Abw.	RMSE
3.1	1,25	1,75	0,6...0,2	0,2...0,05	5	18	3,6
3.2	1,25	1,75	0,6...0,2	0,25...0,1	14	25	2,7
3.3	1,25	1,75	0,6...0,2	0,35...0,2	9	20	4,5
3.4	1,25	1,75	0,6...0,2	0,4...0,25	2	8	5,2

Tabelle 5.6 – Ergebnisübersicht für verschiedene Wertebereiche der Variable σ_N .

Analog zu den vorhergehenden Schritten sind auf Basis dieser Ergebnisse in Abbildung 5.13 die Wahrscheinlichkeiten p_r für $r = 1$ und $r \geq 0,95$ sowie der jeweilige RMSE-Wert dargestellt. Im Vergleich zu den bisher erzielten Werten kann mit der zweiten Konfiguration eine Steigerung der Wahrscheinlichkeitswerte auf $r_1 = 0,47$ und $r_{0,95} = 0,83$ sowie der geringste RMSE-Wert erzielt werden. Die Einstellparameter aus Zeile 3.2 in Tabelle 5.6 dienen damit als Grundlage für die weitere Vorgehensweise.

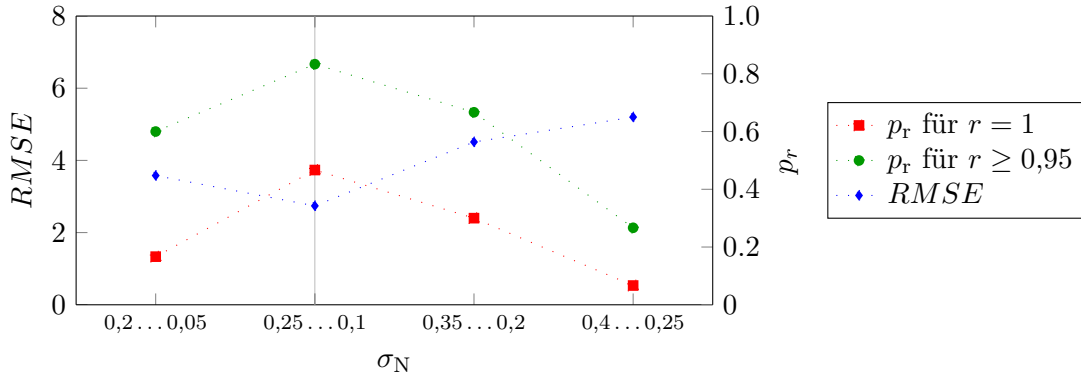


Abbildung 5.13 – Grafische Darstellung der Wahrscheinlichkeit p_r für $r = 1$ und $r \geq 0,95$ sowie des RMSE-Werts in Abhängigkeit des Wertebereichs der Variablen σ_N .

5.6.3 Laufzeitanalyse

Die Laufzeit einer Optimierung wird durch die Anzahl der Partikel, die Anzahl der Durchläufe (n_{set}) und die Anzahl der Iterationen pro Durchlauf (n_{iter}) beeinflusst. Das Ziel dieses Abschnitts ist es, eine effiziente Kombination dieser drei Größen zu finden. Als Randbedingung wird dabei definiert, dass das globale Optimum (Güte $r = 1$) bzw. ein Ergebnis mit 5% Abweichung (Güte $r \geq 0,95$) mit einer Wahrscheinlichkeit von $p_w = 0,999$ aufgefunden werden soll.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Optimierungsergebnis der Güte r gefunden werden kann, hängt von der Anzahl der Durchläufe ab und ändert sich innerhalb eines Durchlaufs in Abhängigkeit der absolvierten Iterationsschritte i_{iter} . Dies kann durch den folgenden Ausdruck beschrieben werden [80]:

$$p_w(i_{\text{iter}}, n_{\text{set}}, r) = 1 - (1 - p_r(i_{\text{iter}}))^{n_{\text{set}}, r} \quad (5.28)$$

Mit $p_w = 0,999$ kann (5.28) nach der Anzahl der Durchläufe aufgelöst werden, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9% zur Erzielung eines Ergebnisses mit der Güte r benötigt werden:

$$n_{\text{set}, r}(i_{\text{iter}}) = \left\lceil \frac{\log(1 - 0,999)}{\log(1 - p_r(i_{\text{iter}}))} \right\rceil \quad (5.29)$$

Um eine erste Diskussionsgrundlage für eine effiziente Kombination von (n_{set}) und (n_{iter}) zu schaffen, wurde ein umfangreicher Testsatz mit 30 Durchläufen und 125 Iterationen pro Durchlauf angefertigt. Für diese erste Analyse wurden die Variablen ω und σ_N zunächst auf die festen Werte 0,4 und 0,175 gesetzt, da der beobachtete Bereich von 125 Iterationen sehr umfangreich ist. Die gewählten Zahlenwerte entsprechen jeweils der Mitte der besten Wertebereiche aus Abschnitt 5.6.2.

Auf Grundlage dieses Testsatzes sind in Abbildung 5.14 die Wahrscheinlichkeit p_r und das anhand von (5.29) errechnete $n_{\text{set},r}$ in Abhängigkeit vom Iterationsschritt i_{iter} aufgetragen.

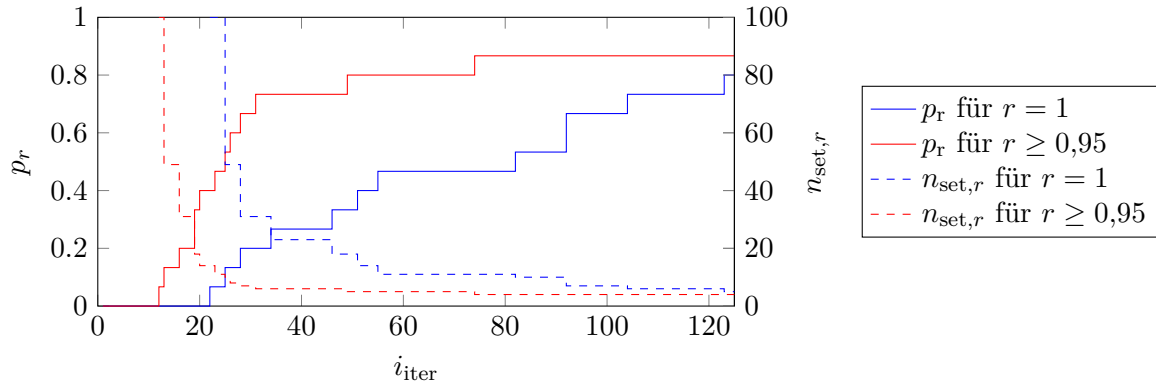


Abbildung 5.14 – Verlauf der Wahrscheinlichkeit p_r , mit der ein Ergebnis der Güte $r = 1$ bzw. $r \geq 0,95$ erzielt werden kann. Im Diagramm ist zusätzlich die Anzahl der Durchläufe $n_{\text{set},r}$ dargestellt, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9% zur Erzielung entsprechender Ergebnisse führt.

Mit einer mittleren Simulationszeit t_{sim} pro Iterationsschritt kann die benötigte Simulationszeit t_r für die Erzielung eines Ergebnisses mit der Güte r in Abhängigkeit der Anzahl von Iterationsschritten pro Durchlauf n_{iter} wie folgt berechnet werden:

$$t_r(n_{\text{iter}}) = n_{\text{iter}} \cdot n_{\text{set},r}(n_{\text{iter}}) \cdot t_{\text{sim}} \quad (5.30)$$

Auf der vorhandenen Simulations-Workstation beträgt die mittlere Simulationszeit t_{sim} pro Iterationsschritt bei Vollauslastung 57,9s. Damit kann gemäß der berechneten Werte für $n_{\text{set},r}$ aus Abbildung 5.14 für jedes $n_{\text{iter}} = i_{\text{iter}}$ die Simulationszeit berechnet werden, die zur Erzielung eines Ergebnisses mit der Güte $r = 1$ bzw. $r \geq 0,95$ benötigt wird. Die berechneten Verläufe für $t_r(n_{\text{iter}})$ sind in Abbildung 5.30 dargestellt. Aus der Grafik kann entnommen werden, dass die

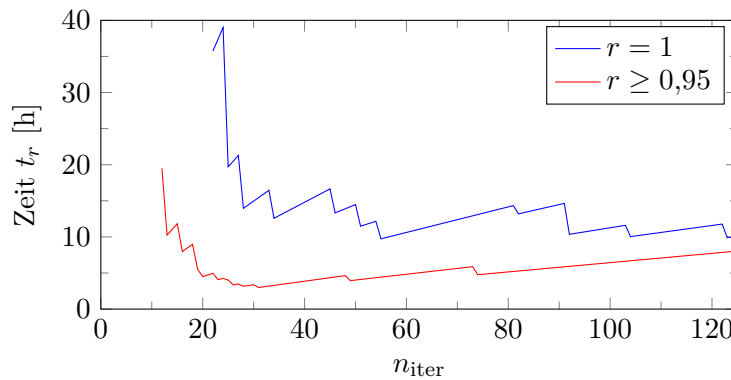


Abbildung 5.15 – Benötigte der Simulationszeit für ein Ergebnis der Güte $r = 1$ bzw. $r \geq 0,95$ in Abhängigkeit der Anzahl von Iterationsschritten pro Durchlauf gemäß (5.30).

ideale Anzahl von Iterationsschritten n_{iter} für ein Ergebnis der Güte $r = 1$ im Bereich zwischen 50 und 65 Iterationen zu finden ist. Für ein Ergebnis der Güte $r \geq 0,95$ liegt der ideale Wert im Bereich zwischen 25 und 40 Iterationen.

Auf Basis dieser Voruntersuchung wurden im Anschluss zwei kleinere Testsätze mit 65 Iterationen (Güte $r = 1$) bzw. 40 Iterationen (Güte $r \geq 0,95$) angefertigt. Für diese Testsätze wurde nun die Algorithmuskonfiguration aus Abschnitt 5.6.2 verwendet, in der ω und σ_N variabel gestaltet sind. In Abbildung 5.16 ist das Resultat mit 65 Iterationen für $r = 1$ abgebildet. Wie der rechten Grafik entnommen werden kann, beträgt die schnellstmögliche Optimierungszeit rund 11 Stunden bei 43 Iterationen pro Durchlauf. Der dazugehörige Wert für die Anzahl der Durchläufe beträgt 16.

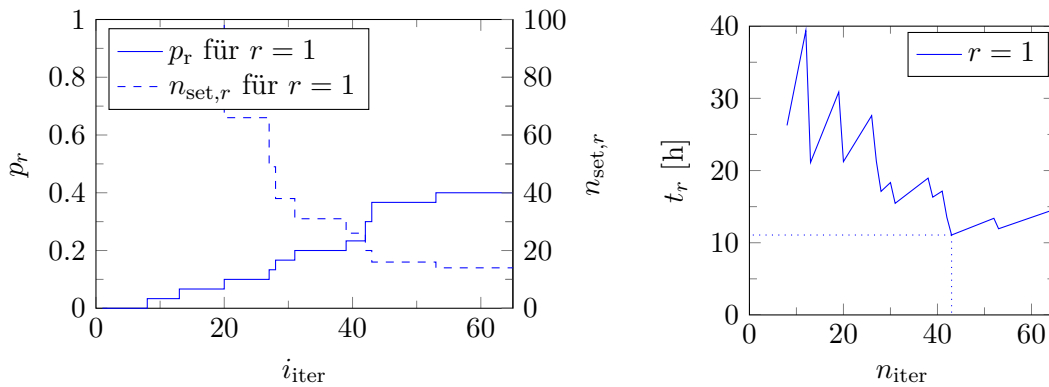


Abbildung 5.16 – Resultat der Laufzeitanalyse mit der Algorithmuskonfiguration aus Abschnitt 5.6.2. Links: p_r und $n_{\text{set},r}$ für $r = 1$ in Abhängigkeit von i_{iter} . Rechts: Benötigte Simulationszeit für ein Ergebnis der Güte $r = 1$ in Abhängigkeit der Anzahl von Iterationsschritten pro Durchlauf. Für beide Grafiken beträgt $p_w = 0,999$.

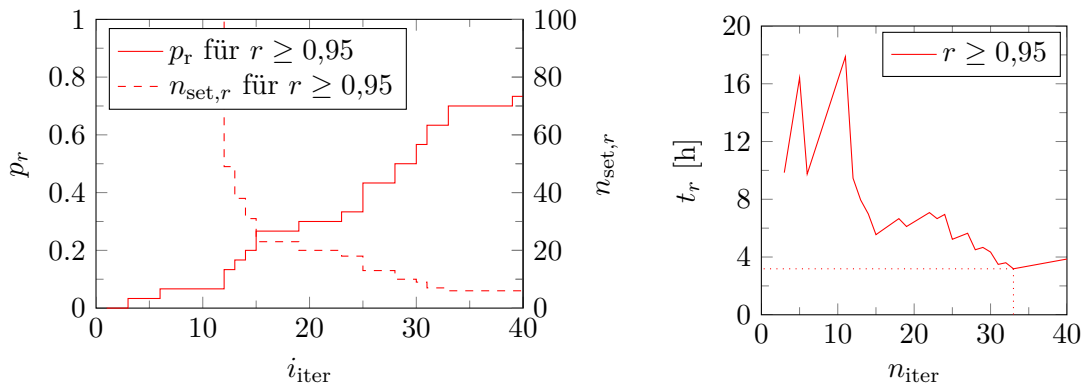


Abbildung 5.17 – Resultat der Laufzeitanalyse mit der Algorithmuskonfiguration aus Abschnitt 5.6.2. Links: p_r und $n_{\text{set},r}$ für $r \geq 0,95$ in Abhängigkeit von i_{iter} . Rechts: Benötigte Simulationszeit für ein Ergebnis der Güte $r \geq 0,95$ in Abhängigkeit der Anzahl von Iterationsschritten pro Durchlauf. Für beide Grafiken beträgt $p_w = 0,999$.

Analog zur vorhergehenden Darstellung ist das Resultat mit 40 Iterationen für $r \geq 0,95$ in Abbildung 5.17 dargestellt. Die schnellstmögliche Optimierungszeit von rund 3 Stunden und 15 Minuten lässt sich für ein Ergebnis dieser Güte mit 33 Iterationen und 6 Durchläufen erzielen.

Es wurde abschließend untersucht, ob sich eine Erhöhung oder Reduktion der Partikelanzahl auf 48 bzw. 16 positiv auf die Optimierungszeit auswirkt. Beide Versuche führten jedoch zu längeren Optimierungszeiten, weshalb eine Partikelanzahl von 32 für das weitere Vorgehen beibehalten wurde.

5.7 Optimierungsergebnisse

Auf Basis der im vorhergehenden Unterkapitel erarbeiteten Konfiguration der MDPSO wurden im Anschluss exemplarische Optimierungen für verschiedene Mindestspannungen U_{\min} im Bereich 10,0 V bis 11,5 V in Schritten von 0,25 V durchgeführt. Als Belastungsszenario diente dazu – wie in den bisherigen Untersuchungen – ein Ausweichmanöver bei niedriger Geschwindigkeit, das sich durch eine Überlagerung der Verbraucheraktivitäten von EPS, DSC und HSR auszeichnet.

Bei der Berechnung der Zielfunktion Z wurden im Rahmen der Optimierung einige Vereinfachungen vorgenommen. So wurde bei der Berechnung der Masse eines DSK-Moduls das Gewicht der Aufbau- und Verbindungstechnik vernachlässigt. Die Masseberechnung für DSK-Module basiert daher lediglich auf dem Gewicht der einzelnen Kondensatoren gemäß der Tabellen 5.1 und 5.2. Für die Berechnung der Masse von passiven Spannungsstabilisierungen (PSSMs) wurde außerdem das Gewicht der Elektronik zur Vorladung beim Fahrzeugstart bzw. Trennung vom Bordnetz im Fahrzeugstillstand vernachlässigt. Als Gewicht für den DC/DC-Steller der aktiven Spannungsstabilisierung (ASSM) wurden 200 g angenommen.

In Abbildung 5.18 sind die Ergebnisse der Zielfunktion Z in Abhängigkeit der vorgegebenen Mindestspannung U_{\min} dargestellt. Für jedes U_{\min} entspricht der Zielfunktionswert Z dem Gewicht der Stabilisierungsmaßnahmen, die zur Erzielung der Spannungsanforderung in das Bordnetz integriert werden müssen. Im Bereich von 10,0 V bis 10,75 V für U_{\min} verwendet die Optimierung eine passive Spannungsstabilisierung (PSSM) an den Klemmen der EPS (siehe Abbildung 5.19). Für $U_{\min} = 10,0$ V und $U_{\min} = 10,25$ V wird jeweils ein 8,33 F DSK-Modul benötigt, um die Spannungsanforderungen einhalten zu können. Die Leitungsquerschnitte (LQs) entsprechen für diese beiden Werte von U_{\min} unverändert ihrem jeweiligen Ausgangswert. Bei $U_{\min} = 10,5$ V wird die Masseverbindung des EPS (Leitung L7) um einen diskreten Querschnittswert von 6 mm^2 auf 10 mm^2 erhöht. Für $U_{\min} = 10,75$ V beträgt der Leitungsquerschnitt von L7 ebenfalls 10 mm^2 . Zusätzlich wird ein größeres DSK-Modul mit 16,67 F benötigt.

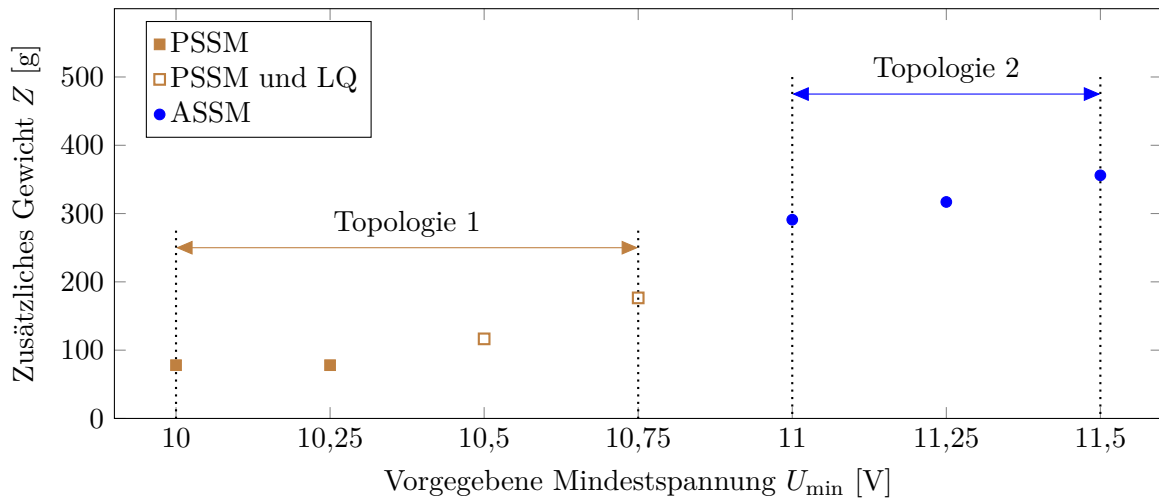


Abbildung 5.18 – Optimierungsergebnisse für unterschiedliche Mindestspannungen, die während des Referenz-Belastungsszenarios eingehalten werden sollen. Für jedes U_{\min} entspricht der Zielfunktionswert Z dem Gewicht der Stabilisierungsmaßnahmen, die zur Erzielung der Spannungsanforderung in das Bordnetz integriert werden müssen.

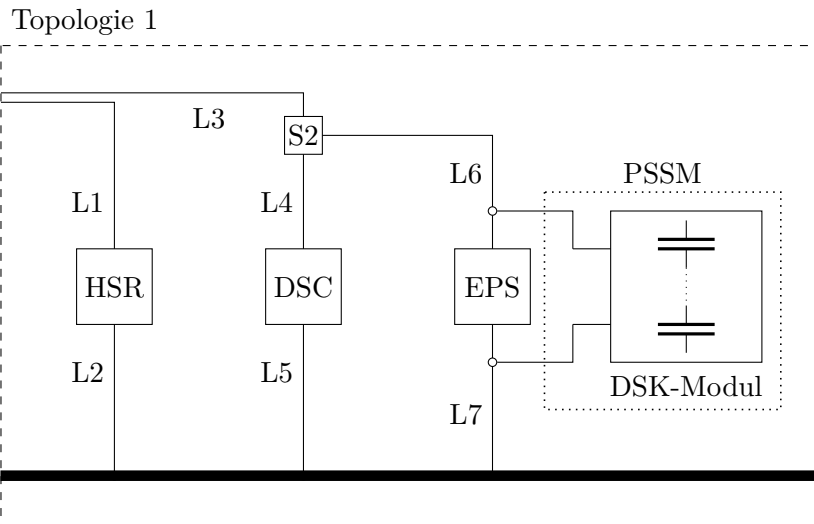


Abbildung 5.19 – Optimierte Topologie für Mindestspannungen U_{\min} im Bereich von 10,0 V bis 10,75 V. An den Klemmen des EPS wurde eine passive Spannungsstabilisierung (PSSM) integriert.

Im Bereich von 11,0 V bis 11,5 V für U_{\min} integriert die Optimierung eine aktive Spannungsstabilisierung (ASSM) an den Klemmen des EPS (siehe Abbildung 5.20). Die Leitungsquerschnitte verbleiben für alle 3 Spannungsanforderungen auf dem jeweiligen Ausgangswert. Für das benötigte DSK-Modul werden jeweils 50 F Kondensatoren (vgl. Tabelle 5.2) benötigt. Die Anzahl der in Serie geschalteten Kondensatoren steigert sich mit zunehmender Mindestspannung von 7 ($U_{\min} = 11$ V) über 9 ($U_{\min} = 11,25$ V) auf 12 ($U_{\min} = 11,5$ V).

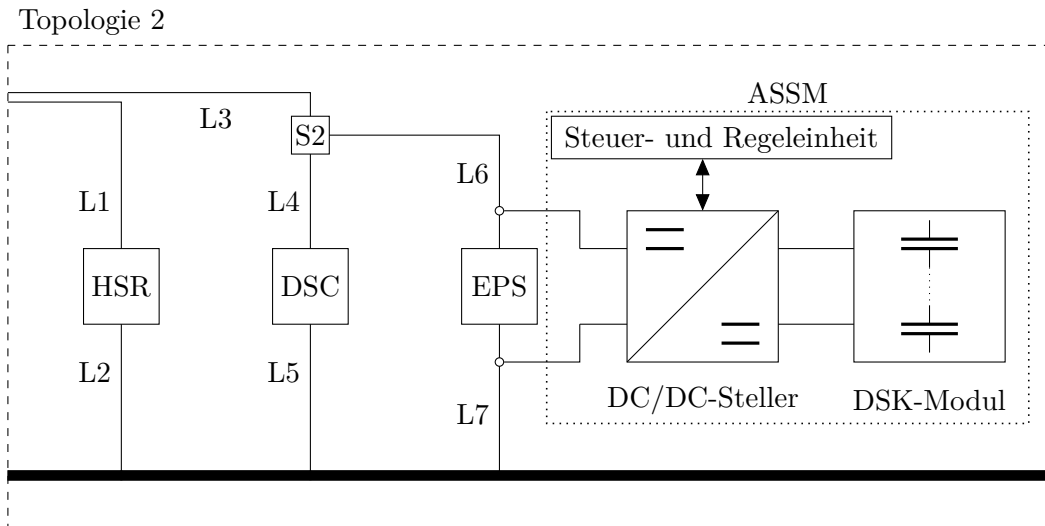


Abbildung 5.20 – Optimierte Topologie für Mindestspannungen U_{\min} im Bereich von 11,0 V bis 11,5 V. An den Klemmen des EPS wurde eine aktive Spannungsstabilisierung (ASSM) integriert.

Die Optimierungsergebnisse zeigen, dass bei allen hier untersuchten Spannungsanforderungen die lokale Integration einer Komponente zur Spannungsstabilisierung aus Gewichtssicht der Erhöhung von Leitungsquerschnitten vorzuziehen ist. Dieser Sachverhalt kann darauf zurückgeführt werden, dass die in dieser Arbeit untersuchte Kabelbaumgeometrie sehr lange Leitungen zur Versorgung der Komponenten aufweist.

Als weiteres Ergebnis kann festgehalten werden, dass im vorliegenden Bordnetz selbst bei hohen Spannungsanforderungen nicht mehr als eine Stabilisierungskomponente benötigt wird. Dieser Sachverhalt kann dadurch begründet werden, dass die EPS im Vergleich zum DSC und HSR eine deutlich größere Spitzenleistung aufweist. Die lokale Stabilisierung der EPS genügt demnach, um im gesamten Bordnetz eine ausreichende Entlastung zu erzielen.

6 Zusammenfassung

Steigende Komfortansprüche und die aus Effizienzgründen vollzogene Elektrifizierung von Nebenaggregaten haben dazu geführt, dass Energiebordnetze moderner Kraftfahrzeuge hohe Spitzenleistungen zur Versorgung der elektronischen Komponenten bereitstellen müssen. Dadurch können in extremen Belastungsszenarien die Klemmenspannungen der Verbraucher drastisch einbrechen, was im schlimmsten Fall einen Neustart von Steuergeräten verursachen kann. Vor allem der Ausfall von sicherheitsrelevanten Komponenten kann dabei zu äußerst kritischen Fahrzeugzuständen führen. Aus diesem Grund ist die Thematik der Spannungsstabilität heute ein wichtiger Aspekt bei der Auslegung von Bordnetzen. Vor dem Hintergrund der immer weiter zunehmenden Anzahl von elektronischen Komponenten stößt das konventionelle 14 V Bordnetz dabei zunehmend an Grenzen.

6.1 Ergebnisse dieser Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Maßnahmen zur Stabilisierung von Kfz-Energiebordnetzen und eine darauf aufbauende Methode für eine rechnergestützte Auslegung entwickelt.

Nach einer Einleitung und einer Beschreibung der Zielsetzung für die vorliegende Arbeit erfolgte im zweiten Kapitel eine allgemeine Einführung in die Thematik der automobilen Energiebordnetze.

Als Grundlage für die rechnergestützte Auslegung wurden im dritten Kapitel zunächst Simulationsmodelle von Generator, Batterie und Kabelbaum sowie verschiedene Verbrauchermodelle erstellt, um das Spannungsverhalten eines Energiebordnetzes in kritischen Belastungsfällen untersuchen zu können. Für die Entwicklung des Generatormodells wurde ein Prüfstand zur Vermessung eines Kfz-Generators aufgebaut. Auf Grundlage des am Prüfstand vermessenen Klemmenverhaltens wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, das die präzise Nachbildung der dynamischen Eigenschaften des Generators ermöglicht. Bei der simulativen Nachbildung der Bordnetzverbraucher wurde nach der jeweiligen Lastcharakteristik unterschieden, um die korrekte Spannungsabhängigkeit zu berücksichtigen. Verbraucher mit Leistungscharakteristik wurden mit hinterlegten Profilen modelliert, die aus Messungen des jeweiligen Klemmenverhaltens in

einem Fahrzeug stammen. Für die Modellierung einer permanenterregten Gleichstrommaschine, die Bestandteil eines elektrohydraulischen Aktuators ist, wurde ein physikalisches Modell implementiert. Es konnte gezeigt werden, dass mit diesem Modell eine gute Nachbildung des resultierenden Spitzenstroms beim Anlauf der Gleichstrommaschine aus dem Stillstand möglich ist.

Im vierten Kapitel wurden mögliche Maßnahmen zur Stabilisierung des Bordnetzes entwickelt, die über die bisher zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade bei der Auslegung von konventionellen Bordnetzen hinausgehen.

Das zunächst beschriebene Konzept der autonomen Verbraucherabschaltung sieht eine schnelle Abschaltung niederpriorer Verbraucher bei einem Klemmenspannungseinbruch vor, um Leistungsreserven im Bordnetz bereitstellen zu können. Die Entscheidung für eine Abschaltung erfolgt dabei lokal anhand der jeweils anliegenden Klemmenspannung. Dadurch kann die Abschaltung sehr schnell erfolgen, da keine weiteren Abhängigkeiten zu anderen Steuergeräten vorherrschen. Das Konzept eignet sich vor allem für Heizsysteme, wie beispielsweise Sitzheizungen oder Scheibenheizungen. Eine kurzzeitige Abschaltung dieser Komponenten bleibt aufgrund der großen thermischen Zeitkonstanten von den Fahrzeuginsassen unbemerkt. Zur messtechnischen Validierung des Konzepts wurde eine universelle Hardwareplattform aufgebaut, auf der dieses Konzept implementiert wurde. An einem Bordnetzprüfstand konnte nachgewiesen werden, dass der Betrag des Spannungseinbruchs durch die autonome Verbraucherabschaltung in kritischen Lastszenarien deutlich reduziert werden kann.

Als weitere Maßnahmen wurden lokale Spannungsstabilisierungen betrachtet, die auf der Integration zusätzlicher Energiespeicher basieren. Eine Variante stellt die passive Anbindung von Doppelschichtkondensatoren dar, die durch eine einfache Parallelschaltung die Verbraucherklammenspannung stabilisieren. Als weitere Variante wurde in dieser Arbeit eine aktive Spannungsstabilisierungsmaßnahme entwickelt, die ein DSK-Modul über einen DC/DC-Steller an das Bordnetz anbindet. Auf diese Weise kann die Spannung am Einspeisepunkt gezielt auf ein bestimmtes Niveau stabilisiert werden. Das Konzept der aktiven Spannungsstabilisierung wurde prototypisch in Hardware umgesetzt. Am Bordnetzprüfstand konnte gezeigt werden, dass mit diesem System eine zuverlässige Stabilisierung der Verbraucherklammenspannung möglich ist.

Auf Grundlage der entwickelten Spannungsstabilisierungsmaßnahmen wurde im fünften Kapitel eine Methode zur rechnergestützten Auslegung eines spannungsstabilen Bordnetzes entwickelt. Zur Lösung dieser Problemstellung erfolgte eine Kopplung der aufgebauten Bordnetzsimulation mit einem Optimierungsalgorithmus.

Als Ausgangssituation diente ein Energiebordnetz, das in kritischen Belastungssituationen Spannungseinbrüche bis unter 10 V aufweist. Als Zielsetzung sollte unter Verwendung der in dieser Arbeit behandelten Spannungsstabilisierungsmaßnahmen diejenige gewichtsoptimale Topologie und Komponentendimensionierung identifiziert werden, mit der bestimmte Spannungsanforderungen eingehalten werden können. Es erfolgte eine Formulierung dieser Fragestellung als

Optimierungsproblem. Dazu wurden die zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade mit entsprechenden Parameterräumen, der Suchraum, die Zielgröße sowie notwendige Nebenbedingungen definiert. Alle zur Verfügung stehenden Parameter, wie beispielsweise Leitungsquerschnitte und unterschiedliche Doppelschichtkondensatoren, liegen dabei in diskreter Form vor. Aus diesem Grund wurde ein Optimierungsalgorithmus auf Basis einer Partikelschwarmoptimierung derart modifiziert, dass die Lösung des Optimierungsproblems ohne Umwege innerhalb des diskreten Suchraumes erfolgen kann. Um während des Optimierungsprozesses verschiedene Spannungs-Stabilisierungsmaßnahmen in das Bordnetz integrieren zu können, wurde eine automatisierte Modelländerung implementiert. Aufgrund der hohen Dimensionalität des Problems sowie der Größe des Suchraumes erfolgte im Anschluss eine präzise Konfiguration der Algorithmusparameter, um eine bestmögliche Performanz der Optimierung zu erhalten. Abschließend wurden exemplarische Optimierungen für verschiedene Spannungsanforderungen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass bei dem untersuchten Energiebordnetz aus Gewichtssicht die lokale Verbraucherstabilisierung einer Erhöhung der Leitungsquerschnitte zu bevorzugen ist. Für Spannungsanforderungen von 10 V bis 10,75 V identifizierte die Optimierung eine passive Stabilisierung an der elektrischen Lenkkraftunterstützung durch Doppelschichtkondensatoren als gewichtsoptimal. Bei höheren Spannungsanforderungen bis 11,5 V wurde eine aktive Spannungsstabilisierung mit einem DC/DC-Steller und Doppelschichtkondensatoren als gewichtsoptimal identifiziert.

6.2 Ausblick

Eine Ansatzmöglichkeit für Folgearbeiten besteht darin, Temperatur- und Lebensdaueraspekte bei der Komponentendimensionierung miteinzubeziehen. Vor allem die mit dem Alter zunehmenden Innenwiderstände von Bleibatterien und Doppelschichtkondensatoren spielen an dieser Stelle eine bedeutende Rolle.

Während in dieser Arbeit eine bestehende Grundstruktur eines Bordnetzes mit Hilfe von verschiedenen Stabilisierungsmaßnahmen optimiert wurde, können in möglichen Folgearbeiten außerdem die geometrische Anordnung der Verlegewege des Kabelbaums und die Positionierung von Stromverteilern bei der Auslegung miteinbezogen werden.

Weiterhin bietet es sich an, neben der expliziten Betrachtung der Spannungsstabilität ebenso energetische Randbedingungen zu berücksichtigen. Vor allem der Einsatz eines DC/DC-Stellers mit einem DSK-Modul ermöglicht neben der aktiven Spannungsstabilisierung auch die Verbesserung der Energieeffizienz des Bordnetzes. Dies bezieht sich vor allem auf Mikrohybride, die das 14 V Bordnetz für die Rekuperation von Bremsenergie nutzen. Aufgrund der vergleichsweise schlechten Ladeakzeptanz von AGM-Batterien kann durch den DC/DC-Steller und ein ausreichend groß dimensioniertes DSK-Modul mehr Energie in Bremsphasen rekuperiert werden.

Publikationsliste

Folgende Beiträge wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit veröffentlicht:

RUF, Florian; NEISS, Alexander; BARTHEL, Andreas; KOHLER, Tom P.; MICHEL, Hans-Ulrich; FRÖSCHL, Joachim; HERZOG, Hans-Georg: „Design optimization of a 14 V automotive power net using a parallelized DIRECT algorithm in a physical simulation“ in: *13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Brasov, Rumänien; Mai 2012.

RUF, Florian; BARTHEL, Andreas; WALLA, Gregor; WINTER, Michael; KOHLER, Tom P.; MICHEL, Hans-Ulrich; FRÖSCHL, Joachim; HERZOG, Hans-Georg: „Autonomous Load Shutdown Mechanism as a Voltage Stabilization Method in Automotive Power Nets“ in: *The 8th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Seoul, Südkorea; Oktober 2012.

RUF, Florian; WINTER, Michael; MICHEL, Hans-Ulrich; FRÖSCHL, Joachim; KÖLBL, Christian; BUCHHOLZ, Bastian; HERZOG, Hans-Georg: „Modeling of an Electromechanical Actuator in Respect to Voltage Stability in Automotive Power Nets“ in: *The 8th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Seoul, Südkorea; Oktober 2012.

RUF, Florian: „Spannungsstabilität und Topologieaspekte in modernen Kfz-Bordnetzen“ in: *Niederspannungs-Gleichstromnetze / LV DC Grids, ECPE - European Center for Power Electronics e. V.*, Erlangen, Deutschland; November 2012.

RUF, Florian; BARTHEL, Andreas; WALLA, Gregor; WINTER, Michael; FRÖSCHL, Joachim; HERZOG, Hans-Georg: „Prototypical Platform and Test Bench for Investigating Automotive Energy and Power Management Paradigms“ in: *2nd Conference on Electric & Electronic Systems in Hybrid and Electric Vehicles and Electrical Energy Management (EEHE)*, Bamberg, Deutschland; April 2013.

RUF, Florian; WINTER, Michael; MICHEL, Hans-Ulrich; FRÖSCHL, Joachim; HERZOG, Hans-Georg: „Experimental Investigations on an Autonomous Load Shutdown Mechanism in Respect to Voltage Stability in Automotive Power Nets“ in: *The 9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Peking, China; Oktober 2013.

RUF, Florian; SCHILL, Markus; BARTHEL, Andreas; KOHLER, Tom P.; MICHEL, Hans-Ulrich; FRÖSCHL, Joachim; HERZOG, Hans-Georg: „Topology and Design Optimization of a 14 V

Automotive Power Net using a Modified Discrete PSO in a Physical Simulation“ in: *The 9th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Peking, China; Oktober 2013.

BARTHEL, Andreas; RUF, Florian; WALLA, Gregor; MICHEL, Hans-Ulrich; BAUMGARTEN, Uwe: „A Model for Sequence Based Power Management in Cyber Physical Systems“ in: *1st International Conference on ICT as Key Technology for the Fight against Global Warming (ICT-GLOW)*, Toulouse, Frankreich; August 2011.

KOHLER, Tom P.; GEHRING, Rainer; FRÖSCHL, Joachim; DORNMAIR, Rita; SCHRAMM, Christoph; RUF, Florian; THANHEISER, Andreas; BÜCHERL, Dominik; HERZOG, Hans-Georg: „Sensitivity Analysis of Voltage Behavior in Vehicular Power Nets“ in: *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Chicago, IL, USA; September 2011.

WALLA, Gregor; BARTHEL, Andreas; RUF, Florian; DÖRFEL, Robert; MICHEL, Hans-Ulrich; FRÖSCHL, Joachim; SIRCH, Ottmar; BAUMGARTEN, Uwe; HERZOG, Hans-Georg: „Framework and Model for the Evaluation of Energy Efficiency of Partitioning Alternatives“ in: *Haus der Technik: Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement*, Miesbach, Deutschland; April 2012.

WALLA, Gregor; BARTHEL, Andreas; RUF, Florian; DÖRFEL, Robert; MICHEL, Hans-Ulrich; FRÖSCHL, Joachim; SIRCH, Ottmar; BAUMGARTEN, Uwe; HERZOG, Hans-Georg: „Aspects of Function Partitioning in Respect to Power Management“ in: *2nd International Energy Efficient Vehicles Conference (EEVC)*, Dresden, Deutschland; Juni 2012.

WALLA, Gregor; GABRIEL, Dirk; BARTHEL, Andreas; RUF, Florian; MICHEL, Hans-Ulrich; HERKERSDORF, Andreas: „ITE-Sim: A Simulator and Power Evaluation Framework for Electric/Electronic Architectures“ in: *The 8th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Seoul, Südkorea; Oktober 2012.

BARTHEL, Andreas; RUF, Florian; SCHLENK, Alexander; WALLA, Gregor; MICHEL, Hans-Ulrich; BAUMGARTEN, Uwe: „PREcup-1: An Embedded System Platform for Prototyping ECU Power Management“ in: *The 8th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Seoul, Südkorea; Oktober 2012.

Folgende Erfindungsmeldungen wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit veröffentlicht:

MICHEL, Hans-Ulrich; RUF, Florian: „Verfahren und Vorrichtung zur Spannungsstabilisierung in einem Kraftfahrzeugbordnetz“, Schutzrecht DE102012202009A1, Veröffentlichungsdatum: 14.08.2013.

Liste betreuter Arbeiten

Folgende studentische Arbeiten wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit betreut:

BACHNER, Heike: „Die Entwicklung des Kfz-Generators“, Hauptseminar, November 2011.

BRUCKNER, Sebastian: „Algorithmen zur Lösung diskreter Optimierungsprobleme“, Hauptseminar, März 2014.

DE GANAY, Romain: „Bussysteme in der Automobilindustrie“, Hauptseminar, Oktober 2010.

HERRMANN, Maximilian: „Analyse und Modellbildung des dynamischen Verhaltens eines Kfz-Generators“, Bachelorarbeit, März 2012.

KASPAR, Sebastian: „Simulative Untersuchung bordnetzstabilisierender Maßnahmen“, Studienarbeit, April 2011.

KIESEL, Sebastian: „Entwicklung und Inbetriebnahme eines Prüfstands für LIN Kfz-Generatoren“, Bachelorarbeit, September 2011.

LIPPL, Johannes: „Hardwarenahe Simulation eines DC/DC-Stellers zur Bordnetzstabilisierung“, Studienarbeit, September 2012.

NEISS, Alexander: „Rechnergestützter Optimierungsansatz für eine spannungsstabile Energiebordnetzauslegung“, Diplomarbeit, Oktober 2011.

PESA, Aurelie: „Moderne Leistungshalbleiter“, Diplomarbeit, Oktober 2011.

RIEBEL, Christoph: „Entwicklung einer zentralen Steuerung für autonome Abschaltmechanismen in einem Bordnetz-Prüfstand mit LabView“, Bachelorarbeit, November 2012.

SCHECHNER, Korbinian: „Analyse und Modellierung des Anlaufverhaltens der Gleichstrommaschine einer DSC-Einheit“, Bachelorarbeit, Oktober 2011.

SCHILL, Markus: „Topologieoptimierung eines Kfz-Energiebordnetzes mit mehreren Energiespeichern“, Diplomarbeit, November 2012.

SCHILL, Markus: „Methoden zur Optimierung eines Energieverteilungsnetzes“, Hauptseminar, April 2012.

Liste betreuter Arbeiten

SCHLENK, Alexander: „Entwicklung und Inbetriebnahme einer Hardwareplattform für autonome Abschaltmechanismen in Kfz-Energiebordnetzen“, Bachelorarbeit, April 2012.

SCHÖNEWOLF, Stefan: „Entwicklung eines Gleichstromstellers und eines Doppelschichtkondensatormoduls zur kurzzeitigen Stützung von Fahrzeugbordnetzen“, Bachelorarbeit, Juli 2012.

VERGOTE, Christian: „Untersuchung des Verhaltens von AGM Batterien für den Einsatz im Kfz-Bordnetz“, Bachelorarbeit, März 2012.

WAGNER, Philipp: „Entwicklung eines CAN-Interfaces für Teilnetzbetrieb auf einer FPGA-Plattform“, Studienarbeit, Mai 2011.

WANG, Shuai: „Recherche zum Thema Aktive Gleichrichtung im Kfz-Generator“, Hauptseminar, April 2012.

WEINBERGER, Andreas: „Entwicklung eines DC/DC-Wandlers zur kurzzeitigen Spannungsstabilisierung des 14 V Bordnetzes“, Studienarbeit, November 2012.

Abbildungsverzeichnis

3.1	Elektrisches Ersatzschaltbild einer Bleibatterie: Das Klemmenverhalten wird durch eine Gleichspannungsquelle U_0 , eine Induktivität L_{Bat} , einen Innenwiderstand R_i sowie drei RC-Glieder modelliert.	16
3.2	Schematischer Aufbau des Generators: Durch den Generatorregler wird der Erregerstrom I_{Err} so eingestellt, dass der Mittelwert der gleichgerichteten dreiphasigen Wechselspannung der gewünschten Generatorspannung U_{Gen} entspricht.	17
3.3	Schematischer Aufbau des Generatorprüfstands: Der Generator wird von einer Maschinen/Umrichter-Kombination über einen Riementrieb angetrieben. Elektrisch ist der Generator an eine Bleibatterie und eine elektronische Last angebunden. Über einen Prüfstands-PC können Messwerte von Strömen und Spannungen an verschiedenen Messpunkten sowie die Drehzahl und das Drehmoment der Antriebsmaschine eingelesen werden. Die Ansteuerung erfolgt über eine LabVIEW-Bedienoberfläche.	18
3.4	Antriebsmaschine und Kfz-Generator, die über einen Riementrieb miteinander gekoppelt sind. Eine antriebsseitige Messwelle erlaubt die Erfassung von Drehmoment und Drehzahl.	19
3.5	Struktur des Generatormodells. Als Eingangsgrößen werden die Generatorspannung U_{Gen} , die Generatorsollspannung $U_{\text{Gen,soll}}$, die Load-Response-Zeit t_{LR} und die aktuelle Generatordrehzahl n_{Gen} verwendet. Die berechnete Sollvorgabe für den Generatorstrom $I_{\text{Gen,soll}}$ dient als Eingangsgröße für eine gesteuerte Stromquelle.	20
3.6	Gemessener und simulierter Verlauf der Sprungantwort des Generatorausgangsstroms auf einen Lastsprung von 10 A auf 220 A zum Zeitpunkt $t=0,05\text{s}$. Die Messung und Simulation wurde bei einer Generatorsollspannung von 13 V bei einer Generatordrehzahl von 8370 min^{-1} (Antriebsmaschine: 3000 min^{-1}) durchgeführt.	21
3.7	Verbrauchermodell mit Leistungscharakteristik. Die Stromsenke wird derart angesteuert, dass die aufgenommene Leistung an den Verbraucherklammern dem vorgegebenen Wert P_{Ver} entspricht.	23

3.8	Verbrauchermodell eines Aktuators mit Leistungscharakteristik. Eine Stromsenke wird derart angesteuert, dass der zeitliche Verlauf der Klemmenleistung des Modells einem hinterlegten Aktuator-Leistungsprofil entspricht.	24
3.9	Verbrauchermodell eines Aktuators mit Leistungscharakteristik und Wirkungsgradkorrektur. Im Vergleich zum Aktuatomodell in Abbildung 3.8 wird die Ansteuerung der Stromsenke durch einen weiteren Block so korrigiert, dass der arbeitspunktabhängige Wirkungsgrad des Systems berücksichtigt wird.	24
3.10	Elektrisches Ersatzschaltbild der Gleichstrommaschine des DSC-Steuergeräts bei geschlossenem Leistungsschalter. Der MOSFET-Leistungshalbleiter wird durch den Widerstand $R_{DS_{on}}$ nachgebildet. Die Impedanzen der Entstördrosseln und des Ankers sind mit R_D und L_D , sowie R_A und L_A berücksichtigt. Die Bürstenspannungen U_B und die induzierte Spannung U_i sind durch Spannungsquellen modelliert.	26
3.11	Vergleich des gemessenen und des simulierten Anlaufstromverlaufs der in einem DSC-Steuergerät verbauten Gleichstrommaschine.	27
3.12	Stark vereinfachtes Modell einer DSC-Einheit, das auf einer gesteuerten Stromsenke basiert. Ein hinterlegtes Profil dient zur Ansteuerung der Senke. Dabei wird die Spannungsabhängigkeit nicht korrekt berücksichtigt. Das Modell kann jedoch für Worst-Case-Betrachtungen herangezogen werden.	27
3.13	Vereinfachte schematische Darstellung des Energiebordnetzes. Der Generator (G), die Batterie (B) und die Verbraucher sind über Stromverteiler (S1-S3) und Leitungen miteinander verbunden. Die Komponenten HSR, DSC, EPS sowie eine Grundlast (GL) stellen die Verbraucher dar. Die Karosserie (K) dient als gemeinsamer Masserückleiter.	29
3.14	Spannungsverläufe an den Steuergeräteklammern von HSR, DSC und EPS während eines Ausweichmanövers bei niedriger Geschwindigkeit. In diesem Beispiel bricht die Spannung am EPS auf unter 9 V ein.	29
4.1	Schematischer Aufbau der universellen ECU-Hardwareplattform. Der autonome Abschaltmechanismus ist auf einem FPGA implementiert. Die Spannungsmessung erfolgt über einen A/D-Wandler, der die Messwerte über einen SPI-Bus an den FPGA überträgt. Über einen OMAP-Prozessor und einen weiteren SPI-Bus lassen sich die Parameter der autonomen Verbraucherabschaltung konfigurieren. Die Kommunikation nach außen erfolgt über Ethernet.	33
4.2	Universelle ECU-Hardwareplattform, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde.	34

4.3	Blick auf den hinteren Teil des Bordnetzprüfstands. Die Laborwiderstände links und rechts auf der Plattform im Vordergrund bilden die Sitzheizungen im Fond ab. Auf der Hutablage der Karosserie sind auf einem Podest die Widerstände zur Nachbildung der Heckscheibenheizung zu sehen.	35
4.4	Bordnetzprüfstand am Fachgebiet Energiewandlungstechnik der Technischen Universität München. Die Grundlage des Prüfstands bilden die Rohkarosserie eines BMW 7er (Baureihe F02) und ein Originalkabelbaum.	36
4.5	Spannungs- und Stromverläufe während eines Ausweichmanövers ohne Zusatzbelastung durch Heizsysteme. Messpunkte: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN), Batterie (BAT) und Verbrauchersummenstrom (SUM).	37
4.6	Spannungs- und Stromverläufe während eines Ausweichmanövers mit Zusatzbelastung durch Heizsysteme. Messpunkte: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), Dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN), Batterie (BAT) und Verbrauchersummenstrom (SUM).	38
4.7	Spannungs- und Stromverläufe während eines Ausweichmanövers mit Zusatzbelastung durch Heizsysteme und autonomer Verbraucherabschaltung. Messpunkte: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), Dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN), Batterie (BAT) und Verbrauchersummenstrom (SUM).	39
4.8	Minimalwerte der gemessenen Klemmenspannungen an den folgenden Messpunkten: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), Dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN) und Batterie (BAT). . .	40
4.9	Minimalwerte der gemessenen Klemmenspannungen an den folgenden Messpunkten: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), Dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN) und Batterie (BAT). Die Generatorodynamik wurde für diese Messreihe künstlich durch den Einsatz der Load-Response-Funktion limitiert.	41
4.10	Minimalwerte der gemessenen Klemmenspannungen für verschiedene Abschaltverzögerungen. Messpunkte: Stromverteiler vorne (SVV), Stromverteiler hinten (SVH), Dynamische Hochleistungsverbraucher (V1-V3), Generator (GEN) und Batterie (BAT).	42
4.11	Ersatzschaltbild eines Doppelschichtkondensators [83, 150]. Die Selbstentladung wird durch den Widerstand R_{leak} nachgebildet. Die RC-Glieder des „long-term branch“ (Index l) und „delayed branch“ (Index d) modellieren das Verhalten im Minutenbereich. Der „immediate branch“ verfügt zudem über eine spannungsabhängige Kapazität zur Nachbildung von Nichtlinearitäten.	45

4.12 Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Doppelschichtkondensators auf Basis eines Widerstands und einer Kapazität.	46
4.13 Schematische Darstellung der Schaltungstopologie. Die gewählte H-Brückenschaltung ermöglicht einen Betrieb als Vierquadrantensteller.	47
4.14 Aufladung des DSK-Moduls im Tiefsetzstellerbetrieb für $U_{\text{DSK}} < U_{\text{BN}}$	48
4.15 Im Bereich $U_{\text{DSK}} \approx U_{\text{BN}}$ wird die Schaltung als synchroner Tief-Hochsetzsteller betrieben.	48
4.16 Für $U_{\text{DSK}} > U_{\text{BN}}$ wird die Schaltung im synchronen Hochsetzstellermodus betrieben, um das DSK-Modul bis zur Nennspannung aufladen zu können.	49
4.17 Schematische Darstellung eines Aufladevorgangs. An den entsprechenden Spannungsgrenzen sind Hysteresen vorgesehen, um beim Umschalten der Topologien unerwünschte Oszillationen zu verhindern.	49
4.18 Für die Stabilisierung der Bordnetzspannung arbeitet die Topologie als synchroner Tiefsetzsteller ($U_{\text{DSK}} > U_{\text{BN}}$).	50
4.19 Fertig aufgebauter DC/DC-Steller für die Spannungsstabilisierung des Kfz-Energiebordnetzes.	51
4.20 Funktionsprinzip der Spannungssymmetrierung des DSK-Moduls. Dezentrale Regler sorgen dafür, dass die Spannungen von jeweils zwei in Serie geschalteten Kondensatoren gleich sind. Auftretende Spannungsdifferenzen werden durch gezielte Entladung des Kondensators mit der höheren Spannung ausgeglichen.	52
4.21 Verlauf zweier Kondensatorspannungen U_{C1} und U_{C2} sowie des Symmetrierungsstroms I_{sym} während eines Aufladevorgangs. Zur Demonstration der Spannungssymmetrierung wurde ein Kondensator manuell mit 0,5 V vorgeladen.	53
4.22 Aufladevorgang des DSK-Moduls über den DC/DC-Steller auf eine DSK-Modulspannung von 28 V. Die Stromeinbrüche bei ca. 4 s und 8 s entstehen durch die Umschaltung der Topologie des Stellers.	53
4.23 DSK-Modul mit 12 in Serie geschalteten 50 F Kondensatoren. Die Nennspannung des Moduls beträgt 32,4 V, die Nennkapazität 4,2 F.	54
4.24 Strom- und Spannungsverlauf an den Steuergeräteklemmen des Verbrauchers V3 während eines Ausweichmanövers. Für die Messungen wurde zur Erzeugung besonders großer Spannungseinbrüche der Generator vom Bordnetzprüfstand abgeklemmt.	55
4.25 Strom- und Spannungsverlauf an den Steuergeräteklemmen des Verbrauchers V3 während eines Ausweichmanövers bei aktiver Spannungsstabilisierung durch die ASSM. Neben dem Verbraucherstrom I_{V3} sind auch die Ströme I_{BN} vom Bordnetz und $I_{\text{DC/DC}}$ vom DC/DC-Wandler aufgetragen. Für die Messungen wurde zur Erzeugung besonders großer Spannungseinbrüche der Generator vom Bordnetzprüfstand abgeklemmt.	56

4.26	Schematische Modellstruktur der Aktiven Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme (ASSM) zur Nachbildung in der Bordnetzsimulation.	57
5.1	Schematische Darstellung des Energiebordnetzes, das als Ausgangssituation für die Optimierung dient. Der Generator (G), die Batterie (B) und die Verbraucher sind über Stromverteiler (S1-S3) und Leitungen miteinander verbunden. Die Komponenten HSR, DSC, EPS sowie eine Grundlast (GL) stellen die Verbraucher dar. Die Karosserie (K) dient als gemeinsamer Masserückleiter.	60
5.2	Vereinfachte schematische Darstellung des Energiebordnetzes. Ausgehend vom Stromverteiler S1 sind über die Leitungen L1 bis L7 und einen weiteren Stromverteiler S2 die Fahrwerksregelsysteme HSR, DSC und EPS an den Generator (G) und die Batterie (B) angebunden. Die Grundlast (GL) ist über den dritten Stromverteiler S3 an das Bordnetz gekoppelt. Die Karosserie (K) dient als gemeinsamer Masserückleiter.	61
5.3	Vereinfachte schematische Darstellung des Energiebordnetzes. Der Generator (G), die Batterie (B) und die Verbraucher sind über Stromverteiler (S1-S3) und Leitungen miteinander verbunden. Die Fahrwerksregelsysteme HSR, DSC und EPS sowie eine Grundlast (GL) stellen die Verbraucher dar. Die Klemmen der Fahrwerksregelsysteme sind mit K1 bis K3 bezeichnet und bieten die Möglichkeit zur Anbindung von Spannungs-Stabilisierungsmaßnahmen. Die Karosserie (K) dient als gemeinsamer Masserückleiter.	62
5.4	Schematische Darstellung einer Passiven Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme (PSSM).	63
5.5	Schematische Darstellung einer Aktiven Spannungs-Stabilisierungsmaßnahme (ASSM), die aus einem DC/DC-Steller und einem DSK-Modul besteht.	64
5.6	BPSO: Sigmoid-Transformation für Wahrscheinlichkeitsschwellwert	74
5.7	Sigmoidtransformation für den Wahrscheinlichkeitsschwellwert $S(v_{id})$ gemäß (5.20) (links) und die Dichtefunktion der Standardnormalverteilung mit $\sigma^2 = \sigma_N M_d = 1$ (rechts).	75
5.8	Beispielhafter Optimierungsverlauf nach dem Algorithmus aus [139]. Der optimale Punkt dieses Beispiels ist die Position 0.	76
5.9	Beispielhafter Optimierungsverlauf nach dem MSPDO-Algorithmus. Der optimale Punkt dieses Beispiels ist die Position 0.	77

5.10	Schema eines Optimierungsverlaufs. Der in Matlab implementierte Optimierungsalgorithmus liefert in jeder Iteration neue Parametersätze für alle Partikel. Falls ein Parametersatz die Veränderung der Bordnetztopologie erfordert, wird der Modelica-Code automatisch modifiziert. Die modifizierte Datei wird anschließend in Dymola kompiliert. Für Partikel, die keine Veränderung der Topologie erfordern, kann dieser Schritt entfallen. Anschließend werden die Parametersätze zur Simulation an die entsprechenden Simulationsdateien übergeben. Die Ausführung erfolgt dabei parallel auf allen zur Verfügung stehenden CPU-Kernen. Nach Abschluss der Simulationsvorgänge wird überprüft, welche Partikel die vorgegebenen Nebenbedingungen erfüllen.	80
5.11	Grafische Darstellung der Wahrscheinlichkeit p_r für $r = 1$ und $r \geq 0,95$ sowie des RMSE-Werts in Abhängigkeit verschiedener Kombinationen der Gewichtungsfaktoren Ψ_p und Ψ_g	84
5.12	Grafische Darstellung der Wahrscheinlichkeit p_r für $r = 1$ und $r \geq 0,95$ sowie des RMSE-Werts in Abhängigkeit des Wertebereichs für die Partikelträgheit ω	85
5.13	Grafische Darstellung der Wahrscheinlichkeit p_r für $r = 1$ und $r \geq 0,95$ sowie des RMSE-Werts in Abhängigkeit des Wertebereichs der Variablen σ_N	86
5.14	Verlauf der Wahrscheinlichkeit p_r , mit der ein Ergebnis der Güte $r = 1$ bzw. $r \geq 0,95$ erzielt werden kann. Im Diagramm ist zusätzlich die Anzahl der Durchläufe $n_{\text{set},r}$ dargestellt, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,9% zur Erzielung entsprechender Ergebnisse führt.	87
5.15	Benötigte der Simulationszeit für ein Ergebnis der Güte $r = 1$ bzw. $r \geq 0,95$ in Abhängigkeit der Anzahl von Iterationsschritten pro Durchlauf gemäß (5.30).	87
5.16	Resultat der Laufzeitanalyse mit der Algorithmuskonfiguration aus Abschnitt 5.6.2. Links: p_r und $n_{\text{set},r}$ für $r = 1$ in Abhängigkeit von i_{iter} . Rechts: Benötigte Simulationszeit für ein Ergebnis der Güte $r = 1$ in Abhängigkeit der Anzahl von Iterationsschritten pro Durchlauf. Für beide Grafiken beträgt $p_w = 0,999$	88
5.17	Resultat der Laufzeitanalyse mit der Algorithmuskonfiguration aus Abschnitt 5.6.2. Links: p_r und $n_{\text{set},r}$ für $r \geq 0,95$ in Abhängigkeit von i_{iter} . Rechts: Benötigte Simulationszeit für ein Ergebnis der Güte $r \geq 0,95$ in Abhängigkeit der Anzahl von Iterationsschritten pro Durchlauf. Für beide Grafiken beträgt $p_w = 0,999$	88
5.18	Optimierungsergebnisse für unterschiedliche Mindestspannungen, die während des Referenz-Belastungsszenarios eingehalten werden sollen. Für jedes U_{min} entspricht der Zielfunktionswert Z dem Gewicht der Stabilisierungsmaßnahmen, die zur Erzielung der Spannungsanforderung in das Bordnetz integriert werden müssen.	90

Abbildungsverzeichnis

5.19 Optimierte Topologie für Mindestspannungen U_{\min} im Bereich von 10,0 V bis 10,75 V. An den Klemmen des EPS wurde eine passive Spannungsstabilisierung (PSSM) integriert.	90
5.20 Optimierte Topologie für Mindestspannungen U_{\min} im Bereich von 11,0 V bis 11,5 V. An den Klemmen des EPS wurde eine aktive Spannungsstabilisierung (ASSM) integriert.	91

Tabellenverzeichnis

4.1	Liste der im Bordnetzprüfstand integrierten Lastwiderstände zur Nachbildung von Klima- und Komfortkomponenten.	36
4.2	Batteriestrom, Generatorstrom und Verbrauchersummenstrom zum Zeitpunkt des maximalen Spannungseinbruchs.	41
4.3	Batteriestrom, Generatorstrom und Verbrauchersummenstrom zum Zeitpunkt des maximalen Spannungseinbruchs. Die Generatordynamik wurde für diese Messreihe künstlich durch den Einsatz der Load-Response-Funktion limitiert.	42
4.4	Auflistung der minimal gemessenen Spannungen sowie der Spitzenwerte von Verbraucherstrom und Bordnetzstrom für den Betrieb mit und ohne Spannungsstabilisierung durch die ASSM.	55
5.1	Auflistung der Parameter von einzelnen DSKs aus der HC-, BC- und K2-Serie der Firma Maxwell [90–92] sowie die resultieren Parameter bei serieller Verschaltung von 6 Kondensatoren.	64
5.2	Auflistung der Parameter einzelner DSKs aus der HC-Serie der Firma Maxell [91], die für den Aufbau eines Moduls für die ASSM verwendet werden können.	65
5.3	Variablen und Wertebereiche zur Konfiguration des MDPSO-Algorithmus.	82
5.4	Ergebnisübersicht für die Variation der Gewichtungsfaktoren Ψ_p und Ψ_g . Es wurden jeweils 30 Durchläufe mit jeweils 50 Iterationen für $U_{\min} = 11,5 V$. Insgesamt wurden 32 Partikel verwendet.	83
5.5	Ergebnisübersicht für verschiedene Wertebereiche der Partikelträgheit ω	84
5.6	Ergebnisübersicht für verschiedene Wertebereiche der Variable σ_N	85

Literaturverzeichnis

- [1] ABELE, M.: „Modellierung und Bewertung hochzuverlässiger Energiebordnetz-Architekturen für sicherheitsrelevante Verbraucher in Kraftfahrzeugen“; Dissertation, Universität Kassel; Kassel University Press, 2008; ISBN: 978-3-89958-388-5.
- [2] AFRIDI, K. K.: „A Methodology for the Design and Evaluation of Advanced Automotive Electrical Power Systems“; Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Boston; 1998.
- [3] ALLEGRO MICROSYSTEMS: *ACS758xCB - Thermally Enhanced, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC*; Datenblatt; 2012.
- [4] ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB: *ADAC Pannenstatistik 2013*; 2013; URL: <http://www.adac.de/infotestrat/unfall-schaeden-und-panne/pannenstatistik/default.aspx> (besucht am 30.08.2013).
- [5] ALT, W. u. a.: „Fahrzustandsabhängiges Schalten von elektrischen Verbrauchern in einem Kraftfahrzeug“; Schutzrecht EP0601300; Patentinhaber: VOLKSWAGENWERK AG, Wolfsburg; veröffentlicht am 15. Juni 1994.
- [6] ANALOG DEVICES INC.: *ADuM3200 / ADuM3201 - Dual-Channel, Digital Isolators, Enhanced System-Level ESD Reliability*; Datenblatt; 2012.
- [7] AUER, J. und WIESER, C.: „Einsatzprofile von Ultracaps in zukünftigen Bordnetzen“; in *ATZelektronik*; Band 4/2009; Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, September 2009, Seiten 18–23.
- [8] BÄKER, B.: „Energie- und Informationsmanagement für zukünftige Kfz-Bordnetze“; Dissertation, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig; Mainz Wissenschaftsverlag, Aachen, 1998; ISBN: 978-3-89653-241-1.
- [9] BARD, A. und FAULKNER, L.: *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*; Wiley, 2000; ISBN: 978-0-471-04372-0.
- [10] BARTHELS, A.: „Energy-aware Computing in Embedded Systems and its Operating System Support“; Dissertation, Technische Universität München; 2014.
- [11] BARTHLOTT, J.: „Modellierung und Parametrierung von Energie-Bordnetz-Architekturen im Kraftfahrzeug“; Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe; Logos Verlag Berlin, 2004; ISBN: 978-3-8325-0738-1.

- [12] BAUER, H.; MEYER, R. und (STUTTGART), R. B. G.: *Generatoren und Starter*; Elektrik und Elektronik für Kraftfahrzeuge; Robert Bosch GmbH, 2002; ISBN: 978-3-7782-2028-3.
- [13] BEIERLEIN, T. und HAGENBRUCH, O.: *Taschenbuch Mikroprozessortechnik*; Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2004; ISBN: 978-3-446-22072-0.
- [14] BERTRAM, T. u. a.: „Verfahren und Vorrichtung zur Energieverteilung in einem Kraftfahrzeug“; Schutzrecht DE19829150; Patentinhaber: ROBERT BOSCH GMBH, Stuttgart; veröffentlicht am 13. Januar 2000.
- [15] BERTRAM, T. u. a.: „Verfahren und Vorrichtung zur Steuerung von elektrischen Verbrauchern in einem Fahrzeug“; Schutzrecht DE19857916; Patentinhaber: ROBERT BOSCH GMBH, Stuttgart; veröffentlicht am 21. Juni 2000.
- [16] BIELEFELD, M. und BIELER, N.: „Modulare Hybrid-Antriebssysteme“; German; in *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Jahrgang 107, Nummer 9, 2005; Springer Automotive Media; Seiten 738–745; ISSN: 0001-2785.
- [17] BÖHM, A.: „Arbeitskreis Automatisierungsgerechtes Bordnetzdesign“; in *12. Kooperationsforum Bordnetze, München*; 2009.
- [18] BOLL, W.: „Verfahren zur Sicherung der elektrischen Energieversorgung in einem Kraftfahrzeug“; Schutzrecht DE3936638; Patentinhaber: MERCEDES-BENZ AG, Stuttgart; veröffentlicht am 14. März 1991.
- [19] BRABETZ, L.; AYEB, M. und TELLMANN, D.: „Efficient Vehicle Power Supply by Adaptive Energy, Charge and Heat Management of an Alternator – Super Capacitor System“; in *SAE International Journal of Passenger Cars – Electronic and Electrical Systems*; herausgegeben von STRANGAS, E.; Band 2, Nr. 1; SAE International, Warrendale, PA, USA, April 2009, Seiten 359–366.
- [20] BRABETZ, L.; JÄSCHKE, J. und MÜLLER, D.: „Elektrische Energieverteilung im Kfz – Optimierung der Bordnetztopologie“; in *Elektronik im Kraftfahrzeug*; VDI-Bericht, Nr. 1547; VDI-Verlag, Düsseldorf, Oktober 2000, Seiten 521–536; ISBN: 978-3-18-091547-0.
- [21] BRABETZ, L. u. a.: „Architecture Optimization and Power Management for Robust Electrical Distribution Systems“; in *Energy Management & Wire Harness Systems*; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 117; Expert Verlag, Renningen, März 2011, Seiten 170–181; ISBN: 978-3-8169-3061-7.
- [22] BRAESS, H. und SEIFFERT, U.: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*; ATZ/MTZ-Fachbuch; Vieweg+Teubner Verlag, 2011; ISBN: 978-3-8348-1011-3.
- [23] BÜCHNER, S. u. a.: „Entwicklung von Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen“; in *Energiemanagement u. Bordnetze II*; herausgegeben von SCHÖLLMANN, M.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 71; Expert-Verlag, Renningen, 2007, Seiten 53–71; ISBN: 978-3-8169-2649-8.

- [24] BULLER, S.: „Impedance Based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems“; Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; Shaker Verlag GmbH, 2003; ISBN: 978-3-8322-1225-4.
- [25] CERAOLO, M.: „New dynamical models of lead-acid batteries“; in *Power Systems, IEEE Transactions on*, Jahrgang 15, Nummer 4, November 2000; Seiten 1184–1190; ISSN: 0885-8950.
- [26] CIERULLIES, J.: „Auslegungs- und Bewertungsmetrik für die elektrische Energieversorgung von Kraftfahrzeugen“; Dissertation, Technische Universität München; November 2005.
- [27] CLERC, M.: „The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization“; in *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*; Band 3; 1999, 3 vol. (xxxvii+2348).
- [28] COILCRAFT: *Shielded Power Inductors - VER2923*; Datenblatt; 2012.
- [29] CROS, J.; SINCERO, G. und VIAROUGE, P.: „Design method for brush permanent magnet DC motors“; in *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International*; Mai 2009, Seiten 1625–1632.
- [30] DASSAULT SYSTEMS: *Dymola - Multi-Engineering Modeling and Simulation*; URL: <http://www.modelon.com/products/dymola/> (besucht am 05.03.2014).
- [31] DORIGO, M. und DI CARO, G.: „Ant colony optimization: a new meta-heuristic“; in *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, 1999. CEC 99*. Band 2; 1999.
- [32] DÖRSAM, T. u. a.: „Die neue Spannungsebene 48 V im Kraftfahrzeug“; German; in *Energieeffiziente Antriebstechnologien*; herausgegeben von SIEBENPFEIFFER, W.; Band 1; ATZ / MTZ-Fachbuch; Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, Seiten 184–189; ISBN: 978-3-658-00789-8.
- [33] DR.-ING. H.C. F. PORSCHE AG: *Pressemitteilung: Weltpremiere: Starterbatterie in Lithium-Ionen-Technik*; November 2009; URL: <http://www.porsche.com/germany/aboutporsche/pressreleases/?pool=germany&id=2009-11-23-02> (besucht am 01.09.2013).
- [34] DROSSOS, A. u. a.: „Vernetzung und Komfortelektronik“; in *ATZ extra – Der neue SL von Mercedes-Benz*; Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, April 2012, Seiten 164–169.
- [35] EL-DWAIK, F. u. a.: „Die Elektromobilität bei BMW“; in *Elektronik im Kraftfahrzeug*; Band 2132; VDI-Bericht; VDI-Verlag, Düsseldorf, Oktober 2011, Seiten 21–36; ISBN: 978-3-18-092132-7.
- [36] EBERHART, R. und SHI, Y.: „Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization“; in *Evolutionary Programming VII*; herausgegeben von PORTO, V. u. a.; Band 1447; Lecture Notes in Computer Science; Springer, 1998, Seiten 611–616.

- [37] ERICKSON, R. und MAKSIMOVIC, D.: *Fundamentals of Power Electronics*; Power electronics; Springer, 2001; ISBN: 978-0-7923-7270-7.
- [38] FABIS, R.: „Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen“; Dissertation, Technische Universität Berlin; 2006.
- [39] FALSETT, R. u. a.: „Möglichkeiten und Chancen für den Einsatz von 12 V-Lithium-Ionen-Starter/Bordnetzbatterien im Kfz“; in *Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug III*; herausgegeben von BÄKER, B.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 91; Expert-Verlag, Renningen, April 2008, Seiten 37–50; ISBN: 978-3-8169-2819-5.
- [40] FLÖTTMANN, B.; WEGHAUS, L. und SCHÖLLMANN, M.: „Einsatz von DC/DC-Wandlern in Kraftfahrzeugen zur Reduzierung von CO₂-Emissionen“; in *VDI-Berichte*, Nr. 2000; VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 2007.
- [41] FREY, B. u. a.: „Die Zukunft des 14-Volt Bordnetzes“; in *Elektronik im Kraftfahrzeug*; VDI-Bericht, Nr. 1789; VDI-Verlag, Düsseldorf, September 2003, Seiten 813–831; ISBN: 978-3-18-091789-4.
- [42] FUTURE TECHNOLOGY DEVICES INTERNATIONAL: *FT232 USB UART IC*; 2012.
- [43] GARTEN, W.: *Bleiakkumulatoren*; VARTA-Fachbuchreihe; VARTA-Batterie-AG, 1974; ISBN: 978-3-18-419035-4.
- [44] GEHRING, R.: „Beitrag zur Untersuchung und Erhöhung der Spannungsstabilität des elektrischen Energiebordnetzes im Kraftfahrzeug“; Dissertation, Technische Universität München; 2013; ISBN: 978-3-8439-0874-0.
- [45] GILCH, M.: „Stabilisierung von Bordnetzsystemen in Mikrohybriden mit < 60 V Architekturen durch seriell oder parallel geschaltete Energiespeicher“; in *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement III*; herausgegeben von HOFF, C. und SIRCH, O.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 120; Expert-Verlag, Renningen, 2012, Seiten 190–197; ISBN: 978-3-8169-3114-0.
- [46] GLOVER, F. und KOCHENBERGER, G.: *Handbook of Metaheuristics*; International series in operations research & management science; Kluwer Academic Publishers, 2003; ISBN: 978-1-4020-7263-5.
- [47] GLOVER, F.: „Tabu search - Part I“; in *ORSA Journal on computing*, Jahrgang 1, Nummer 3, 1989; INFORMS; Seiten 190–206.
- [48] GLOVER, F.: „Tabu search - Part II“; in *ORSA Journal on computing*, Jahrgang 2, Nummer 1, 1990; INFORMS; Seiten 4–32.
- [49] GRAF, A.; KOSITZA, J. und RAITHEL, T.: „Architekturstudie zur Leistungsverteilung im Kfz“; in *ATZelektronik*; Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, März 2013, Seiten 194–197.

- [50] GROHMANN, D.; CIERULLIES, J. und HAJVAZOVIC, K.: „Bordnetz für Start-Stopp-Systeme“; in *ATZ extra – Die neue S-Klasse von Mercedes-Benz*; Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Juli 2013, Seiten 78–81.
- [51] GRZEMBA, A. und WENSE, H.-C. v. d.: *LIN-Bus : Systeme, Protokolle, Tests von LIN-Systemen, Tools, Hardware, Applikationen*; Elektronik; Franzis, Poing, 2005, 353 S. : Ill., graph. Darst. ISBN: 978-3-7723-4009-3.
- [52] GUMSTIX: *Computers-on-Modules*; URL: <http://www.gumstix.com> (besucht am 15.01.2014).
- [53] HALL, E. H.: „On a New Action of the Magnet on Electric Currents“; English; in *American Journal of Mathematics*, Jahrgang 2, Nummer 3, 1879; The Johns Hopkins University Press; pages; ISSN: 0002-9327.
- [54] HARTMANN, H.-D.: „Das 42-V-Bordnetz für Kraftfahrzeuge – Motivation und Innovation (Forschungsbericht)“; in *Forum Bordnetzarchitektur*; sci-worx GmbH, Hannover, Oktober 2000.
- [55] HENNEBERGER, G.: *Elektrische Motorausrüstung*; Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1990; ISBN: 978-3-528-04764-1.
- [56] HEROLD, P.; THALHAMMER, T. und GIETL, S.: „Die Integral Aktivlenkung: Das neue Lenksystem von BMW“; in *ATZ extra – Der neue BMW 7er*; Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, November 2008, Seiten 104–107.
- [57] HOHMANN, M.: „Ein synthetischer Ansatz zur Auslegung von Kfz-Bordnetzen unter Berücksichtigung dynamischer Belastungsvorgänge“; Dissertation, Technische Universität Ilmenau; 2010.
- [58] HU, J.: „Bewertung von DC-DC-Topologien und Optimierung eines DC-DC-Leistungsmoduls für das 42-V-Kfz-Bordnetz“; Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; Shaker, 2004; ISBN: 978-3-8322-3201-6.
- [59] HUDI, R. und GORONCY, J.: „Nicht alles, was zunächst cool oder hip ist, wird auch nachhaltig sein“; in *VDI nachrichten*, Jahrgang 65, Nummer 18, 6. Mai 2011; herausgegeben von FUCHS, W.; BRAUN, B. O. und SCHULTE, H.; VDI-Verlag, Düsseldorf; Seite 7; ISSN: 0042-1759.
- [60] HUMMEL, H. und SEDLMEIER, R.: „Das Bordnetz“; in *ATZextra – Der neue Audi A1*; Band 6/2010; Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Mai 2010, Seiten 97–100.
- [61] INTERNATIONAL RECTIFIER: *IR2181 - HIGH AND LOW SIDE DRIVER*; Datenblatt; 2004.
- [62] INTERNATIONAL RECTIFIER: *IRLS4030PbF - HEXFET (R) Power MOSFET*; Datenblatt; 2009.

- [63] JOSSEN, A. und WEYDANZ, W.: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen: 36 Tabellen*; Ubooks, 2006; ISBN: 978-3-939359-11-1.
- [64] JUNG, C.: „Dynamische Wechselwirkungen im 42-V-Kfz-Bordnetz: Charakterisierung, Modellierung, Systemanalyse“; Dissertation, Ruhr-Universität Bochum; Shaker, 2004; ISBN: 978-3-8322-3655-7.
- [65] KASSAKIAN, J. u. a.: „Automotive electrical systems circa 2005“; in *Spectrum, IEEE*, Jahrgang 33, Nummer 8, August 1996; Seiten 22–27; ISSN: 0018-9235.
- [66] KENNEDY, J. und EBERHART, R.: „Particle swarm optimization“; in *IEEE International Conference on Neural Networks, 1995*. Band 4; November 1995, Seiten 1942–1948.
- [67] KENNEDY, J. und EBERHART, R.: „A discrete binary version of the particle swarm algorithm“; in *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation., 1997 IEEE International Conference on*; Band 5; Oktober 1997, Seiten 4104–4108.
- [68] KENNEDY, J. u. a.: *Swarm Intelligence*; Evolutionary Computation Series; Morgan Kaufmann Publishers, 2001; ISBN: 978-1-55860-595-4.
- [69] KIEHNE, H.: *Battery Technology Handbook*; Electrical and computer engineering; Marcel Dekker, 2003; ISBN: 978-0-8247-5642-0.
- [70] KILLE, P. u. a.: „Der neue Phaeton – Das elektrische Bordnetz“; in *ATZ/MTZ-Sonderausgabe: VW Phaeton*, Nummer D58922, Juli 2002.
- [71] KIRKPATRICK, S.; VECCHI, M. u. a.: „Optimization by simulated annealing“; in *science*, Jahrgang 220, Nummer 4598, 1983; Washington; Seiten 671–680.
- [72] KLINGEBIEL, M.; BILDSTEIN, M. und ROBERT BOSCH GMBH STUTTGART UNTERNEHMENSBEREICH AUTOMOTIVE AFTERMARKET: *Bosch-Hybridantriebe, Brennstoffzellen, und alternative Kraftstoffe*; Fachwissen Kfz-Technik : Elektrik und Elektronik für Kfz; Christiani, 2008; ISBN: 978-3-86522-277-0.
- [73] KLÖTZL, J.: „Stabilität automobiler Leistungsbordnetze“; Dissertation, Universität der Bundeswehr München; Shaker, 2012; ISBN: 978-3-8440-1359-7.
- [74] KLÖTZL, J. und GERLING, D.: „An interleaved buck-boost-converter combined with a supercapacitor-storage for the stabilization of automotive power nets“; in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*; Chicago, IL, USA, September 2011.
- [75] KNORR, R. u. a.: „Stabilisierung des 12-V-Bordnetzes: Ultrakondensatoren in Start-Stopp-Systemen“; in *ATZelektronik*; Band 5/2010; Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, Oktober 2010, Seiten 48–53.
- [76] KOHLER, T. P.: „Prädiktives Leistungsmanagement in Fahrzeugbordnetzen“; Dissertation, Technische Universität München; 2013.

- [77] KOHLER, T. u. a.: „Experimental investigation on voltage stability in vehicle power nets for power distribution management“; in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*; September 2010, Seiten 1–6.
- [78] KORTE, B.; VYGEN, J. und RANDOW, R. von: *Kombinatorische Optimierung: Theorie und Algorithmen*; Springer-Lehrbuch Masterclass; Springer, 2012; ISBN: 978-3-642-25400-0.
- [79] KOUFATY, D. und MARR, D. T.: „Hypertreading technology in the netburst microarchitecture“; in *Micro, IEEE*, Jahrgang 23, Nummer 2, März-April 2003; Seiten 56–65; ISSN: 0272-1732.
- [80] KRENGEL, U.: *Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik: Für Studium, Berufspraxis und Lehramt*; vieweg studium; Aufbaukurs Mathematik; Vieweg+Teubner Verlag, 2005; ISBN: 978-3-8348-0063-3.
- [81] LAWRENZ, W.: *CAN Controller Area Network: Grundlagen und Praxis*; Hüthig Verlag, 2011; ISBN: 9783778529065.
- [82] LINDEN, D. und REDDY, T.: *Handbook of batteries*; McGraw-Hill handbooks; McGraw-Hill, 2002; ISBN: 978-0-07-135978-8.
- [83] LINDENMAIER, J.: „Untersuchung eines von Doppelschichtkondensatoren unterstützten Zweispannungsbordnetzes für Mikro-Hybrid-Fahrzeuge“; Dissertation, Universität Ulm; 2010.
- [84] LINZEN, D.: „Impedance-based Loss Calculation and Thermal Modeling of Electrochemical Energy Storage Devices for Design Considerations of Automotive Power Systems“; Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; Shaker, 2006; ISBN: 978-3-8322-5706-4.
- [85] LUTZ, C.: „Energiemanagement in der EE-Gesamtarchitektur“; in *Energiemanagement und Bordnetze II*; herausgegeben von SCHÖLLMANN, M.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 71; Expert-Verlag, Renningen, 2007, Seiten 133–141; ISBN: 978-3-8169-2649-8.
- [86] MATHWORKS: *Matlab[®] - The Language of Technical Computing*; URL: www.mathworks.de (besucht am 05.03.2014).
- [87] MATOUKA, M.: „Design Considerations for Higher Voltage Automotive Electrical Systems“; in *SAE Paper 911654, Proceedings of the SAE Future Transportation Technology Conference and Exposition, Portland, OR, USA, August*; 1991.
- [88] MATT, J.-C. und DE-BONO, D.: „Mikro-Mildhybrid mit Ultrakondensator-Technik“; German; in *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Jahrgang 110, Nummer 12, 2008; Springer Automotive Media; Seiten 1092–1101; ISSN: 0001-2785.
- [89] MAURACHER, P.: „Modellbildung und Verbundoptimierung bei Elektrostraßenfahrzeugen“; Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; 1996.

- [90] MAXWELL TECHNOLOGIES: *BC Series Ultracapacitors*; Datenblatt; Document Number: 1017105.4; 2013.
- [91] MAXWELL TECHNOLOGIES: *HC Series Ultracapacitors*; Datenblatt; Document Number: 1013793.9; 2013.
- [92] MAXWELL TECHNOLOGIES: *K2 Series Ultracapacitors*; Datenblatt; Document Number: 1015370.4; 2013.
- [93] MAXWELL TECHNOLOGIES GMBH: *Infographic*; URL: <http://www.maxwell.com/ultracapacitors/maxwell-ultracapacitors-infographic.pdf> (besucht am 05.09.2013).
- [94] MEISSNER, E. und RICHTER, G.: „Battery Monitoring and Electrical Energy Management: Precondition for future vehicle electric power systems“; in *Journal of Power Sources*, Jahrgang 116, Nummer 1-2, 2003; Seiten 79–98; ISSN: 0378-7753.
- [95] MICHEL, H.-U.; BARTHEL, A. und WALLA, G.: „Jedes Watt zählt - Intelligentes Energie- und Leistungs-Management für die Autos von morgen“; in *Elektronik Automotive*; Band vol. 5/2012; May, 2012; 2012.
- [96] MILLER, J.: *Ultracapacitor Applications*; IET power and energy series; Institution of Engineering and Technology, 2011; ISBN: 978-1-84919-071-8.
- [97] MILLER, J. M. und NICASTRI, P. R.: „The next generation automotive electrical power system architecture: issues and challenges“; in *Proceedings of the 17th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*; Oktober 1998, Seiten I15/1–I15/8.
- [98] MODELICA ASSOCIATION: *Modelica[®] - A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling*; URL: www.modelica.org (besucht am 05.03.2014).
- [99] NALBACH, M. u. a.: „Energiespeicher und Leistungselektronik – Elemente für ein stabiles und zuverlässiges Bordnetz“; in *Energieeinsparung durch Elektronik im Fahrzeug*; VDI-Bericht, Nr. 2033; VDI-Verlag, Düsseldorf, Oktober 2008, Seiten 173–183; ISBN: 978-3-18-092033-7.
- [100] NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION: *LabVIEW User Manual*; 2003; URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf> (besucht am 05.06.2013).
- [101] NIKNEJAD, A. u. a.: „Systematische Beurteilung von Architekturen für Hochleistungsbordnetze“; in *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement III*; herausgegeben von HOFF, C. und SIRCH, O.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 120; Expert-Verlag, Renningen, 2012, Seiten 178–189; ISBN: 978-3-8169-3114-0.
- [102] NIKNEJAD, A. u. a.: „Systematische Beurteilung von Architekturen für Hochleistungsbordnetze“; in *Tagung Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement*; April 2012.

- [103] NILSSON, D. K.; PHUNG, P. H. und LARSON, U. E.: „Vehicle ECU classification based on safety-security characteristics“; in *Road Transport Information and Control (RTIC) and ITS United Kingdom Members' Conference*; Mai 2008, Seiten 1–7.
- [104] PASSINO, K.: „Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control“; in *Control Systems, IEEE*, Jahrgang 22, Nummer 3, Juni 2002; Seiten 52–67; ISSN: 1066-033X.
- [105] PERREAULT, D. und CALISKAN, V.: „Automotive power generation and control“; in *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Jahrgang 19, Nummer 3, Mai 2004; Seiten 618–630; ISSN: 0885-8993.
- [106] PFALLER, S. u. a.: „Intelligentes Energiemanagement und effizienter Generator“; German; in *ATZextra*, Jahrgang 15, Nummer 11, 2010; Springer Automotive Media; Seiten 36–41; ISSN: 2195-1454.
- [107] PFEFFER, P. und HARRER, M.: „Elektrohydraulische Lenksysteme (EPHS)“; in *Lenkungshandbuch*; herausgegeben von PFEFFER, P. und HARRER, M.; Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011, Seiten 325–344; ISBN: 978-3-8348-8167-0.
- [108] PILATOWICZ, G. u. a.: „Simulation of Ageing and Cranking Capability of Lead-Acid Batteries in Automotive Applications“; in *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement IV*; herausgegeben von BRILL, U.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 130; Expert-Verlag, Renningen, 2013, Seiten 427–449; ISBN: 978-3-8169-2649-8.
- [109] POLENOV, D.: „DC/DC-Wandler zur Einbindung von Doppelschichtkondensatoren in das Fahrzeugenergiebordnetz“; Dissertation, Technische Universität Chemnitz; Logos Verlag Berlin, 2010; ISBN: 978-3-8325-2455-5.
- [110] POLENOV, D.; PRÖBSTLE, H. und STÖRMER, A. O.: „Integration of Transient High Power Loads“; in *Energy Management & Wire Harness Systems*; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 117; Expert Verlag, Renningen, März 2011, Seiten 182–190; ISBN: 978-3-8169-3061-7.
- [111] POLENOV, D.; REITER, T. und PRÖBSTLE, H.: „Optimierung der Fahrzeugenergieversorgung durch adaptive Bordnetzunterstützung“; in *Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug IV*; herausgegeben von BÄKER, B.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 105; Expert-Verlag, Renningen, 2009, Seiten 27–38; ISBN: 978-3-8169-2928-4.
- [112] POLENOV, D. u. a.: „Integration of supercapacitors as transient energy buffer in automotive power nets“; in *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*; Aalborg, DK, September 2007, Seiten 1–10.

- [113] POLENOV, D. u. a.: „Adaptive Bordnetzunterstützung für Kraftfahrzeuge mit Auto-Start-Stopp-Funktion“; in *Elektrische Leistungsbordnetze und Komponenten von Straßenfahrzeugen 1 (ELKS)*; herausgegeben von VERKEHR BRAUNSCHWEIG E.V., G. für; ITS Niedersachsen, Braunschweig, Oktober 2008, Seiten 97–109; ISBN: 978-3-937655-17-8.
- [114] PRÖBSTLE, H.; NEUDECKER, R. und SIRCH, O.: „Power Supply in Future Start-Stop-Systems“; in *Energy Management & Wire Harness Systems*; herausgegeben von SCHÖLLMANN, M. und HOFF, C.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 117; Expert-Verlag, Renningen, 2011, Seiten 146–162; ISBN: 978-3-8169-3061-7.
- [115] PRÖBSTLE, H.; POLENOV, D. und SIRCH, O.: „Stabilisierung der Energieversorgung im Kraftfahrzeug“; in *Elektrische Leistungsbordnetze und Komponenten von Straßenfahrzeugen 1 (ELKS)*; herausgegeben von VERKEHR BRAUNSCHWEIG E.V., G. für; ITS Niedersachsen, Braunschweig, Oktober 2008, Seiten 59–73; ISBN: 978-3-937655-17-8.
- [116] PRÖBSTLE, H. u. a.: „Dynamische Bordnetzunterstützung im Kraftfahrzeug“; in *Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug III*; herausgegeben von BÄKER, B.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 91; Expert-Verlag, Renningen, April 2008, Seiten 25–36; ISBN: 978-3-8169-2819-5.
- [117] PRUMMER, M. und AUER, J.: „Ultrakondensatoren: Hocheffiziente Energiespeicher in modernen Antriebssystemen“; in *Energiemanagement und Bordnetze II*; herausgegeben von SCHÖLLMANN, M.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 71; Expert-Verlag, Renningen, 2007, Seiten 142–156; ISBN: 978-3-8169-2649-8.
- [118] RAKOPOULOS, C. u. a.: „The Effect of Various Dynamic, Thermodynamic and Design Parameters on the Performance of a Turbocharged Diesel Engine Operating under Transient Load Conditions“; in *SAE World Congress & Exhibition, Detroit, MI, USA*; SAE International, Warrendale, PA, USA, März 2004, Seiten 189–204.
- [119] RECH, B. und BÄKER, B.: „Verfahren zur Ansteuerung elektrischer Verbraucher“; Schutzrecht DE19838248; Patentinhaber: VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg; veröffentlicht am 2. März 2000.
- [120] REIF, K.: *Batterien Und Bordnetze*; Automobilelektronik lernen; Springer-Verlag GmbH, 2012; ISBN: 978-3-8348-2050-1.
- [121] REIF, K. und NOREIKAT, K.: *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*; ATZ/MTZ-Fachbuch; Vieweg Verlag, Friedr. & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2012; ISBN: 978-3-8348-2050-1.
- [122] RUMMICH, E.: *Energiespeicher: Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen*; Reihe Technik; Expert-Verlag GmbH, 2009; ISBN: 978-3-8169-2736-5.

- [123] SCHINDLER, M. und HALLMANNSEGGER, M.: „Intelligent Combination of Different Energy Storage Technologies for Future Vehicle Power Nets“; in *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement IV*; herausgegeben von BRILL, U.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 130; Expert-Verlag, Renningen, 2013, Seiten 450–463; ISBN: 978-3-8169-2649-8.
- [124] SCHMIDT, E. und MAIER, R.: „Technologie-Trends geprägt durch die neuen Bordnetzkonzepte“; in *Elektronik im Kraftfahrzeug*; VDI-Bericht, Nr. 1287; VDI-Verlag, Düsseldorf, September 1996, Seiten 337–350; ISBN: 978-3-18-091287-5.
- [125] SCHÖNER, H.: „Über die Auswertung des elektrischen Verhaltens von Bleibatterien beim Entladen und Laden“; Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; 1988.
- [126] SCHÖTTLE, R.; SCHMUCKER, C. und KAISER, K.-H.: „Einrichtung zur Energieverteilung in einem Kraftfahrzeug“; Schutzrecht DE19745849; Patentinhaber: ROBERT BOSCH GMBH, Stuttgart; veröffentlicht am 22. April 1999.
- [127] SCHÖTTLE, R. und THREIN, G.: „Elektrisches Energiebordnetz: Gegenwart und Zukunft“; in *Elektronik im Kraftfahrzeug*; VDI-Bericht, Nr. 1547; VDI-Verlag, Düsseldorf, Oktober 2000, Seiten 449–475; ISBN: 978-3-18-091547-0.
- [128] SHEN, Z. J. u. a.: „Optimal Power Management and Distribution in Automotive Systems“; in *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*; herausgegeben von EMADI, A.; Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA, 2005, Seiten 97–114; ISBN: 978-0-8247-2361-3.
- [129] SHI, Y. und EBERHART, R.: „Parameter selection in particle swarm optimization“; in *Evolutionary Programming VII*; Band 1447; Lecture Notes in Computer Science; Springer Berlin Heidelberg, 1998, Seiten 591–600; ISBN: 978-3-540-64891-8.
- [130] SHI, Y. und EBERHART, R.: „Empirical study of particle swarm optimization“; in *Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on*; Band 3; 1999, 3 vol. (xxxvii+2348).
- [131] SICKAU, N.: „Auswirkungen von alternativen Leitungsmedien und Querschnitten auf die Kabelsatzkonfektion“; in *12. Kooperationsforum Bordnetze, München*; 2009.
- [132] SIEGLIN, E.: „Beitrag zur Energieversorgung innovativer Drive-by-Wire-Fahrzeugkonzepte“; Dissertation, Technische Universität Dresden; 2008; ISBN: 978-3-8169-2769-3.
- [133] SINCERO, G.; CROS, J. und VIAROUGE, P.: „Arc Models for Simulation of Brush Motor Commutations“; in *Magnetics, IEEE Transactions on*, Jahrgang 44, Nummer 6, Juni 2008; Seiten 1518–1521; ISSN: 0018-9464.

- [134] SOUCAZE-GUILLOUS, B.; WIESER, C. und AUER, J.: „Der Ultrakondensator: Eine Schlüsselkomponente für erfolgreiches Energiemanagement“; in *Energiemanagement und Bordnetze III*; herausgegeben von SCHÖLLMANN, M.; HOFF, C. und SCHRIEK, J.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 109; Expert-Verlag, Renningen, 2009, Seiten 189–197; ISBN: 978-3-8169-2957-4.
- [135] TABUCHI, T.: „12 V Lithium-Ion Starter Battery“; in *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement IV*; herausgegeben von BRILL, U.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 130; Expert-Verlag, Renningen, 2013, Seiten 473–474; ISBN: 978-3-8169-2649-8.
- [136] TEXAS INSTRUMENTS: *OMAP3513/03 Applications Processor*; URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/omap3503.pdf> (besucht am 20.01.2014).
- [137] MICROCHIP TECHNOLOGY INC.: *dsPIC30F1010/202X - 28/44-Pin High-Performance Switch Mode Power Supply Digital Signal Controllers*; Datenblatt; 2006.
- [138] USB IMPLEMENTERS FORUM, INC.: *Universal Serial Bus Revision 2.0 specification*; Spezifikation; URL: http://www.usb.org/developers/docs/usb20_docs/ (besucht am 04.02.2014).
- [139] VEERAMACHANENI, K.; OSADCIW, L. und KAMATH, G.: „Probabilistically Driven Particle Swarms for Optimization of Multi Valued Discrete Problems : Design and Analysis“; in *Swarm Intelligence Symposium, 2007. SIS 2007. IEEE*; April 2007, Seiten 141–149.
- [140] VISCIDO, T.: „Entwicklung und Metrisierung von Energiebordnetzen für zukünftige Fahrzeuge“; Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; FKA, 2012; ISBN: 978-3-940374-58-5.
- [141] WAGEMANN, R.: „Elektronische Schalter im Bordnetz“; in *12. Kooperationsforum Bordnetze, München*; 2009.
- [142] WALLENTOWITZ, H. und REIF, K.: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen - Komponenten - Systeme - Anwendungen*; ATZ/MTZ-Fachbuch; Vieweg+Teubner Verlag, 2010; ISBN: 978-3-8348-0700-7.
- [143] WEBER, R.: „Auslegung des 12 V-Energiebordnetzes in batterie-elektrischen Fahrzeugen“; in *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen II*; herausgegeben von SIRCH, O.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 112; Expert-Verlag, Renningen, 2010, Seiten 159–171; ISBN: 978-3-8169-3010-5.
- [144] WEGHAUS, L.: „DC/DC-Wandler im Kraftfahrzeug“; in *Energiemanagement und Bordnetze II*; herausgegeben von SCHÖLLMANN, M.; Haus der Technik Fachbuch, Nr. 71; Expert-Verlag, Renningen, 2007, Seiten 91–104; ISBN: 978-3-8169-2649-8.
- [145] WEICKER, K.: *Evolutionäre Algorithmen*; Leitfäden der Informatik; Vieweg+Teubner Verlag, 2007; ISBN: 978-3-8351-0219-4.

- [146] WETZEL, H.: „Physisches Bordnetz als Architekturtreiber“; in *12. Kooperationsforum Bordnetze, München*; 2009.
- [147] WILDI, T.: *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*; Pearson Prentice Hall, 2006; ISBN: 978-1-292-02458-5.
- [148] WILLIAMS, G. A. und HOLT, M. J.: „Vehicle electrical power supply systems and their impact on system design“; in *Proc. of the Institution of Mech. Eng. Part D, Vol 206*; 1992.
- [149] XILINX: *Spartan-3AN FPGA Family Data Sheet*; URL: http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds557.pdf (besucht am 20.01.2014).
- [150] ZUBIETA, L. und BONERT, R.: „Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications“; in *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Jahrgang 36, Nummer 1, 2000; Seiten 199–205; ISSN: 0093-9994.