

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fachgebiet Energiewandlungstechnik

---

# Zur Optimierung und Validierung von Managementsystemen für elektrische Energiebordnetze im Kraftfahrzeug

Michael Harald Winter

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: Prof. Dr. sc. techn. Andreas Herkersdorf

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog
2. Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz

Die Dissertation wurde am 15.01.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 11.12.2018 angenommen.

# Kurzfassung

Die Anzahl elektrischer Komponenten in modernen Kraftfahrzeugen ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Zusätzlich zur erhöhten Dauer- und Spitzenleistung haben auch die Anforderungen an das Bordnetz zugenommen. So soll das Energiebordnetz neben einer stabilen Spannungsversorgung auch möglichst energieeffizient betrieben werden und somit einen Beitrag zur  $CO_2$ -Reduktion leisten. Diesen Anforderungen wird mit immer komplexeren Energiemanagementsystemen begegnet, die teilweise auch auf dezentrale und autonome Mechanismen setzen. Vor dem Hintergrund einer wachsenden Variantenvielfalt und der Forderung nach kurzen Entwicklungszyklen ist ein durchgängiger Entwicklungsprozess notwendig.

In dieser Dissertation wird eine durchgängige Methode zur simulationsbasierten Optimierung der betriebsstrategischen Parameter eines Energie- und Leistungsmanagements für das Energiebordnetz eines Kraftfahrzeugs mit anschließender prüfstandsgestützter Validierung der Optimierungsergebnisse entwickelt.

Es wird eine Simulation aufgebaut, die es ermöglicht, ein Energiemanagementsystem in Interaktion mit den Bordnetzkomponenten zu untersuchen. Dazu werden physikalische Modelle der Verbraucher, des Generators und der Batterie entwickelt. Das Energiemanagementsystem ist nach kybernetischen Prinzipien implementiert. Anstatt einer zentralen Steuerung verfügen die Bordnetzkomponenten über eine gewisse Eigenintelligenz und kommunizieren über generische Schnittstellen mit dem Hauptmanagement.

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wird ein Bordnetzprüfstand nach einem emulationsbasierten Konzept entwickelt und aufgebaut. Dieser erlaubt es, unter Verwendung der *Power-Hardware-in-the-Loop*-Methode, die Simulationsmodelle der Bordnetzkomponenten mit leistungselektronischen Aktoren zu koppeln. Somit wird es möglich, Verbraucher, Batterien und Generatoren mit sehr hoher Abbildungsqualität auf dem Bordnetzprüfstand zu emulieren. Um einen nahtlosen Übergang von der Simulation auf den Prüfstand zu gewährleisten, wird der Exportprozess automatisiert.

Abschließend wird die entwickelte Methode exemplarisch auf eine Optimierung der betriebsstrategischen Parameter des implementierten Energiemanagements angewandt. Es wird eine multikriterielle Optimierung nach den Kriterien Energieeffizienz, Batteriebelastung und Spannungsstabilität vorgenommen. Unter Verwendung metaheuristischer Optimierungsverfahren wird die Paretomenge bestimmt und diverse Punkte der Menge auf dem Bordnetzprüfstand validiert.

# Abstract

The number of electric components in modern vehicles strongly increased over the past years. Besides the risen electric continuous power and electric peak power, the requirements concerning the automotive power net have grown. In addition to its main task, to provide a robust power supply, the automotive power shall be as energy efficient as possible in order to reduce the  $CO_2$  emissions. To meet these challenges, more complex energy management systems have been introduced, some based on decentralised and autonomous mechanisms. Facing the growing number of variants and the requirement of short development cycles a consistent development process is essential.

In this thesis a continuous method for a simulation-based optimization of the operational strategic parameters of an energy and power management system for an automotive power net with a subsequent test bench-based validation of the results is presented.

A simulation is set up, which allows the analysis of an energy management system and its interaction with the power net's components. For this purpose, physical models of the electric consumers, the alternator and the battery are developed. The energy management system is implemented in accordance to cybernetic principles. Instead of a central control, the components of the automotive power net are equipped with an integrated intelligence system and communicate via generic interfaces with the central management.

To validate the simulation results an automotive power net test bench is developed on the basis of an emulation-based approach. Thus, the simulation models of the power net's components can be linked to power-electronic actors using the *Power-Hardware-in-the-Loop*-method. Hence, electric consumers, alternators and batteries can be emulated on the test bench with a particularly high emulation quality. To guarantee a seamless transition from the simulation to the power net test bench, the export process is automated.

Finally, this method is applied exemplarily to an optimization of the operational strategic parameters of the implemented energy management. A multi-objective optimization taking into account energy efficiency, battery strain, and voltage stability is carried out. Using metaheuristic optimization techniques the Pareto set is determined and diverse elements of the set are validated using the automotive power net test bench.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Ziele der Arbeit . . . . .	2
1.3	Gliederung . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>4</b>
2.1	Energiebordnetze im Kraftfahrzeug . . . . .	4
2.1.1	Komponenten des Energiebordnetzes . . . . .	4
2.1.2	Topologie . . . . .	7
2.2	Management elektrischer Energiebordnetze . . . . .	8
2.2.1	Aufgaben und Lösungsansätze . . . . .	8
2.2.2	Kybernetisches Energie- und Leistungsmanagement . . . . .	9
2.3	Echtzeittestmethoden für technische Systeme . . . . .	10
2.3.1	Software-in-the-Loop (SiL) . . . . .	10
2.3.2	Hardware-in-the-Loop (HiL) . . . . .	11
2.3.3	Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) . . . . .	11
2.3.4	Anwendung von PHIL zur Validierung verteilter Energiesysteme . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Modellbildung und Simulation</b>	<b>14</b>
3.1	Schnittstellen- und Strukturierungskonzept der Komponentenmodelle . . . . .	15
3.2	Verbraucher . . . . .	18
3.2.1	Ohmsche Verbraucher . . . . .	18
3.2.2	Leistungsverbraucher . . . . .	20
3.2.3	Dynamische Hochleistungsverbraucher . . . . .	23
3.2.4	Schnittstelle zum Energie- und Leistungsmanagement . . . . .	25
3.3	Erzeuger . . . . .	27
3.3.1	Klauenpolgenerator . . . . .	27
3.3.2	Schnittstelle zum Energie- und Leistungsmanagement . . . . .	30
3.4	Speicher . . . . .	31
3.4.1	Blei-Säure-Batterie . . . . .	31
3.4.2	Lithium-Eisenphosphat-Batterie . . . . .	32
3.4.3	Schnittstelle zum Energie- und Leistungsmanagement . . . . .	33
3.5	Fahrzyklus und Kundeninteraktion . . . . .	34
3.6	Kabelbaum . . . . .	34

3.7	Energie- und Leistungsmanagement . . . . .	36
3.7.1	Hierarchieebene 0 – Komponenten . . . . .	37
3.7.2	Hierarchieebene 1 – Komponentengruppen . . . . .	37
3.7.3	Hierarchieebene 2 – 12 V-Bordnetz . . . . .	38
3.8	Systemsimulation Bordnetz und Energiemanagement . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Bordnetzprüfstand</b>	<b>44</b>
4.1	Bestandsanalyse und Konzeptentwicklung . . . . .	46
4.1.1	Ausgangssituation . . . . .	46
4.1.2	Neue Anforderungen . . . . .	47
4.1.3	Analyse der bestehenden Prüfstandsinfrastruktur . . . . .	49
4.1.4	Neues Prüfstandskonzept . . . . .	49
4.2	Umsetzung des neuen Prüfstandskonzepts . . . . .	50
4.2.1	Analyse der Anforderungen an die Emulationssysteme . . . . .	51
4.2.2	Verbraucheremulation und Energiemanagement . . . . .	55
4.2.3	Generatorprüfstand und Generatoremulation . . . . .	57
4.2.4	Batterieemulation . . . . .	59
4.2.5	48 V-Ebene . . . . .	60
4.3	Validierung der Emulationssysteme . . . . .	61
4.3.1	Verbraucheremulation . . . . .	63
4.3.2	Generatoremulation . . . . .	64
4.3.3	Batterieemulation . . . . .	65
4.4	Automatisierung des Modellexports . . . . .	66
4.5	Zusammenfassung des Bordnetzprüfstandes . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Optimierung und Validierung der betriebsstrategischen Parameter</b>	<b>71</b>
5.1	Definition des Optimierungsproblems . . . . .	71
5.1.1	Optimierungskriterien . . . . .	72
5.1.2	Zielfunktion und Kopplung an den Optimierungsalgorithmus . . . . .	76
5.2	Auswahl der Optimierungsalgorithmen . . . . .	76
5.3	Drehzahlabhängige Betriebsstrategie . . . . .	79
5.3.1	Parameter . . . . .	79
5.3.2	Optimierungsergebnisse . . . . .	80
5.3.3	Validierung ausgewählter Punkte . . . . .	82
5.4	Prädiktive Betriebsstrategie . . . . .	86
5.4.1	Parameter . . . . .	86
5.4.2	Optimierungsergebnisse . . . . .	87
5.4.3	Validierung ausgewählter Punkte . . . . .	89
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>93</b>
6.1	Ergebnisse dieser Arbeit . . . . .	93
6.2	Ausblick . . . . .	94

<b>Publikationsliste</b>	<b>96</b>
<b>Liste betreuter Arbeiten</b>	<b>97</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>103</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>104</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>105</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Bedingt durch die ständige Neu- und Weiterentwicklung von Sicherheits- und Komfortfunktionen in der Fahrzeugtechnik, nimmt die Anzahl der verbauten elektronischen Komponenten in modernen Kraftfahrzeugen laufend zu. Auch der Ersatz vormals rein mechanisch angetriebener Komponenten durch elektrische Antriebe bestärkt diesen Trend und geht einher mit einer stetigen Zunahme an installierter elektrischer Dauer- und Spitzenleistung.

Die elektrische Versorgungsinfrastruktur, bestehend aus Generator, Batterie und Leitungssatz, ist jedoch nicht in gleichem Maße gewachsen wie die installierte elektrische Leistung. Bedingt durch die stärkere Fokussierung auf Energie- und Ressourceneffizienz werden Überdimensionierungen, so weit möglich, vermieden und die bestehenden Komponenten maximal ausgereizt.

Um den kleiner werdenden Reserven in Energie- und Leistungsbereitstellung zu begegnen, finden immer komplexere Managementsysteme Einzug in das Kraftfahrzeug. Diese Funktionen versuchen die oft auch widersprüchlichen Ziele, wie z.B. Energieeffizienz, Verfügbarkeit oder Batteriebelastung, in Einklang zu bringen.

Bei einem modernen Energie- und Leistungsmanagementsystem handelt es sich nicht um eine einfache Teilkomponente, sondern um die Steuerung eines über das gesamte Fahrzeug verteilten Systems, dessen Komponenten über das Energiebordnetz untereinander wechselwirken.

Aufgrund der Vielzahl, teils sehr unterschiedlicher Komponenten, stellt die Konzeptionierung und Implementierung eines Energiemanagementsystems somit eine große Herausforderung dar. Dieser wird durch den Einsatz moderner Programme zur Simulation physikalischer Systeme begegnet, welche oft auch Möglichkeiten für Parameterstudien und Optimierungen mit sich bringen. Naturgemäß steht und fällt die Aussagekraft einer solchen Simulation mit den verwendeten Simulationsmodellen der Bordnetzkomponenten.

Im Gegensatz zu vielen anderen Komponenten und Funktionen im Kraftfahrzeug kann ein fundierter Test bzw. eine Validierung eines Energie- und Leistungsmanagementsystems erst bei Verfügbarkeit eines Versuchsträgers und damit relativ spät im Entwicklungsprozess durchgeführt werden.

## 1.2 Ziele der Arbeit

Die Einleitung im vorangegangenen Abschnitt verdeutlicht eine Lücke im derzeitigen Entwicklungsprozess von Energie- und Leistungsmanagementsystemen für Energiebordnetze in modernen Kraftfahrzeugen zwischen der simulationsbasierten Funktionsentwicklung und dem erst späten Test im Versuchsträger.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zu einem durchgängigeren Entwicklungsprozess zu leisten. Dazu soll eine Methode erarbeitet werden, welche eine prüfstandsgestützte Validierung eines simulativ implementierten und optimierten Energiemanagements ermöglicht. Neben dem Einsatz realer Komponenten soll auch die Möglichkeit gegeben sein, die Modelle der Bordnetzkomponenten aus einer Bordnetzsimulation mit leistungselektronischen Aktoren zu koppeln, um somit das Verhalten dieser Komponenten zu emulieren. Dies ermöglicht eine vereinfachte Durchführbarkeit von Parameterstudien, beispielsweise mit verschiedenen Generator- oder Batteriegrößen. Zudem können auf diese Art Komponenten am Gesamtsystem Energiebordnetz getestet werden, bevor sie physisch vorhanden sind.

Für diese Zielsetzung soll eine bestehende Bordnetzsimulation [119] an die neuen Anforderungen angepasst werden. Dafür müssen neue physikalische Simulationsmodelle der Bordnetzkomponenten erstellt werden, die auch auf einem Echtzeitsystem, mit einer der jeweiligen Komponente angemessenen Frequenz, ausführbar sind. Zudem sollen alle Simulationsmodelle der Bordnetzkomponenten eine definierte Schnittstelle zum Energie- und Leistungsmanagement aufweisen, über welche sie ihren aktuellen Status melden und Befehle empfangen können.

Zudem soll für die Validierung der erarbeiteten Methode ein vereinfachtes Energiemanagementsystem implementiert werden, das eine einfache, parametrierbare Betriebsstrategie beinhaltet. Dieses ist in seiner Grundstruktur angelehnt an die parallel laufenden Arbeiten zur Umsetzung eines kybernetischen Energie- und Leistungsmanagementsystems [40, 41, 42], basierend auf dem *Viable System Model*.

Die Systemsimulation aus Bordnetzkomponenten und parametrierbarem Energiemanagement soll in der Folge mit einem Optimierungsalgorithmus gekoppelt werden, der die Parameter der Betriebsstrategie nach geeigneten Kriterien optimiert.

Die so optimierte Betriebsstrategie soll ohne weiteren Implementierungsaufwand auf einem bestehenden Bordnetzprüfstand [45] validiert werden können. Dazu muss dieser um entsprechende Emulationsfähigkeiten erweitert und der Exportprozess automatisiert werden.

Nicht betrachtet werden dagegen eine vertiefte und anwendungsnähere Implementierung des Energie- und Leistungsmanagements, eine Optimierung der Parameter der Bordnetzkomponenten, eine Prädiktion von Energie- oder Leistungsverläufen sowie Veränderungen in der Topologie, die sich durch den Einsatz einer zweiten Spannungsebene von 48 V ergeben.



## 1.3 Gliederung

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundlagen zu Energiebordnetzen im Kraftfahrzeug, Energiemanagementsystemen und Echtzeittestmethoden gelegt und jeweils aktuelle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten aufgegriffen.

In Kapitel 3 wird ein einheitliches Schnittstellen- und Strukturierungskonzept für die Simulationsmodelle der elektrischen Bordnetzkomponenten eingeführt. Anschließend werden die verwendeten Modelle für die elektrischen Verbraucher, den Generator und die Bordnetzatterie beschrieben. Zudem wird die Implementierung des Energiemanagements vorgestellt und alle Komponenten werden zu einer Systemsimulation kombiniert.

Kapitel 4 beginnt mit einer Bestandsanalyse der bestehenden Prüfstandslandschaft und einer Konzeptentwicklung der notwendigen Umstrukturierungsmaßnahmen. Darauf basierend werden die einzelnen Teilsysteme zur Emulation der Bordnetzkomponenten beschrieben und die Abbildungsqualität validiert.

Aufbauend auf die Bordnetzsimulation und den neu strukturierten Bordnetzprüfstand wird in Kapitel 5, nach der Definition des Optimierungsproblems und der Optimierungskriterien, eine Parameteroptimierung durchgeführt. Einzelne Punkte der Optimierungsergebnisse werden anschließend auf dem Bordnetzprüfstand validiert.

Abschließend werden in Kapitel 6 eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten gegeben.

# 2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen und der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Fahrzeugbordnetze – insbesondere im Hinblick auf die verwendeten Komponenten und die prinzipielle Topologie – erläutert. Im nächsten Schritt wird auf das Management elektrischer Energiebordnetze eingegangen, um dann im dritten Teil des Kapitels verschiedene Echtzeittestmethoden zu betrachten.

## 2.1 Energiebordnetze im Kraftfahrzeug

Der grundlegende Aufbau moderner Bordnetze hat sich in den vergangenen Jahrzehnten kaum verändert. Über einen Kabelbaum sind alle Komponenten in einer baumartigen Struktur verbunden [111]. Der Begriff Bordnetz beinhaltet sowohl die elektrische Energieversorgung als auch die Busleitungen zur Kommunikation zwischen den einzelnen Steuergeräten. Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit dem Energiebordnetz, also dem Teil des Bordnetzes, der für die elektrische Energieversorgung zuständig ist.

### 2.1.1 Komponenten des Energiebordnetzes

Die an ein Energiebordnetz angeschlossenen Komponenten können hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften in die drei Gruppen der Verbraucher, Erzeuger und Speicher eingeteilt werden.

#### Verbraucher

Die Anzahl elektrischer Verbraucher im Bordnetz eines konventionellen Kraftfahrzeugs hat in den vergangenen Jahrzehnten stark zugenommen und steigt nach wie vor an. Ein aktuelles Fahrzeug der Oberklasse weist eine Anzahl von ca. 170 E/E-Komponenten<sup>1</sup> auf, die alle mit Energie versorgt werden müssen [6]. Mehrere Gründe sind für diese Entwicklung verantwortlich.

---

<sup>1</sup>„E/E“ bezeichnet die elektrischen und elektronischen Aspekte des Kraftfahrzeugs [111].

Zum einen sind seit der Einführung des Antiblockiersystems in den 1980er Jahren eine Vielzahl an weiteren Fahrerassistenzsystemen hinzugekommen. Diese lassen sich mittlerweile nicht mehr einzelnen Steuergeräten zuordnen. Vielmehr wird über eine Vielzahl an Sensoren laufend das Umfeld des Fahrzeugs erfasst, die aktuelle Fahrzeugsituation bewertet und über entsprechende Aktorik die gewünschte Assistenzfunktion realisiert [14]. Im Hinblick auf ihre elektrischen Eigenschaften ist die Sensorik eher den Konstantleistungsverbrauchern zuzuordnen, wohingegen es sich bei der Aktorik meist um geregelte elektrische Maschinen handelt, die bei Eingriffen hohe elektrische Leistungen in kurzer Zeit benötigen. Aufgrund ihrer Sicherheitsrelevanz ist es nicht denkbar, diese Systeme abzuschalten oder in ihrer Funktionalität bewusst einzuschränken. Insbesondere im Hinblick auf die derzeit in der Entwicklung befindliche Technologie des hochautomatisierten Fahrens ist in diesem Bereich eine weitere starke Zunahme, vor allem im Bereich der Sensorik und der Recheneinheiten, zu erwarten. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass Komponenten, die Teil einer automatisierten Fahrfunktion sind, in einem hochautomatisierten / autonomen Fahrzeug auch nachweisbar ausfallsicher mit elektrischer Energie versorgt werden müssen.

Zudem ist eine starke Zunahme von Komfort- und Infotainmentsystemen zu verzeichnen. In diese Kategorie fallen beispielsweise Heizsysteme, Kühlschränke, Lüfter, Displays und viele ähnliche Komponenten. Der Anteil an elektronischen Systemen an der gesamten Wertschöpfung übersteigt mittlerweile 30 % [21]. Diese Systeme sind zwar nicht sicherheitsrelevant, jedoch wird ein Ausfall oder eine merkliche Funktionseinschränkung vom Kunden als mindere Qualität wahrgenommen.

Als weitere große Gruppe elektrischer Verbraucher im Bordnetz sind die Nebenaggregate zu nennen. In diese Kategorie fallen alle Aggregate, die für die Funktion des Verbrennungsmotors gebraucht werden oder Komfort- und Sicherheitsfunktionen bieten, wie der Klimakompressor oder diverse Pumpen [84]. Klassischerweise werden viele dieser Nebenaggregate direkt über den Riementrieb angetrieben. Um die immer strengereren Effizienzvorgaben zu erfüllen, wurden viele dieser Systeme in den letzten Jahren elektrifiziert. Dadurch lässt sich eine bedarfsgerechte Ansteuerung dieser Nebenaggregate implementieren und die Gesamteffizienz steigern [82, 88, 89].

### **Erzeuger**

Obwohl die Gewinnung elektrischer Energie im Kraftfahrzeug aus alternativen Quellen, wie beispielsweise der Abgaswärme [109], in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird, ist zum derzeitigen Stand der Technik der Kfz-Generator der einzige Erzeuger elektrischer Energie in einem konventionellen 12 V-Bordnetz. Bei dem Kfz-Generator handelt es sich meist um eine elektrisch erregte Synchronmaschine in Klauenpolbauweise. Aus elektrischer Sicht befindet sich diese Maschine im Inselbetrieb. Die dreiphasige Wechselspannung des Ständers wird direkt, mittels einer Diodenbrücke, gleichgerichtet und

dem Bordnetz zugeführt. Ein Teil des Generatorstroms wird benötigt, um die Erregerwicklung im Rotor über zwei Schleifringe zu versorgen [18, 128]. Die Klemmenspannung des Generators wird durch den Erregerstrom eingestellt. Ein Zweipunktregler regelt den Erregerstrom so, dass die Klemmenspannung auf dem gewünschten Sollwert gehalten wird. Regler für Kfz-Generatoren werden mittlerweile vollintegriert von zahlreichen Halbleiterherstellern angeboten [58, 98, 100] und von den Herstellern der Generatoren in ihre Produkte integriert. Über die reine Regelungsfunktionalität hinaus wurden in diese Produkte zudem zahlreiche Zusatzfunktionen implementiert, wie z.B. eine künstliche Absenkung der Generatordynamik<sup>2</sup> oder eine *LIN*<sup>3</sup>-Schnittstelle, die beispielsweise zur Kommunikation mit dem Energiemanagement genutzt werden kann.

Aufgrund des Einsatzgebietes in Kraftfahrzeugen handelt es sich bei heutigen Kfz-Generatoren um sehr kostenoptimierte Komponenten [18]. Bauartbedingt und durch die passive Gleichrichtung bei niedriger Spannungslage liegt der Wirkungsgrad im besten Betriebspunkt bei ca. 70 % [72, 118]. Die Generatordynamik ist, bedingt durch die Erregerinduktivität und die Spannungslage des Bordnetzes, im Vergleich zu anderen Bordnetzkomponenten, relativ gering<sup>4</sup>. Zudem kann der Generator erst ab einer gewissen Mindestdrehzahl seinen Nennstrom liefern [103].

Kfz-Generatoren sind nach wie vor Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. So soll durch eine optimierte Maschinengeometrie [29, 85] und den Einsatz aktiver Gleichrichter [123, 140] der Wirkungsgrad weiter gesteigert werden. Die geringe Stromdynamik könnte durch den Einsatz von Aufwärtswandlern im Erregerkreis signifikant gesteigert werden [57]. Weitere Forschungsarbeiten finden sich im Bereich Modellierung, Simulation und Parameterbestimmung [15, 17, 124].

### Speicher

Seit in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts damit begonnen wurde, elektrische Anlasser in die Kraftfahrzeuge zu integrieren, wurden auch elektrische Energiespeicher zur Versorgung des Anlassers benötigt. Diese Energiespeicher sind bis dato fast ausschließlich als Blei-Säure-Batterien [65] ausgeführt. Im Laufe der Zeit musste die vormals reine Starterbatterie jedoch weitere Aufgaben übernehmen. Eine moderne Bordnetzatterie stellt elektrischen oder elektronischen Verbrauchern, auch bei stillstehendem Motor, über eine gewisse Zeit elektrische Energie zur Verfügung. Zudem puffert sie Lastspitzen mit hohen Stromgradienten, welche die Dynamik des Generators

---

<sup>2</sup>Insbesondere bei niedrigen Drehzahlen im ausgekuppelten Zustand (Leerlauf) könnte der Momentensprung an der Welle zu einem Absterben des Verbrennungsmotors führen.

<sup>3</sup>Die *Local Interconnect Network*-Schnittstelle ist ein preisgünstiger Eindrahtbus mit geringer Datenübertragungsrate [110], welcher ab 1998 zunächst als Industriestandard entwickelt wurde. Seit 2016 ist *LIN* als internationale Norm spezifiziert [60].

<sup>4</sup>Ein typischer Lastsprung des Ausgangsstroms von 10 % auf 90 % benötigt mehrere Hundert Millisekunden.

überschreiten, ab. Diese Lastspitzen können beispielsweise von elektromechanischen Systemen aus dem Fahrwerksbereich verursacht werden [110].

Die zunehmende Mikro-Hybridisierung der Kraftfahrzeuge zur Erfüllung von Effizienzvorgaben hat die Anforderungen an die Bordnetzatterie im Hinblick auf Zyklisierung und Pulsbelastung zusätzlich erhöht [75]. Diesen steigenden Anforderungen sind die Hersteller mit diversen Optimierungen, beispielsweise durch die Festlegung des Elektrolyten, begegnet. Die grundlegende Funktionsweise der Bleibatterie blieb dabei aber unverändert [2, 38, 138]. Laut einer Marktanalyse aus dem Jahr 2012 ist mit einer weiteren starken Zunahme der Mikro-Hybridisierung zu rechnen, welche vor allem auf Blei-Säure-Batterien basieren wird [105]. Aktuelle Forschungsaktivitäten zu Blei-Säure-Batterien liegen im Bereich der Modellbildung [77] und Parameterbestimmung [133] sowie in der Ermittlung des Lade (SOC)- [28] und des Gesundheitszustands (SOH) [39, 70] der Batterien während des Betriebs.

In den letzten Jahren ist vermehrt der Ersatz der Blei-Säure-Technologie durch Batterien auf Lithium-Ionen-Basis in der Diskussion. Im direkten Vergleich weisen diese wesentlich bessere Eigenschaften im Hinblick auf Gewicht, Zyklisierbarkeit und Ladeakzeptanz auf [73]. Eine weitere Möglichkeit einer schrittweisen Einführung der Lithium-Ionen-Technologie im Kfz-Bordnetz besteht in der passiven Parallelschaltung mit herkömmlichen Blei-Säure-Batterien [125]. Da es sich bei Batterien prinzipbedingt um passive Systeme handelt, liegt bei derartigen Systemen die Herausforderung in der Wahl der richtigen Zellchemie und einer passenden Auslegung [115, 116, 125].

### 2.1.2 Topologie

Das konventionelle Energiebordnetz besteht aus einem Generator, einer Batterie und den zu versorgenden Verbrauchern. Die Verbraucher werden üblicherweise nicht direkt mit dem Generator und der Batterie verbunden, sondern über einen oder mehrere Stromverteiler. In diesen Stromverteilern befinden sich auch die Schmelzsicherungen. Um die Wartbarkeit zu gewährleisten, sind diese an für den Kunden zugänglichen Orten im Fahrzeug platziert. [110]

In dieser Arbeit wird ausschließlich ein konventionelles 12 V-Bordnetz betrachtet. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass der eingesetzte Referenzbordnetzprüfstand die konventionelle Topologie aufweist. Die vorgestellte Methode ist jedoch prinzipiell, mit entsprechenden Anpassungen, auf sämtliche Bordnetztopologien anwendbar.

Die Dimensionierung moderner Bordnetze ist aufgrund der Variantenvielfalt und der hohen Anzahl an Freiheitsgraden und Randbedingungen eine anspruchsvolle Aufgabe. Zudem ergeben sich, neben den rein elektrischen Aspekten, oft auch Randbedingungen aus angrenzenden Domänen wie beispielsweise der Kommunikationsinfrastruktur [21, 22, 23]. Sowohl in der Forschung [16, 33, 119] als auch in kommerziell erhältlichen Produkten [81] werden für die Lösung dieser Auslegungsaufgabe oft Simulationsumgebungen mit Optimierungsalgorithmen gekoppelt.

Zudem lässt sich in den letzten Jahren ein Trend zur Abweichung von der konventionellen Bordnetztopologie erkennen. So sind Fahrzeuge mit mehreren Batterien mittlerweile Stand der Technik. Dabei wird oft zwischen einer Hauptbatterie und einer Starterbatterie unterschieden [110]. Alternativ wird, wie im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, durch die Kombination von Blei-Säure-Batterien mit einer anderen Zellchemie versucht, ein insgesamt besseres Speicherverhalten zu generieren [125]. Auch die mittlerweile erfolgte Einführung einer zweiten Spannungslage von 48 V [4, 104] sorgt für eine neue Vielfalt an Bordnetztopologien. Stellen die genannten Entwicklungen eher evolutionäre Schritte dar, gibt es auch Ansätze, die Energieversorgung im Fahrzeug komplett neu zu denken. Ein Beispiel dafür wäre der Einsatz von Stromschienen anstelle des klassischen Leitungssatzes [9, 126].

## 2.2 Management elektrischer Energiebordnetze

In diesem Abschnitt wird auf die Aufgaben und Funktionalitäten von Managementsystemen für elektrische Energiebordnetze eingegangen und der kybernetische Ansatz für ein Energie- und Leistungsmanagement vorgestellt.

### 2.2.1 Aufgaben und Lösungsansätze

Das Managementsystem eines elektrischen Energiebordnetzes hat im Wesentlichen zwei Kernaufgaben. Es soll eine zuverlässige bzw. stabile Energiebereitstellung für sämtliche Komponenten im Fahrzeug gewährleisten und dabei möglichst energieeffizient sein.

Das Ziel, ein effizienteres Gesamtsystem zu erreichen und damit einen Beitrag zur  $CO_2$ -Reduktion zu leisten, wird durch eine Vielzahl an Einzelmaßnahmen realisiert. So kann durch die Vermeidung von allzu großzügiger Dimensionierung der Bordnetzkomponenten, vom Generator über den Leitungssatz bis hin zur Batterie, Gewicht eingespart werden [45]. Dies bedeutet aber auch, dass die Bordnetzkomponenten schneller ihre Systemgrenzen erreichen und somit die aktive Steuerung der Energieflüsse im Kraftfahrzeug eine zunehmende Bedeutung erfährt. Zudem tragen der mittlerweile weitverbreitete Einsatz der *Start-Stopp*-Funktion<sup>5</sup> sowie die relativ neue Funktion des *Segelns*<sup>6</sup> zu einer Verbrauchsreduktion bei [84]. Bei beiden Funktionen ist offensichtlich, dass diese massive Rückwirkungen auf die elektrische Energieversorgung haben.

Da die installierte elektrische Leistung in modernen Kraftfahrzeugen nach wie vor zunimmt, zeitgleich die Verbrennungsmotoren aber immer verbrauchsärmer werden, kommt der effizienten Erzeugung elektrischer Energie eine stetig wachsende Bedeutung

---

<sup>5</sup>Abschaltung des Verbrennungsmotors während Standphasen des Fahrzeugs [84].

<sup>6</sup>Der Ausdruck *Segeln* meint die Abschaltung und Abkopplung des Verbrennungsmotors während der Fahrt [84].

zu [84, 89, 113]. So können laut [83] durch den Einsatz einer intelligenten Generatorregelung bis zu 4 % Kraftstoff eingespart werden.

Im Gegensatz zur Energieeffizienz ist der Begriff der stabilen Energieversorgung schwerer greifbar. In [74] werden, neben der Spannungsstabilität (*technische Stabilität*), noch die Begriffe der *optischen Stabilität* und der *mechanischen Stabilität* genannt und mit Bewertungsvorschlägen versehen. Die beiden letztgenannten Stabilitätsbegriffe stellen dabei das Ziel der Nichtwahrnehmung, also weder optisch noch haptisch, in den Fokus. Zudem kann auch die Alterung der Bordnetzatterie im Hinblick auf die Langzeitstabilität mit betrachtet werden, da eine gealterte Batterie unmittelbaren Einfluss auf die Spannungsstabilität hat [65].

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird in Forschung und Entwicklung seit geraumer Zeit an Energie- und Leistungsmanagementsystemen für das elektrische Energiebordnetz im Kraftfahrzeug gearbeitet. Die Lösungsansätze bestehen in der Regel aus zwei Komponenten. Eine Generatoransteuerung wird zur Beeinflussung der Spannungslage, Hebung der Rekuperationspotentiale und Anpassung der Energieerzeugung an einen möglichst effizienten Betriebspunkt genutzt [24, 71, 75, 114, 117]. Eine zentrale [24, 37] oder lokale [120] Verbrauchersteuerung niederpriorer Komponenten dient zur Beeinflussung der Leistungsaufnahme und zur Vermeidung der Superposition von Leistungsspitzen. Um zusätzliche Freiheitsgrade in das stark limitierte System Energiebordnetz einzubringen, arbeiten einige Ansätze zudem mit kleinen, aktiven Energiespeichern [74, 117, 119].

### 2.2.2 Kybernetisches Energie- und Leistungsmanagement

Die Kybernetik ist eine Wissenschaft die Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts von *Norbert Wiener* mit dem Ziel begründet wurde, Regelungsmechanismen komplexer Systeme aus der Natur abzuleiten und auf beliebige andere Systeme anzuwenden [141]. Die Kybernetik fand Anwendung in diversen, teils sehr unterschiedlichen, wissenschaftlichen Disziplinen. Darauf aufbauend entwickelte *Stafford Beer* Ende der 1950er Jahre das *Viable System Model (VSM)* für die Anwendung im Management von Unternehmen bis hin zu Volkswirtschaften [11, 12, 13]. Kerngedanke des Modells ist, jedes beliebige System in fünf Subsysteme mit dezidierten Aufgaben einzuteilen. Diese reichen von den operativen Einheiten auf der untersten Ebene, über eine Koordinations- und eine Optimierungsebene hin zu einer vorausplanenden Instanz und einer obersten Entscheidungsebene. Zudem kann das Modell rekursiv aufgebaut werden, so dass ein *Viable System Model* aus beliebig vielen Submodellen gebildet werden kann, welche für sich wiederum ein *Viable System Model* darstellen.

Das *Viable System Model* wurde im Lauf der Zeit in diversen Anwendungen eingesetzt [26, 54, 62, 63]. Im Bereich elektrischer Energiebordnetze wurde das *VSM* erstmals von *Giovanazzi* [45] zur Strukturierung und Komplexitätsreduktion eines prädiktiven Leistungsmanagements verwendet, welches Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung

des Bordnetzes koordiniert. Der Ansatz wurde von *Fröschl* zu einem Energie- und Leistungsmanagement mit dem Titel *fEPM*<sup>7</sup> erweitert [1] und eine erste Implementierung namens *ConnectedPowerManagement 2015* in den BMW 7er ausgeleitet [6].

## 2.3 Echtzeittestmethoden für technische Systeme

Die Entwicklung mechatronischer Systeme ist ein sehr komplexer Prozess. Hardware- und Softwarekomponenten unterschiedlicher Hersteller werden zu einem System zusammengesetzt, welches oft wiederum als Subsystem in einem größeren System eingesetzt wird. In den verschiedenen Phasen des Entwicklungsprozesses kommen unterschiedliche Testmethoden zum Einsatz, über welche im Folgenden ein Überblick gegeben werden soll.

### 2.3.1 Software-in-the-Loop (SiL)

Bei der *Software-in-the-Loop*-Simulation (SiL) werden die zu testende Softwarefunktion und ein Simulationsmodell des zu steuernden Systems gemeinsam in einer Simulationsumgebung ausgeführt. Auf diese Weise kann der zu betrachtende Regelkreis in der Simulation geschlossen werden. Die zu testende Softwarefunktion kann dabei auch in einer höheren Modellierungssprache wie z.B. *Matlab/Simulink* oder *Modelica* vorliegen. Dann wird in diesem Kontext oft auch von *Model-in-the-loop* (MiL) gesprochen. Viele Simulationsumgebungen ermöglichen zudem die Ausführung von nativem Quellcode, welcher später auch in dieser Form auf dem Steuergerät zum Einsatz kommen kann. Auf diese Art und Weise können Fehler in der Software frühzeitig erkannt und behoben werden. Kommt realer Softwarecode zum Einsatz, wird meist von *Software-in-the-Loop* gesprochen, wobei in der Realität oft auch Mischformen zum Einsatz kommen und die Unterschiede fließend sind. [59, 108]

Ein weiterer Vorteil von *Software-in-the-Loop* ist die fehlende Kopplung zur realen Hardware oder zur Umwelt, was die Ausführung unabhängig vom realen Zeitverlauf ermöglicht. So ist bei der Modellbildung nicht auf Echtzeitfähigkeit zu achten. Zudem ermöglicht dieser Umstand den Einsatz von sehr detaillierten und damit meist auch rechenintensiven Modellen zur Untersuchung bestimmter Vorgänge. Ebenso ist aber auch der Einsatz weniger detaillierter und dafür schnell ausführbarer Modelle möglich. Derartige Modelle eignen sich zur Betrachtung langer Simulationszeiträume oder für die schnelle Durchführung von Parameterstudien. [59, 108]

---

<sup>7</sup>flexible Energy and Power Management.



### 2.3.2 Hardware-in-the-Loop (HiL)

Bei der *Hardware-in-the-Loop*-Simulation (HiL) hingegen wird die Softwarefunktion auf der finalen Zielhardware in Echtzeit ausgeführt. Der zu steuernde Prozess bzw. die Regelstrecke müssen dafür von einem Echtzeitsystem, dem HiL-Simulator, berechnet und an der Schnittstelle zum Prüfling nachgebildet werden. Diese Schnittstelle kann dabei sowohl aus analogen und digitalen Sensorsignalen als auch aus vollständig nachgebildeten Bussystemen bestehen. HiL-Simulatoren werden von diversen Herstellern angeboten. Manche dieser Hersteller versuchen mit einer möglichst offenen Plattform möglichst viele Anwendungen abzudecken, andere wiederum besetzen mit hochspezialisierten Produkten einzelne Fachdisziplinen. [59, 108]

Der klassische *Hardware-in-the-Loop*-Simulator arbeitet in der Regel mit digitalen oder analogen Signalen im Niederspannungsbereich, die keine nennenswerte Leistung übertragen. Jedoch kann die grundsätzliche Fähigkeit des HiL-Simulators zur schnellen Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe von Signalen über die verschiedensten Kommunikationswege genutzt werden, um damit komplette Prüfsysteme anzusteuern. Ein Spezialfall eines solchen Prüfsystems wird im nächsten Abschnitt vorgestellt. [59, 108]

### 2.3.3 Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)

Bei einem *Power-Hardware-in-the-Loop* (PHIL)-System handelt es sich um eine Weiterentwicklung der klassischen HiL-Systeme. Diese können in der Regel nur Signale einlesen und ausgeben, mit einem PHIL-System wird dagegen auch der Austausch elektrischer Leistung möglich. Grundidee der *Power-Hardware-in-the-Loop*-Methode ist es, einen HiL-Simulator mit einem für die Anwendung passenden elektrischen Leistungsverstärker zu koppeln. Das zu emulierende System wird auf dem Echtzeitrechner berechnet und die Ausgänge des Simulationsmodells werden als Sollwerte für den Verstärker verwendet. Die Istwerte des Prüflings werden entweder direkt über die analogen Eingänge oder über eine entsprechende Signalkonditionierung in das Echtzeitsystem eingelesen und dem Simulationsmodell zugeführt. Das PHIL-System verhält sich an seinen Klemmen dann idealerweise exakt so, wie das Simulationsmodell. Abbildung 2.1 verdeutlicht den grundlegenden Unterschied zwischen einem klassischen HiL- und einem PHIL-System.

Die *Power-Hardware-in-the-Loop*-Methode ist in der Lage, eine Lücke im Testprozess zwischen der reinen *Hardware-in-the-Loop*-Simulation und einem Systemprüfstand zu schließen. Dies ist vor allem für diejenigen Komponenten interessant, welche mit nennenswerter elektrischer Leistung interagieren. Jedoch sind PHIL-Systeme auch Gegenstand aktueller Forschungsaktivitäten. So wurde in [127] ein PHIL-Emulator zur Emulation elektrischer Maschinen, auf Basis eines Multiphasen-Multilevel-Umrichters vorgestellt.

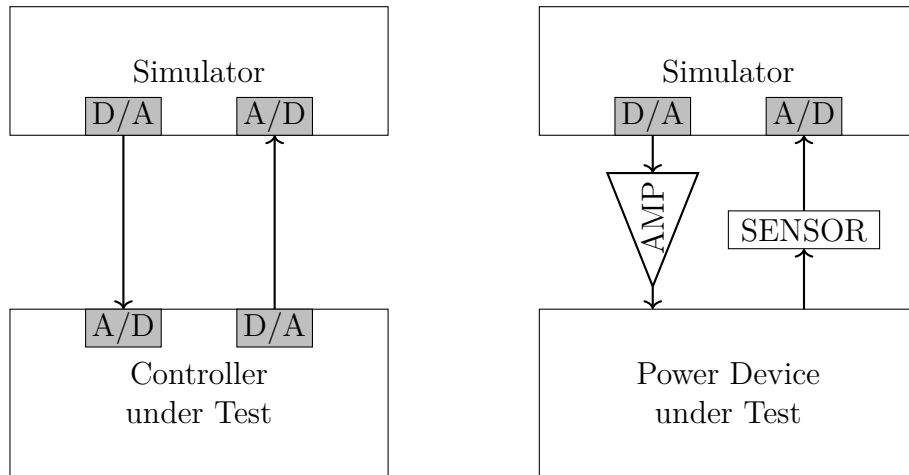


Abbildung 2.1: Grundprinzip eines *Power-Hardware-in-the-Loop*-Systems (rechts) im Vergleich zu einem klassischen HiL-System (links). Der Ausgang eines HiL-Simulators wird über einen geeigneten Verstärker auf das zu testende System übertragen. Die Antwort des Systems wird über Sensorik erfasst und in das Modell zurückgeführt (nach [134]).

Die ersten Anwendungen von PHIL finden sich in der Entwicklung leistungselektronischer Ansteuerungen elektrischer Antriebe [5]. Dafür wird das Modell einer elektrischen Maschine in Echtzeit berechnet und die Phasenströme werden dem Leistungsverstärker als Sollwert vorgegeben. Dadurch ist es möglich, die komplette Leistungselektronik ohne aufwendige Antriebsprüfstände unter Last zu testen und Fehlerfälle reproduzierbar zu wiederholen.

Im Laufe der Zeit hat die Methode auch in andere Anwendungsbereiche Einzug gefunden. So gibt es vor allem im Bereich der Elektromobilität mittlerweile eine wachsende Nachfrage nach Batterieemulatoren [8, 30, 130, 131]. Die Vorgehensweise ist dabei prinzipiell dieselbe. Das Modell einer Batterie wird in Echtzeit berechnet, die berechnete Klemmenspannung dem Verstärker als Sollwert vorgegeben und der gemessene Strom wird in das Batteriemodell zurückgeführt.

### 2.3.4 Anwendung von PHIL zur Validierung verteilter Energiesysteme

Eine weitere Anwendung der *Hardware-in-the-Loop-Simulation*-Methode findet sich mittlerweile im Bereich der Entwicklung und Validierung von Energiemanagementsystemen. Hierbei steht nicht mehr unbedingt der Komponenten-Test eines seriennahen Produkts im Fokus. Vielmehr zielen die Anwendungen auf die Untersuchung und realitätsnahe Validierung komplexer Steuerungen als nachgelagerter Schritt an eine Systemsimulation ab. Oftmals werden dazu mehrere PHIL-Systeme eingesetzt, wo-

bei jedes System eine Komponente in einem Gleich- und/oder Wechselspannungsnetz repräsentiert.

So wurde in [92] das Energiemanagement in einem Gebäude untersucht, und die PHIL-Systeme wurden eingesetzt, um diverse Haushaltsgeräte, wie z.B. Waschmaschinen, Heizungen oder Kühlschränke, zu emulieren. Für die Entwicklung von Regelalgorithmen zur Netzintegration verteilter Energiequellen und Lasten wurde in [56] ein neues PHIL-Labor vorgestellt, in welchem beispielsweise Photovoltaikmodule, Dieselgeneratoren oder Netzbatterien emuliert werden können. In [3] dagegen wurde ein Prüfstand zur Untersuchung von Fehlerfällen im Mittelspannungsnetz von Schiffen mit einer installierten Nennleistung von 1 MW, verteilt auf vier PHIL-Systeme, vorgestellt.

# 3 Modellbildung und Simulation

In dieser Arbeit soll ein Energiemanagementsystem für ein elektrisches Energiebordnetz, in Interaktion mit einem Simulationsmodell des entsprechenden Bordnetzes, simuliert und im Anschluss nach verschiedenen Kriterien optimiert werden. Dazu wird, zusätzlich zu der eigentlichen Implementierung des Energiemanagementsystems, ein möglichst genaues Simulationsmodell des Kabelbaums und aller daran angeschlossener Komponenten benötigt. Neben der rein physikalischen Modellbildung soll bei den Bordnetzkomponenten auch deren für das Energiebordnetz relevante Logik mit abgebildet werden. Das heißt, die Bordnetzkomponenten sollen sowohl auf Umwelteinflüsse und die Interaktion der Insassen mit dem Fahrzeug als auch auf Vorgaben des Energiemanagements reagieren. Dadurch entsteht ein Wirkgefüge zwischen den Bordnetzkomponenten und dem Energiemanagementsystem. Bei der Implementierung des Energiemanagementsystems wird grundsätzlich von einem kybernetisch strukturierten System nach [40, 41, 42] und [45] ausgegangen. So werden alle Bordnetzkomponenten als *kybernetische Objekte* verstanden, die über eine gewisse Eigenintelligenz verfügen.

In [20] werden zwei prinzipielle Möglichkeiten der Modellbildung physikalischer Systeme unterschieden. Der *verhaltensbeschreibende Ansatz* basiert ausschließlich auf Beobachtungen und versucht das zu simulierende System nachzuahmen. Die eigentliche Implementierung<sup>1</sup> ist hierbei nebensächlich und/oder unbekannt (Black-Box-Modell). Der *systembeschreibende Ansatz* dagegen basiert auf einer Analyse und Nachbildung der internen Struktur der zu simulierenden Komponente (Glass-Box-Modell) und erlaubt eine Aussage über das Komponentenverhalten, ohne dieses jemals beobachtet zu haben. In der Praxis werden diese beiden Ansätze häufig kombiniert (Grey-Box-Modell). Dabei wird die grundsätzliche Wirkungsstruktur des Systems nachgebildet, und unbekannte oder schwer modellierbare Zusammenhänge werden über Kennlinien bzw. Kennfelder implementiert.

Je nachdem, welche Zeiträume und Zusammenhänge betrachtet werden sollen und für welchen Einsatzzweck<sup>2</sup> das Modell gedacht ist, werden Simulationsmodelle auf unterschiedlichen Abstraktions- oder Modellierungsebenen benötigt. Dabei weist die System-Ebene den höchsten Abstraktionsgrad auf. Nachgelagerte, detaillierte Ebenen sind nicht eindeutig definiert und oft spezifisch für die jeweilige ingenieurwissenschaftliche Disziplin. Für mechatronische Systeme wird in [112] zwischen den drei Modellie-

---

<sup>1</sup>Üblicherweise werden dazu messtechnisch ermittelte Kennlinien oder Kennfelder verwendet.

<sup>2</sup>Insbesondere die Simulationsdauer und die Echtzeitfähigkeit der Modelle sind oft entscheidende Kriterien.

rungsebenen *Geometrie-*, *Netzwerk-* und *System-Ebene* unterschieden. Die Geometrie-Ebene adressiert dabei vorrangig Probleme der Feldberechnung oder der Strukturmechanik, welche auf partiellen Differentialgleichungen basieren<sup>3</sup>. Die Netzwerk-Ebene vereinfacht räumlich verteilte auf räumlich konzentrierte Elemente [87]. Das daraus resultierende Gleichungssystem lässt sich dabei auf ein Differentialgleichungssystem erster Ordnung zurückführen<sup>4</sup>. Die System-Ebene weist den geringsten Detaillierungsgrad auf, eignet sich aber durch den damit einhergehenden geringeren Rechenaufwand zur Durchführung von Optimierungen und Parameterstudien.

In diesem Kapitel werden Modelle der Bordnetzkomponenten auf System- und Netzwerk-Ebene erstellt. Als Simulationswerkzeug dient *Dymola* [31], dem die physikalische Beschreibungssprache *Modelica* [35] zugrunde liegt. Als genereller Modellierungsansatz wird der systembeschreibende Ansatz gewählt und die interne Struktur der Komponenten wird im Modell nachgebildet. Bei einigen Komponenten werden schwer modellier- oder parametrierbare Zusammenhänge, im Sinne des Grey-Box-Ansatzes, durch den Einsatz von Kennlinien, Messungen oder vereinfachten mathematischen Annahmen ergänzt. Die Parametrierung der Modelle erfolgt dabei durch eigene Messungen, Literaturangaben [37, 110] sowie durch den Einsatz von Fittingverfahren zur Parameterbestimmung.

## 3.1 Schnittstellen- und Strukturierungskonzept der Komponentenmodelle

Die Bordnetzkomponenten sind innerhalb ihrer Gruppe sehr heterogen und hängen von einer Vielzahl unterschiedlicher Parameter und Eingangsgrößen ab. Zudem soll, neben der Komponentenphysik, auch die für die jeweilige Komponente relevante Logik in den Modellen abgebildet werden. Bei der Modellierung der Komponenten besteht die Gefahr der Vermischung von physikalischen Gegebenheiten mit der lokalen Betriebsstrategie der Komponente. Im Sinne der Wartbarkeit und Austauschbarkeit der Komponentenmodelle wurden folgende grundsätzliche Modellierungsrichtlinien angewendet:

1. Die verschiedenen Bordnetzkomponenten werden nach ihren primären energetischen Eigenschaften in die drei Komponentengruppen der elektrischen Verbraucher, Erzeuger und Speicher eingeteilt.
2. Die Komponenten einer Gruppe weisen stets die gleichen Ein- und Ausgänge auf. Durch die Kenntnis der Schnittstelle ist ein einfacher Austausch der Simulationsmodelle möglich.

---

<sup>3</sup>Problemstellungen dieser Art können beispielsweise mit der Finite-Elemente-Methode oder Finite-Differenzen-Methode gelöst werden.

<sup>4</sup>Die Überführung auf ein Differentialgleichungssystem erster Ordnung wird von modernen Simulationsumgebungen durchgeführt und erfordert in der Regel keine Nutzerinteraktion.

- Die Implementierung der physikalischen Zusammenhänge und der Eigenlogik in der Komponente werden klar getrennt. Dadurch lassen sich Änderungen der lokalen Betriebsstrategie ohne Änderungen der Komponentenphysik umsetzen.

Aus den genannten Richtlinien wurde das in Abbildung 3.1 dargestellte Schnittstellen- und Strukturierungskonzept der Komponentenmodelle abgeleitet. Es handelt sich dabei um eine generische Basisklasse, die nach außen eine definierte Schnittstellensignatur aufweist.

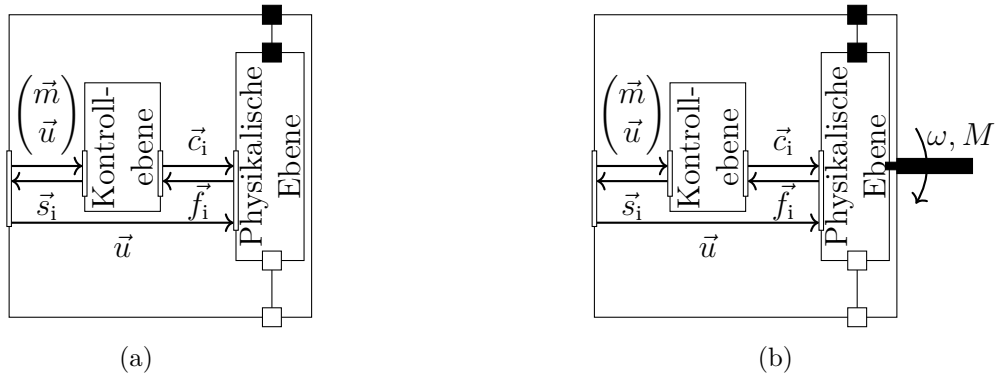


Abbildung 3.1: In den Basisklassen ist das Schnittstellen- und Strukturierungskonzept der Komponentenmodelle implementiert. Komponentenlogik und -physik sind klar voneinander getrennt, und alle Komponenten innerhalb einer Gruppe weisen dieselben Schnittstellen nach außen auf. Überschreitet eine Komponente energetische Domänengrenzen, wird eine separate Basisklasse angelegt. Basisklasse (a) bedient nur die elektrische Domäne, wohingegen Basisklasse (b) sowohl Verbindungen zur elektrischen als auch zur rotationsmechanischen Domäne aufweist.

Innerhalb der Basisklasse wird zunächst eine Unterscheidung zwischen der Komponentenphysik in der physikalischen Ebene und der Eigenlogik<sup>5</sup> in der Kontrollebene vorgenommen. Die Kommunikation zwischen der physikalischen Ebene, der Kontrollebene und der Außenwelt erfolgt über verschiedene Schnittstellen.

Die zur Implementierung der Modelle verwendete physikalische Modellierungssprache *Modelica* [35] unterscheidet zwischen zwei grundlegenden Verbindungsarten. Kausale Verbindungen für gerichtete Größen dienen der Informationsübermittlung. Akausale Verbindungen hingegen werden zur Modellierung rückwirkungsbehafteter physikalischer Zusammenhänge verwendet. Die akausalen Verbindungen bestehen in der Regel aus je einer Fluss- und einer Potentialvariablen pro Verbindung<sup>6</sup>. Die physikalische

<sup>5</sup>In einem Fahrzeug ist die Eigenlogik entweder als Software oder in einem integrierten Schaltkreis implementiert. Die Betrachtung der Implementierungsart, des Ausführungsortes sowie eventueller Bussysteme zwischen den einzelnen Komponenten sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.

<sup>6</sup>Für ein einphasiges elektrisches System, wie das Energiebordnetz, ist die Spannung die Potentialvariable und der Strom die Flussgröße.

Ebene ist direkt über akausale physikalische Verbindungen mit dem Rest des zu simulierenden Gesamtsystems verbunden. Bis auf den Generator sind alle Bordnetzkomponenten ausschließlich mit der elektrischen Domäne des 12 V-Bordnetzes verbunden und können mit der generischen Basisklasse nach Abbildung 3.1 (a) modelliert werden. Lediglich der Generator ist zusätzlich mit der rotationsmechanischen Domäne des Riemetriebes verbunden und wird mit der generischen Basisklasse nach 3.1 (b) aufgebaut. Bei Umweltgrößen, wie z.B. der Fahrzeuggeschwindigkeit oder der Umgebungstemperatur, handelt es sich zwar prinzipiell auch um physikalische Parameter. Jedoch dienen diese Größen für die in dieser Arbeit beschriebene Bordnetzsimulation lediglich als Randbedingungen, da keine nennenswerten Rückwirkungen vom Energiebordnetz auf diese Größen zu erwarten sind.

Neben der Anbindung der physikalischen Ebene an die jeweilige energetische Domäne ist jede Komponente über drei Vektoren nach (3.1) mit dem Rest des Systems verbunden.

$$\vec{u} := \begin{pmatrix} \text{Umweltdaten} \\ \text{Kundeninteraktion} \\ \vdots \end{pmatrix} \vec{m} := \begin{pmatrix} \text{Modifikatoren} \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} \vec{s}_i := \begin{pmatrix} \text{Leistungsreserven} \\ \text{Energieverbrauch} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Der Umweltinformationsvektor  $\vec{u}$  beinhaltet sämtliche Informationen über die Umwelt des Energiebordnetzes. Es befinden sich darin klassische Umweltdaten, wie z.B. die Fahrzeuggeschwindigkeit oder die Drehzahl des Verbrennungsmotors. Des Weiteren werden über den Umweltinformationsvektor auch Informationen über die Kundeninteraktionen mit dem Fahrzeug verteilt. Da Kundeninteraktionen, wie beispielsweise die Bedienung von Komfort- und Infotainmentsystemen, einen maßgeblichen Einfluss auf das Energiebordnetz haben, können sie damit auch zur Umwelt des Energiebordnetzes gezählt werden. Die Umweltinformationen werden sowohl der Kontrollebene als auch der physikalischen Ebene zur Verfügung gestellt.

Der Managementvektor  $\vec{m}$  enthält die globalen Modifikatoren und Steuerungsbefehle des Energie- und Leistungsmanagements, die an die Bordnetzkomponenten verteilt werden. Der Statusvektor  $\vec{s}_i$  ist hingegen der spezifische Informationskanal von der Bordnetzkomponente zum Energiemanagement und beinhaltet vereinheitlichte Informationen, wie beispielsweise die aktuelle und prognostizierte Energieaufnahme der Komponente oder ihre aktuelle Fähigkeit zur Leistungsbereitstellung. Da diese beiden Vektoren die Kommunikation mit dem Energie- und Leistungsmanagement nachbilden, sind sie nur mit der Kontrollebene verbunden.

Die Kontrollebene kommuniziert mit dem Energie- und Leistungsmanagement und steuert die physikalische Ebene. Die Schnittstelle zwischen der Kontrollebene und der physikalischen Ebene ist folglich sehr komponentenspezifisch. Aus diesem Grund kann sie, im Gegensatz zu den anderen Schnittstellen, nicht normiert werden. Sie besteht, wie in Definition (3.2) dargestellt, aus einem Kontrollvektor  $\vec{c}_i$ , der die Steuersignale

enthält und einem Feedbackvektor  $\vec{f}_i$  mit aktuellen Istwerten und dem Status der spezifischen Komponente.

$$\vec{c}_i := \begin{pmatrix} \text{Kontrollsignal1} \\ \text{Kontrollsignal2} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad \vec{f}_i := \begin{pmatrix} \text{Feedback1} \\ \text{Feedback2} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

In diesem Abschnitt wurden die generischen Basisklassen für die Modellierung der Bordnetzkomponenten vorgestellt. Diese erleichtern durch ihre einheitliche Schnittstellensignatur den Austausch mit Projektpartnern und dienen als Blaupause für die Modellierung neuer Komponenten. Zudem ermöglicht die Trennung von Steuerung und physikalischer Beschreibung der Komponentenmodelle eine Modellbildung in verschiedenen Detaillierungsstufen ohne Mehrfachimplementierung der Logik. Des Weiteren wird durch die generischen Basisklassen der automatisierte Export auf den Bordnetzprüfstand deutlich erleichtert, wie im nachfolgenden Kapitel gezeigt werden wird.

## 3.2 Verbraucher

In diesem Abschnitt wird die Modellbildung für unterschiedliche elektrische Verbraucher im Energiebordnetz erläutert. Der Fokus liegt hierbei auf den Verbrauchern mit dem höchsten Bedarf an elektrischer Energie. Mit einigen wenigen Grundmodellen kann der Großteil der energetisch relevanten Verbraucher ausreichend genau abgebildet werden.

### 3.2.1 Ohmsche Verbraucher

Die Beleuchtungs- und Heizungssysteme in einem Kraftfahrzeug können näherungsweise als rein ohmsche Verbraucher beschrieben werden. Diese Systeme werden in der Regel über einen Leistungsschalter<sup>7</sup> direkt an das Bordnetz geschaltet. Unter der Annahme, dass die Komponente selbst keinen induktiven Anteil enthält, wird die Stromanstiegsgeschwindigkeit lediglich durch die Leitungsinduktivität begrenzt<sup>8</sup>. Der Wert des elektrischen Widerstandes berechnet sich nach (3.3) [78]. Der spezifische Widerstand  $R_{20}$  bei einer Temperatur von 20 °C und der Temperaturkoeffizient  $\alpha$  sind materialspezifische Konstanten. Somit ist der Widerstandswert lediglich von der Widerstandstemperatur  $\vartheta$  abhängig.

$$R(\vartheta) = R_{20}(1 + \alpha \cdot \vartheta) \quad (3.3)$$

<sup>7</sup>Dieser Leistungsschalter kann sowohl als Leistungshalbleiter als auch mit einem Relais ausgeführt sein.

<sup>8</sup>Messungen im Fahrzeug haben Stromgradienten von bis zu 50  $\frac{\text{A}}{\text{ms}}$  ergeben.



Die Betrachtung der thermischen Zeitkonstanten der Beleuchtungs- und Heizsysteme ergibt erwartungsgemäß einen Unterschied von mehreren Größenordnungen. Glüh- oder Halogenlampen befinden sich nach weniger als 100 ms im thermischen Beharrungszustand [53]. Aufgrund der kleinen Zeitkonstanten spielt die thermische Abhängigkeit der Stromaufnahme der Beleuchtungssysteme energetisch keine signifikante Rolle, weshalb in der Modellierung ein konstanter Widerstandswert verwendet werden kann.

Die thermischen Zeitkonstanten der Heizsysteme dagegen liegen im Bereich mehrerer Sekunden [91] und können nicht vernachlässigt werden. Abbildung 3.2 zeigt links das verwendete Modell der Heizsysteme. Der temperaturabhängige Heizwiderstand wird über einen Leistungsschalter mit dem Bordnetz verbunden. Die entstehende Verlustleistung wird in ein thermisches Modell gespeist, das die Leitertemperatur berechnet. Das thermische Modell besteht aus je einer thermischen Masse für den Heizwiderstand sowie für das zu heizende Objekt. Diese ist über einen thermischen Leiter mit dem Heizwiderstand verbunden und führt die Energie über Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung an die Umgebung ab.

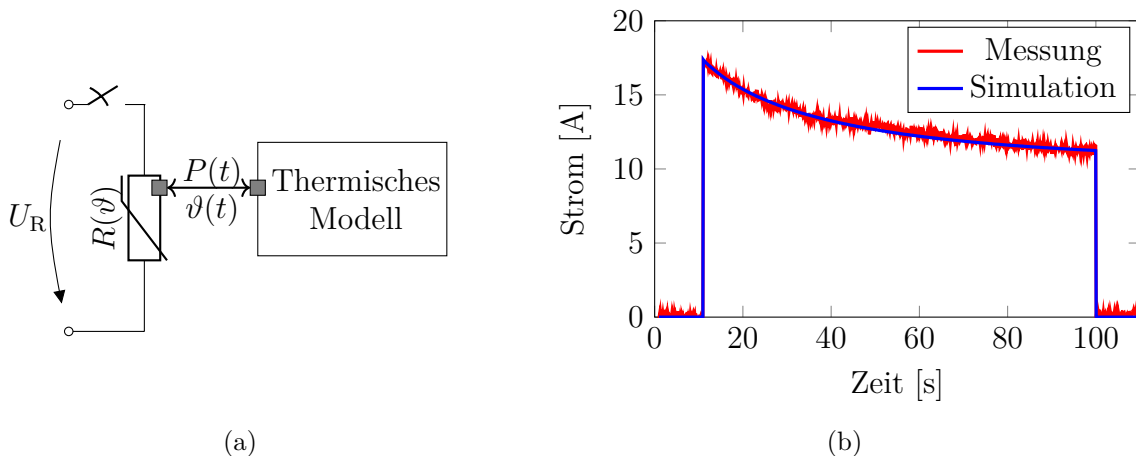


Abbildung 3.2: Modell einer Sitzheizung (links): Aus der Verlustleistung wird mit Hilfe eines thermischen Modells die Leitertemperatur und daraus der Wert des elektrischen Widerstands berechnet. Die rechte Abbildung zeigt die Gegenüberstellung des simulierten Stromverlaufs einer Sitzheizung mit der Messung aus einem Fahrzeug.

In Abbildung 3.2 (b) ist exemplarisch die Messung der Aufheizphase einer Sitzheizung in einem Fahrzeug und der simulierte Stromverlauf des parametrisierten Sitzheizungsmodells dargestellt. Beide Kurven weisen eine sehr gute Übereinstimmung auf. Der Strom der Sitzheizung sinkt innerhalb von 90 s von 18 A auf 11 A. Im Anschluss an die Aufheizphase geht die Sitzheizung in einen pulswertenmodulierten<sup>9</sup> Betrieb über, um eine konstante Temperatur an der Sitzoberfläche zu halten.

<sup>9</sup>Die Frequenz der Pulsweitenmodulation ist bei Heizsystemen oftmals sehr gering und liegt im Millihertzbereich.

Die hohen thermischen Zeitkonstanten in Kombination mit der menschlichen Temperaturwahrnehmung<sup>10</sup> schaffen, insbesondere bei den Heizsystemen, einen effektiven Freiheitsgrad für ein Energie- und Leistungsmanagement. So wurden im Bereich des elektrischen Leistungsmanagements die Heizsysteme in [46] für eine prädiktive Vorkonditionierung des Energiebordnetzes genutzt und in [120, 121] für einen reaktiven Lastabwurf im Falle eines plötzlichen Spannungseinbruchs.

#### 3.2.2 Leistungsverbraucher

Ein Großteil der elektrischen Verbraucher in einem modernen Kraftfahrzeug sind elektronische Steuergeräte (*ECU*) aus dem Infotainmentbereich oder weitere Steuergeräte zur Realisierung von Assistenzfunktionen und grundlegenden Fahrzeugeigenschaften. Von einem energetischen Gesichtspunkt aus betrachtet, haben diese Geräte einen bestimmten Wirkleistungsbedarf  $P(t)$ , den sie zur Erfüllung ihrer Funktionalität benötigen. Dieser kann bei sicherheitsrelevanten Komponenten weder reduziert noch zeitlich verschoben werden. Im Gegensatz zu den Heizsystemen ist bei den nicht sicherheitsrelevanten Komponenten eine Degradation oder kurzzeitige Abschaltung meist nur unter massiven Komforteinbußen für den Kunden möglich. Diese Möglichkeit kann bestenfalls als Notfallstrategie angesehen werden. Eine Ausnahme bilden an dieser Stelle Bordnetzverbraucher mit einer hohen Funktionsträgheit, wie beispielsweise der elektrische Motorlüfter oder kleine Kühlschränke im Luxussegment [24].

Die elektronischen Bauteile innerhalb der Steuergeräte werden üblicherweise über eine stabilisierte Spannung auf einem niedrigeren Niveau als dem der Bordnetzspannung versorgt. Diese wird von einer leistungselektronischen Eingangsstufe bereitgestellt. Eine häufig eingesetzte Topologie ist der Synchronwandler [68], wie in Abbildung 3.3 dargestellt. Diese Topologie wird in dieser Arbeit, stellvertretend für sämtliche Gleichspannungswandler, verwendet. Die Schaltung des Synchronwandlers lässt sich aus den Basisschaltungen des Hoch- bzw. des Tiefsetzstellers ableiten. Die Grundtopologie des Tiefsetzstellers besteht aus einem *High-side*-Schalter  $S$ , einer Diode im Kommutierungspfad, einer Induktivität sowie Ein- und Ausgangskondensatoren. Zur Reduzierung der Durchlassverluste wird die Diode des Tiefsetzstellers durch einen zweiten Leistungsschalter (den *Low-side*-Schalter  $\bar{S}$ ) ersetzt und im Gegentakt zu Schalter  $S$  angesteuert<sup>11</sup>. Der Wirkungsgrad von Gleichspannungswandlern ist stark abhängig von den aktuellen Klemmenwerten des Wandlers. Aus dem relativ weiten Betriebsbereich der Bordnetzspannung resultieren selbst bei konstantem Wirkleistungsbedarf der Funktion große Änderungen der Ströme, Spannungen und Übersetzungsverhältnisse und damit des Wirkungsgrades.

---

<sup>10</sup>In [93] wurde für Sitzheizungen eine Wahrnehmbarkeitsschwelle von  $0,5^\circ\text{C}$  ermittelt.

<sup>11</sup>Zudem erlaubt diese Modifikation einen bidirektionalen Leistungsfluss solange  $u_2 < u_1$ . Diese Möglichkeit hat aber im Kraftfahrzeug nur bei Gleichspannungswandlern Relevanz, die verschiedene Spannungsebenen miteinander koppeln.

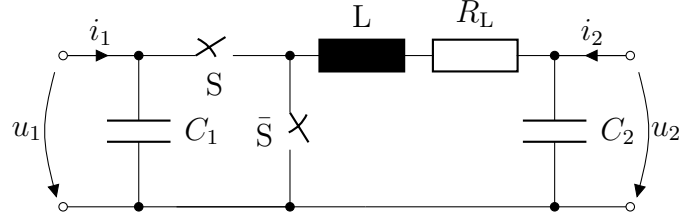


Abbildung 3.3: Prinzipschaltbild des implementierten Simulationsmodells eines Synchronwandlers: Die beiden Schalter der Halbbrücke wurden durch ein Gleichungssystem ersetzt, das die Übertragungsfunktion und die Verluste in den Halbleitern berücksichtigt.

Zur Simulation elektrischer Schaltungen hat sich insbesondere die Simulationssoftware *SPICE* [94] zu einem De-facto-Standard entwickelt. Die meisten Halbleiterhersteller stellen *SPICE*-Modelle ihrer Produkte zur Verfügung. Mit diesen detaillierten Modellen der Leistungshalbleiter, welche zudem in diversen Detaillierungsstufen vorliegen [135], können die in den Halbleitern entstehenden Verluste relativ genau berechnet werden. Die *SPICE*-Modelle würden sich prinzipiell auch in eine Modelica-basierte Simulationsumgebung integrieren lassen [90], allerdings ist der Einsatz schaltender Modelle in einer Systemsimulation nicht zielführend, da der Rechenaufwand proportional zur Schaltfrequenz<sup>12</sup> steigt.

Zur Vermeidung der Berechnung einzelner Schaltvorgänge der Leistungshalbleiter in einer Systemsimulation bietet sich der Einsatz von Mittelwertmodellen an. Die Halbbrücke kann somit durch die Gleichungen eines idealen Gleichspannungsübertragers [36] ersetzt werden:

$$u_2 = D \cdot u_1 \quad (3.4)$$

$$-i_1 = D \cdot i_2 \quad (3.5)$$

Spannungen und Ströme beider Seiten sind damit über das Tastverhältnis  $D$  der Halbleiter gekoppelt. Um die Verluste in den Halbleitern mit zu berücksichtigen, kann an dem Vierpol der Halbbrücke eine Leistungsbilanz nach

$$P_1 + P_2 - P_L = 0 \quad (3.6)$$

aufgestellt werden, wobei  $P_L$  die Summe der in den Halbleitern auftretenden Durchlass-, Schalt- und Ansteuerungsverluste ist:

$$P_L = P_{L,S,Rds} + P_{L,S,sch} + P_{L,\bar{S},Rds} + P_{L,\bar{S},sch} + 2 \cdot P_{L,Gate} \quad (3.7)$$

<sup>12</sup>Moderne Gleichspannungswandler in diesem Leistungsbereich erreichen Schaltfrequenzen von mehreren hundert Kilohertz bis in den Megahertzbereich.

### 3 Modellbildung und Simulation

Die analytischen Zusammenhänge der einzelnen Verlustmechanismen sind bekannt und in Literatur [68, 129] und Applikationsberichten [32] dokumentiert. Für diese Implementierung wurde folgendes Gleichungssystem verwendet:

$$P_{L,S,Rds} = R_{ds,on} \cdot i_2^2 \cdot D \quad (3.8)$$

$$P_{L,S,sch} = \frac{1}{2} \cdot v_1 \cdot (-i_2) \cdot (t_{fall} + t_{rise}) \cdot f_S \quad (3.9)$$

$$P_{L,\bar{S},Rds} = R_{ds,on} \cdot i_2^2 \cdot (1 - D) \quad (3.10)$$

$$P_{L,\bar{S},sch} = 0 \quad (3.11)$$

$$P_{L,Gate} = Q_{g,total} \cdot U_{drive} \cdot f_S \quad (3.12)$$

Die ohmschen Verluste in den Halbleitern werden über den Durchlasswiderstand  $R_{ds,on}$  der Halbleiter in angeschaltetem Zustand und den im Halbleiter fließenden Strom berechnet. Dieser ist wiederum vom aktuellen Tastverhältnis abhängig. Die Schaltverluste im *High-side*-Schalter  $S$  sind bedingt durch die nicht ideal schaltenden Halbleiter und berechnen sich nach (3.9), wobei hier von einer konstanten Änderung von Spannung und Strom während des Schaltvorgangs ausgegangen wird. Das gesamte Gleichungssystem ist somit nur noch von den aktuellen Klemmenwerten, der Schaltfrequenz  $f_S$ , dem Tastverhältnis und einigen wenigen Datenblattparametern der Leistungshalbleiter abhängig. Die benötigten Datenblattparameter sind der Durchlasswiderstand  $R_{ds,on}$ , die Ladungsmenge  $Q_{g,total}$ , die zum Aufladen des Gates benötigt wird, und die treibende Spannung des Gatetreibers  $U_{drive}$ .

Wird das beschriebene Gleichungssystem anstatt der schaltenden Elemente als Vierpol in das Simulationsmodell integriert, ergibt sich das gewünschte Mittelwertmodell des Synchronwandlers. Die ohmschen Verluste der Induktivität werden über ein Widerstandsmodell dargestellt. Die in den Eingangs- und Ausgangskondensatoren auftretenden Verluste durch den Rippelstrom werden durch die fehlenden Schaltvorgänge nicht berücksichtigt. Das Modell zeichnet sich durch sehr schnelle Rechenzeiten aus, berücksichtigt aber trotzdem die wesentlichen Verlustmechanismen in den Leistungshalbleitern.

Die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von Ausgangsstrom und Tastverhältnis ist in Abbildung 3.4 am Beispiel eines 250 W-Gleichspannungswandlers mit einer konstanten Ausgangsspannung von 5 V dargestellt. Wie zu erwarten, sinkt im Bereich kleiner Ströme und hoher Übersetzungsverhältnisse der Wirkungsgrad sehr stark ab. Das Optimum befindet sich im Teillastbereich mit abfallender Tendenz in Richtung steigender Ströme. Dies ist durch die quadratisch ansteigenden ohmschen Verluste erklärbar. Das Wirkungsgradkennfeld wurde mit einer *SPICE*-Implementierung derselben Schaltung validiert. Abbildung 3.5 zeigt die absolute Abweichung des Wirkungsgrades  $\Delta\eta$  im stationären Betrieb. Es zeigt sich in den relevanten Betriebsbereichen eine absolute Abweichung von maximal ca. 1%. Nur in Bereichen sehr geringer Ströme und sehr großer Übersetzungsverhältnisse kommt es zu größeren Abweichungen. Für die in dieser Arbeit betrachteten Leistungsverbraucher wurden Synchronwandler in verschie-

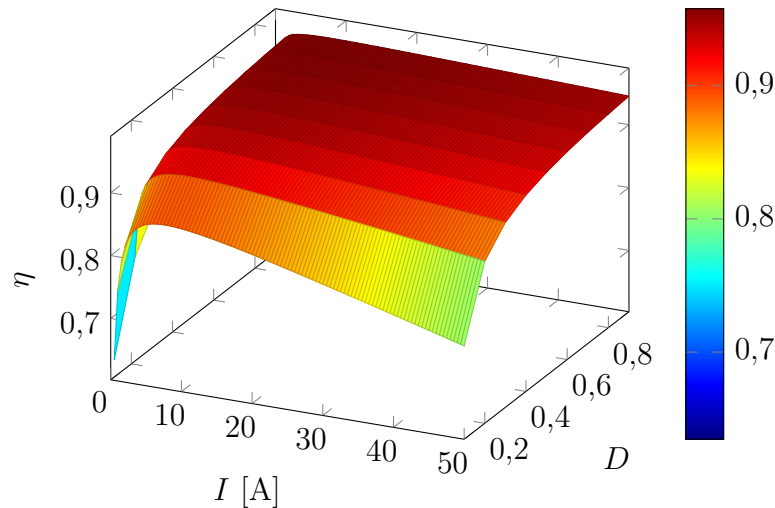


Abbildung 3.4: Wirkungsgradkennfeld des Modells des implementierten Gleichspannungswandlers in Abhängigkeit von Ausgangsstrom und Tastverhältnis.

denen Leistungsklassen ausgelegt, um die leistungselektronische Eingangsstufe an die jeweiligen Leistungsverbraucher anzupassen.

Zudem erlaubt das Modell durch die Beibehaltung der Induktivitäten und Kapazitäten eine sehr genaue Abbildung der dynamischen Eigenschaften des Gleichspannungswandlers. Die Auslegungswerte dieser passiven Bauelemente weisen eine umgekehrte Proportionalität zur Schaltfrequenz auf. Aufgrund der hohen Schaltfrequenz moderner Gleichspannungswandler und der damit verbundenen sehr kleinen Werte der verbauten Induktivitäten und Kapazitäten, liegen die dynamischen Effekte in einem Frequenzbereich, der in dieser Arbeit nicht betrachtet wird. Daher wird auf eine Validierung der dynamischen Eigenschaften des Modells an dieser Stelle verzichtet und auf [V2] verwiesen.

#### 3.2.3 Dynamische Hochleistungsverbraucher

In die Kategorie der Hochleistungsverbraucher fallen vor allem Aktoren aus dem Fahrwerksbereich wie beispielsweise das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), die Hinterachsschräglaufrregelung (HSR) und die elektrische Lenkkraftunterstützung. Diese Komponenten werden entweder direkt vom Fahrer durch Interaktion mit dem Lenkrad und der Pedalerie oder von der Fahrdynamikregelung beeinflusst. Energetisch spielen diese Systeme eine eher untergeordnete Rolle, da sich die nachgelagerte Aktorik den Großteil der Fahrzeit nicht im aktiven Betrieb befindet.

Der Grundlastanteil kann daher mit der im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Methodik modelliert werden. Im aktiven Betrieb wiederum sind diese Systeme für die

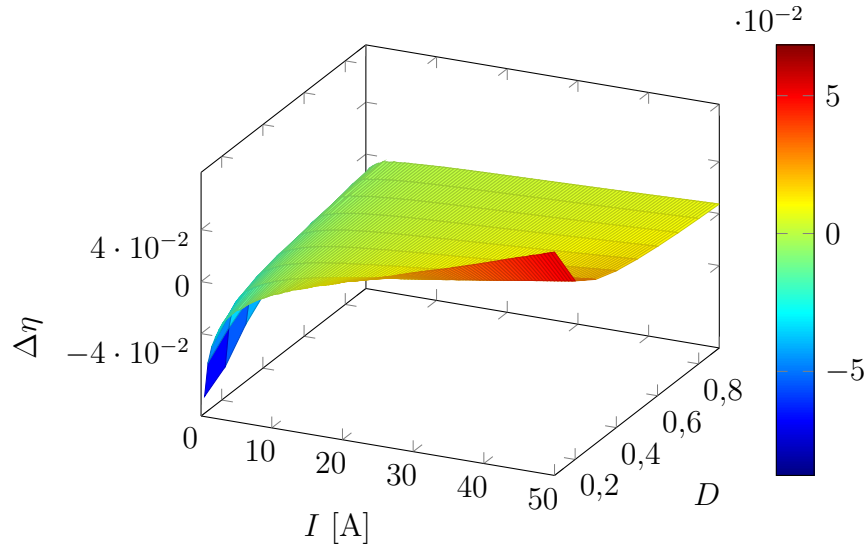


Abbildung 3.5: Absolute Abweichung  $\Delta\eta$  des Wirkungsgrades zwischen dem implementierten Modell und der *SPICE*-Simulation.

Bordnetzstabilität als äußerst kritisch zu betrachten, da sie aufgrund ihrer Sicherheitsrelevanz nicht degradierbar sind. Zudem greifen bei kritischen Betriebszuständen des Fahrzeugs oft mehrere dieser Aktoren zeitgleich ein, wodurch sich die Leistungsaufnahmen überlagern. Abbildung 3.6 zeigt die Summenleistung der Fahrwerkssysteme während eines Ausweichmanövers. Die Spitzenleistung bei dieser Messung beträgt ca. 2,5 kW. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge im Fahrwerk ist eine detaillierte Modellierung dieser Komponenten für Betrachtungen der Spannungsstabilität in der elektrischen Energieversorgung nicht zielführend. Es wird stattdessen auf Strom- und Leistungsprofile zurückgegriffen, welche auf Messungen mit einem Versuchsträger beruhen. Um die gemessenen Profile auf andere Fahrzeugklassen oder Intensitäten zu portieren, können die Leistungsprofile entsprechend skaliert werden.

Ein Eingriff des Energiemanagements in das Verhalten der Fahrwerksregelsysteme ist aus Sicherheitsgründen ausgeschlossen. Aufgrund des kybernetischen Ansatzes teilen die Hochleistungskomponenten dem Energie- und Leistungsmanagement aber die Leistung mit, welche ohne Vorwarnung von der jeweiligen Komponente aus dem Bordnetz bezogen werden kann. Diese Leistung wird in dem Vektor  $\vec{P}_{\text{Risk},V}$  für vier Zeitabschnitte von einer Millisekunde bis zu einer Sekunde nach (3.13) an das Energiemanagement kommuniziert. Wie in [45] beschrieben, hängt die Risikoleistung von einer Vielzahl von Faktoren ab und ist auch immer mit einer gewissen Eintrittswahrscheinlichkeit belegt. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Risikoleistung jedoch als statisch angenommen und es werden die in (3.13) genannten Werte verwendet, welche auch als blaue Linie in Abbildung 3.6 dargestellt sind.

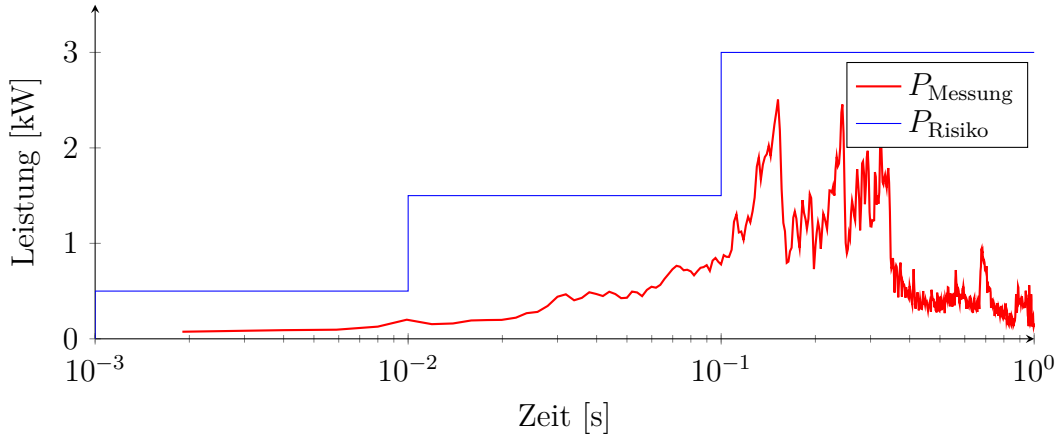


Abbildung 3.6: Summierter Leistungsverlauf aller Fahrwerksregelsysteme während eines Ausweichmanövers: Die blaue Linie zeigt die für diese Arbeit verwendete einhüllende Risikoleistung  $P_{\text{Risiko}}$ .

$$\vec{P}_{\text{Risk},V} = \begin{pmatrix} P_{\text{Risk},V,1 \text{ ms}} \\ P_{\text{Risk},V,10 \text{ ms}} \\ P_{\text{Risk},V,100 \text{ ms}} \\ P_{\text{Risk},V,1 \text{ s}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 500 \text{ W} \\ 500 \text{ W} \\ 1,5 \text{ kW} \\ 3 \text{ kW} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

### 3.2.4 Schnittstelle zum Energie- und Leistungsmanagement

Die Kommunikation zwischen den Komponenten und dem Energiemanagement erfolgt über eine standardisierte Schnittstelle. Diese ist für jede Komponente in einer Komponentengruppe, also elektrische Verbraucher, Erzeuger und Speicher, identisch. An dieser Stelle wird die grundlegende Funktionsweise der Schnittstelle zwischen den Bordnetzverbrauchern und dem Energiemanagement beschrieben.

Die Bordnetzverbraucher melden über den Statusvektor  $\vec{s}_i$  aktuelle Statusinformationen an das kybernetische Energiemanagementsystem. Dazu zählen beispielsweise die aktuellen Klemmenwerte sowie grundlegende Eigenschaften, wie der Nennstrom und der gewünschte Spannungsbereich. Des Weiteren beurteilen die Komponenten sich selbst in Bezug auf ihren möglichen Einfluss auf die Spannungsstabilität. Hochleistungsverbraucher aus dem Fahrwerksbereich melden dem Energiemanagement die Risikoleistung  $\vec{P}_{\text{Risk},V}$ , die sie im Falle eines Eingriffes ohne Vorwarnung aus dem Bordnetz entnehmen. Degradierbare Verbraucher dagegen melden dem Energiema-

nagement, welche Reserveleistung  $\vec{P}_{\text{Res},V}$  sie kurzfristig bereitstellen können<sup>13</sup>. Ebenso wie die Risikoleistung ist die Reserveleistung in Vektor (3.14) nach den Zeithorizonten von einer Millisekunde bis zu einer Sekunde definiert, in denen die Leistung zur Verfügung gestellt werden kann. Dadurch ist im überlagerten Energiemanagement durch einfache Summation der Risiken und Reserven aller Komponenten, eine schnelle Beurteilung des aktuellen Zustandes möglich. Zudem wird auf diese Weise das konkrete Wissen über die Spezifika einer Komponente vom eigentlichen Energiemanagement losgelöst und in der Komponente gehalten.

$$\vec{P}_{\text{Res},V} = \begin{pmatrix} P_{\text{Res},V,1 \text{ ms}} \\ P_{\text{Res},V,10 \text{ ms}} \\ P_{\text{Res},V,100 \text{ ms}} \\ P_{\text{Res},V,1 \text{ s}} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Der Kommunikationspfad vom Energiemanagementsystem zu den elektrischen Verbrauchern wird durch den Energiemanagementvektor  $\vec{m}$  bestimmt, der die globalen Modifikatoren enthält. Der derzeitige Entwicklungsstand enthält lediglich den Modifikator der Energieverfügbarkeit (EV), auf welchen nur die elektrischen Verbraucher reagieren. Im Sinne des in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen kybernetischen Ansatzes wird die Entscheidung auf Modifikatoren zu reagieren, in der Komponente selbst getroffen und nicht in einer zentralen Steuerung, wie es in herkömmlichen Energiemanagementsystemen der Fall ist. Die Reaktion der Verbraucher ist in der Kontrollebene eines jeden Verbrauchers hinterlegt und erfolgt kennlinienbasiert. Abbildung 3.7 zeigt Beispiele von Kennlinien, nach denen einige Verbraucher auf den Modifikator der Energieverfügbarkeit reagieren.

Sicherheitsrelevante oder für den grundlegenden Fahrzeugbetrieb notwendige Verbraucher sind nicht degradierbar und weisen, wie in der grünen Kennlinie hinterlegt, keinerlei Reaktion auf die Energieverfügbarkeit auf. Die rote Kennlinie steht für Komponenten, die in ihrer Leistungsaufnahme regelbar sind, wie beispielsweise elektrische Lüfter. Bei Unterschreiten einer gewissen Schwelle reduzieren diese Systeme kontinuierlich ihre Leistungsaufnahme und tragen dadurch zur Stabilisierung des Systems bei. Schaltbare Verbraucher, wie die Heizsysteme, folgen der blauen Kennlinie. Im Bereich einer Energieverfügbarkeit von 100 % sind diese Systeme im Normalbetrieb.

---

<sup>13</sup>In dieser Arbeit wird nur der Vorhalt der entsprechenden Leistung betrachtet, unabhängig von der technischen Umsetzung der Bereitstellung dieser Reserveleistung. Sie kann entweder über autonome Mechanismen von den Komponenten selbst bereitgestellt werden [119] oder im Vorfeld vom Energiemanagement angefordert werden [45].



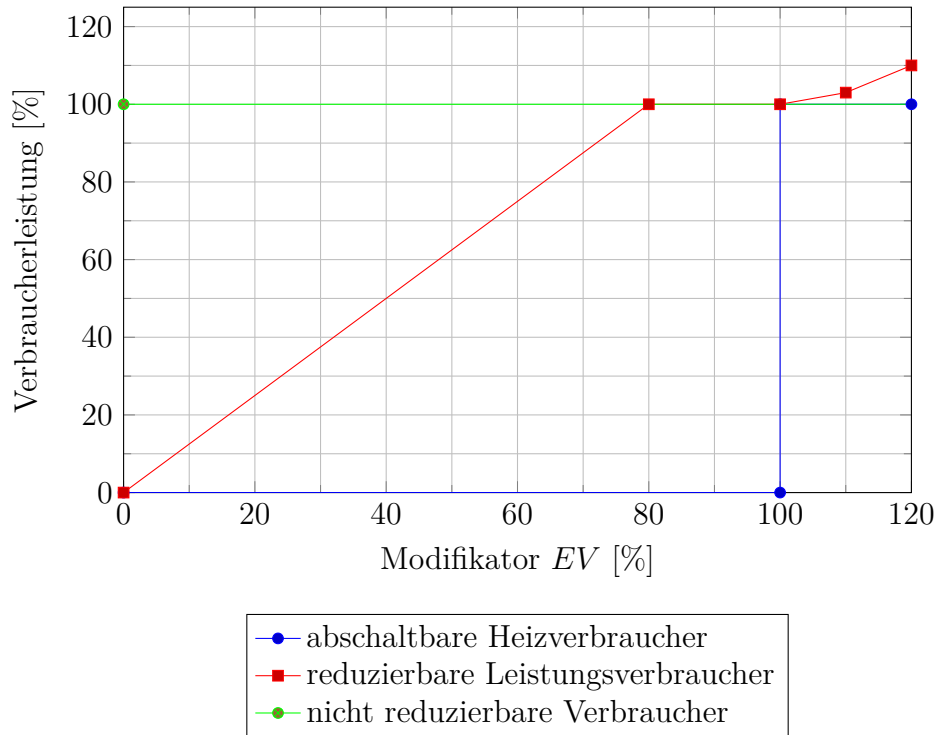


Abbildung 3.7: Die Möglichkeit zur Verbraucherdegradation kann in den Kontrollebenen der Verbraucher in Tabellenform hinterlegt werden.

### 3.3 Erzeuger

In diesem Abschnitt wird das verwendete Modell eines Bordnetzgenerators und dessen Schnittstelle zum Energie- und Leistungsmanagement erläutert.

#### 3.3.1 Klauenpolgenerator

Das vorgestellte Modell ist eine Erweiterung des in [119] entwickelten Verhaltensmodells eines Klauenpolgenerators. Das Modell bezieht sich auf denselben 230 A-Generator, der auch in den Bordnetzprüfstand integriert ist. Das Verhaltensmodell wurde mit dem Fokus auf die dynamischen Eigenschaften des Generators und dessen Klemmenverhalten entwickelt. Es besteht aus den drei Teilmodellen Generatorregler, Erreger- und Statorkreis.

Die Struktur des erweiterten Generatormodells ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Der Generatorregler misst die Klemmenspannung des Generators  $U_{\text{Gen}}$  und regelt sie über einen Zweipunktregler auf den gewünschten Sollwert. Als Stellgröße dient dazu das Tastverhältnis  $D_{\text{Reg}}$ , mit dem ein Schalter im Erregerkreis angesteuert wird. Zusätzlich sind in dem Generatorregler weitere Funktionen, wie die Load-Response-

Funktionalität<sup>14</sup>, implementiert. Der Erregerkreis wird durch die Erregerinduktivität  $L_e$  und deren Innenwiderstand  $R_e$  abgebildet. Beim Schließen des idealen Schalters durch den Generatorregler wird der Erregerkreis mit der positiven Generatorklemme verbunden. Daraufhin stellt sich ein steigender Stromfluss ein. Für die Kommutierung des Stromes bei sich öffnendem Schalter wird zudem eine Freilaufdiode parallel zur Erregerinduktivität benötigt<sup>15</sup>. Der sich im Erregerkreis einstellende Strom  $I_e$  dient als Eingangsgröße für das Modell des Stators. Der resultierende Generatorstrom  $I_{gen}$  wird unter Berücksichtigung der aktuellen Drehzahl  $\omega$  berechnet. Dieser wird über eine gesteuerte Stromquelle in das Bordnetz eingepreßt.

Da in dieser Arbeit unter anderem eine Optimierung hinsichtlich der Energieeffizienz erfolgen soll, ist es erforderlich, den Wirkungsgrad und damit das vom Riemtrieb abgenommene Drehmoment des Generators in jedem Betriebspunkt zu kennen. Der Wirkungsgrad des untersuchten Generators ist dabei stark von seinen aktuellen Betriebsparametern abhängig. Um die Rückwirkung auf das mechanische Teilsystem des Riemtriebs korrekt abzubilden, ist in dem Modell ein vierdimensionales Wirkungsgradkennfeld hinterlegt. Dieses bestimmt aus Spannung, Strom und Drehzahl des Generators den aktuellen Betriebspunkt, berechnet das resultierende Drehmoment  $M$  und prägt dieses auf das rotationsmechanische System ein.

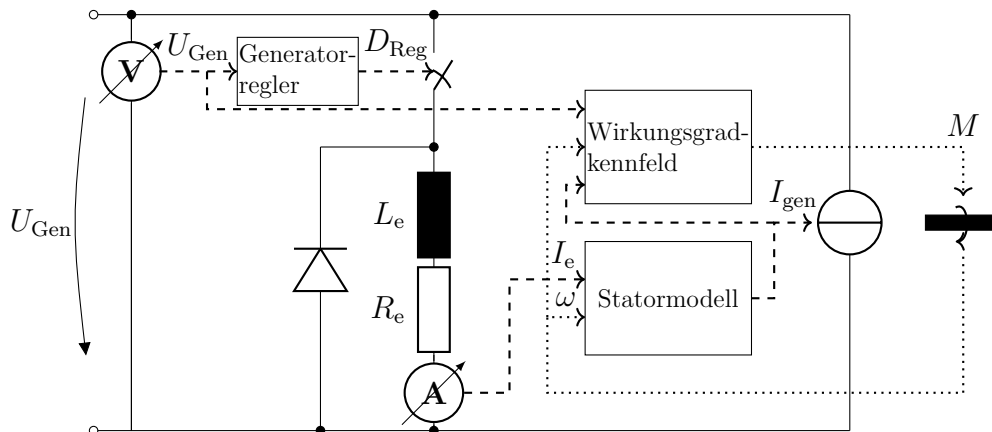


Abbildung 3.8: Grundstruktur des erweiterten Generatormodells: Der Generatorregler regelt über den Erregerstrom die Klemmenspannung des Generators. Zur Berechnung des am Riemtrieb anliegenden Drehmoments wird ein Wirkungsgradkennfeld verwendet.

Zur Bestimmung des Wirkungsgradkennfelds wurde der Generator über seinen kompletten Betriebsbereich vermessen. Dazu wurde der in Abschnitt 4.2.3 beschriebene

<sup>14</sup>Damit ist die Begrenzung der Generatordynamik im Bereich geringer Drehzahlen gemeint.  
<sup>15</sup>In praktischen Ausführungen werden sowohl *High-side*- als auch *Low-side*-Schalter verwendet. Aufgrund der niedrigen Spannungslage handelt es sich dabei meist um MOSFET-Schalter. Moderne Generatorregler haben Regler, Leistungsschalter und Freilaufdiode auf dem gleichen Chip integriert[98, 100].

Generatorprüfstand verwendet. Der Prüfstand ermittelt die elektrische Ausgangsleistung des Generators über eine Strom- und Spannungsmessung. Die mechanisch aufgenommene Leistung wird über die Erfassung von Drehmoment und Drehzahl bestimmt. Die Einstellung der Arbeitspunkte erfolgt durch die Wahl der Drehzahl der Antriebsmaschine, die Sollwertvorgabe für die Ausgangsspannung des Generators und über eine elektronische Last zur Einstellung des Generatorstroms. Die Vermessung wurde für folgende Betriebspunkte durchgeführt:

- *Spannung:* Die Sollwertvorgabe für den Generatorregler wurde von 11 V bis 16 V in 1 V-Schritten durchgeführt.
- *Strom:* Der Generatorstrom wurde von 10 A bis 230 A in 10 A-Schritten eingestellt. Die Leistungsbeschränkung des Generators bei niedrigen Drehzahlen wurde dabei berücksichtigt, so dass im unteren Drehzahlbereich nur bis zum maximal zulässigen Generatorstrom gemessen wurde.
- *Drehzahl:* Die Generatordrehzahl wurde in 12 Stufen von  $1500 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  bis  $18000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  durchlaufen<sup>16</sup>. Aufgrund größerer Änderungen des Wirkungsgrades im unteren Drehzahlbereich wurde hier eine feinere Diskretisierung vorgenommen als bei hohen Drehzahlen.

Unter Berücksichtigung der Limitierung des Ausgangsstromes für niedrige Drehzahlen ergibt sich somit ein vierdimensionales Kennfeld mit 1410 Stützstellen. Zwischen den einzelnen Stützpunkten erfolgt eine lineare Interpolation. Abbildung 3.9 zeigt einen Ausschnitt dieses Kennfeldes für eine Sollspannung des Generators von 14 V<sup>17</sup>. Die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Generator Temperatur konnte aufgrund fehlender Klimatisierung nicht vermessen werden. Zur Vermeidung von Messfehlern durch Temperatureinflüsse wurde der Generator vor Beginn jeder Messung auf einem stationären Betriebspunkt gehalten, bis der thermische Beharrungszustand erreicht wurde.

Mit steigender Drehzahl steigt der Wirkungsgrad des Generators zunächst leicht an. Dies ist mit der überproportional großen Erregerleistung zu erklären, die bei geringen Drehzahlen benötigt wird. Ab ca.  $2000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  sinkt der Wirkungsgrad bei weiter steigender Drehzahl stetig ab. Dieser Effekt ist mit steigenden Reibungs- und Ventilationsverlusten mit zunehmender Drehzahl erklärbar. In der Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Generatorstrom zeigt sich ein ähnlicher Zusammenhang. Der sehr geringe Wirkungsgrad bei kleinen Strömen ist wiederum mit dem im Verhältnis sehr hohen statischen Verlusten durch Reibung und Ventilation zu erklären. Erst mit zunehmender Ausgangsleistung fallen diese Verluste nicht mehr so stark ins Gewicht. Nach Erreichen des maximalen Wirkungsgrades für die spezifische Drehzahl sinkt dieser mit weiter steigenden Strömen leicht ab, da die ohmschen Verluste quadratisch anwachsen.

---

<sup>16</sup>Unter Berücksichtigung eines Übersetzungsverhältnisses des Riementriebs von 2,73 entspricht dies einer Drehzahl von ca.  $550 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  bis  $6600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  im Antriebsstrang.

<sup>17</sup>Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden nur 8 der 12 vermessenen Drehzahlen aufgetragen.

Die Abhängigkeit von der gewählten Ausgangsspannung des Generators wird hier nicht separat dargestellt, jedoch zeigt sich ein steigender Wirkungsgrad mit zunehmender Generatorspannung. Dieser Zusammenhang wird durch den Diodenbrückengleichrichter und den damit verbundenen Spannungsabfall über den Gleichrichterioden<sup>18</sup> verursacht. Da die Durchlassspannung nur vom Generatorstrom und nicht von dessen Spannung abhängt, sinkt der relative Anteil dieser Verluste bei steigender Generatorspannung.

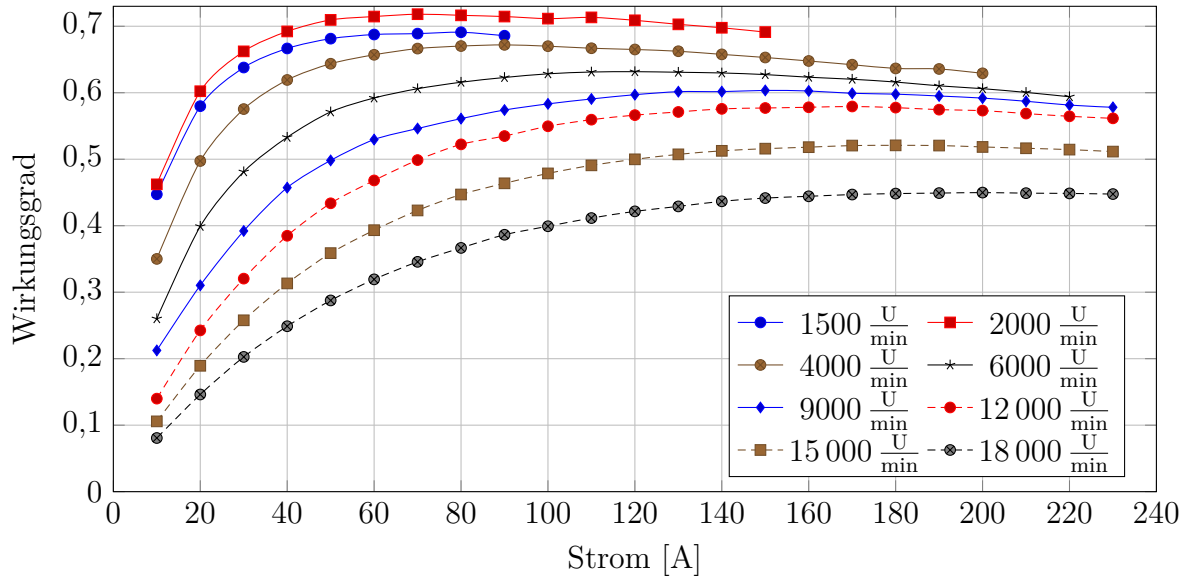


Abbildung 3.9: Abhängigkeit des Wirkungsgrades eines 230 A-Klauenpolgenerators von Ausgangsstrom und Drehzahl bei einer konstanten Generatorspannung von 14 V.

### 3.3.2 Schnittstelle zum Energie- und Leistungsmanagement

Analog zu den elektrischen Verbrauchern meldet der Generator seine aktuellen Statuswerte an die übergeordnete Komponentengruppe. Neben den Klemmenwerten zählen dazu die aktuelle Auslastung und seine kurzzeitig bereitstellbare Reserveleistung. Diese ist, wie bei den Verbrauchern, in einem Reserveleistungsvektor nach (3.15) mit vier Einträgen für die Zeitbereiche von einer Millisekunde bis zu einer Sekunde definiert.

$$\vec{P}_{Res,G} = \begin{pmatrix} P_{Res,G,1\text{ ms}} \\ P_{Res,G,10\text{ ms}} \\ P_{Res,G,100\text{ ms}} \\ P_{Res,G,1\text{ s}} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

<sup>18</sup>Moderne Gleichrichterdiode haben Durchlassspannungen von ca. 0,3 V.

Bei der Ermittlung der verfügbaren Leistungsreserven für den Vorschauhorizont  $\Delta t$  wird neben der maximal möglichen Stromsteilheit  $\left(\frac{dI_{\text{Gen}}}{dt}\right)_{\text{max}}$  des Generators auch der drehzahlabhängige Maximalstrom  $I_{\text{Gen,max}}(\omega)$  nach (3.16) berücksichtigt.

$$P_{\text{Res,G}}(\Delta t) = \begin{cases} U_{\text{Gen}} \cdot \left(\frac{dI_{\text{Gen}}}{dt}\right)_{\text{max}} \cdot \Delta t & \text{für } \left(\frac{dI_{\text{Gen}}}{dt}\right)_{\text{max}} \cdot \Delta t \leq (I_{\text{Gen,max}}(\omega) - I_{\text{Gen}}) \\ U_{\text{Gen}} \cdot (I_{\text{Gen,max}}(\omega) - I_{\text{Gen}}) & \text{für } \left(\frac{dI_{\text{Gen}}}{dt}\right)_{\text{max}} \cdot \Delta t > (I_{\text{Gen,max}}(\omega) - I_{\text{Gen}}) \end{cases} \quad (3.16)$$

Aufgrund seiner begrenzten Dynamik<sup>19</sup> liefert der Generator praktisch keinen Beitrag zur kurzfristigen Spannungsstabilisierung im Millisekundenbereich. Als Eingangsgröße für den Generatorregler dient die Sollspannung aus dem Energiemanagement.

## 3.4 Speicher

Dieser Abschnitt beschreibt zunächst die Simulationsmodelle der verwendeten Blei-Säure-Batterie und einer Lithium-Eisenphosphat-Batterie. Anschließend wird die Berechnung der von den Speichern bereitgestellten Reserveleistung sowie die Schnittstelle der Energiespeicher zum Energie- und Leistungsmanagement erläutert.

### 3.4.1 Blei-Säure-Batterie

Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, ist die Modellbildung und Parameterbestimmung sowohl für Lithium-Ionen- als auch für Blei-Säure-Batterien nach wie vor Gegenstand aktueller Forschungsaktivitäten. Die Modellierungstiefe reicht hier bis ins Innere der elektrochemischen Zelle und der Nachbildung des porösen Elektrodenmaterials [132]. Für einen Einsatz im Bereich der Systemsimulation können die Vorgänge im Inneren der Batterie aber vernachlässigt werden, da lediglich der Verlauf der Klemmenspannung relevant ist. Für diesen Einsatzzweck haben sich in der Praxis elektrische Ersatzschaltbilder in verschiedenen Varianten durchgesetzt [25, 27, 69, 86, 142]. Diese Ersatzschaltbilder haben in der Regel alle eine ähnliche Grundstruktur. Sie verwenden eine ladezustandsabhängige Spannungsquelle zur Modellierung der Ruhespannung  $U_0$  und einen in Serie geschalteten Widerstand  $R_i$  für den Innenwiderstand der Batterie. Das dynamische Verhalten der Batterie wird über weitere in Serie geschaltete Netzwerke aus Widerständen, Kapazitäten, Induktivitäten und Dioden nachgebildet. Zudem werden die Werte dieser Elemente oft in Abhängigkeit von Ladezustand und Gesundheitszustand, der Temperatur oder dem Batteriestrom implementiert. Ein großer Vorteil dieses Modellierungsansatzes ist, dass kein Wissen über den inneren Aufbau der

<sup>19</sup>Der maximale Stromgradient des betrachteten Generators beträgt ca.  $1,5 \frac{\text{A}}{\text{ms}}$ .

Batterie benötigt wird. Vielmehr lassen sich die Modellparameter für einfache Modelle oft direkt den Datenblättern der Batteriehersteller entnehmen. Parameter für detaillierte Modelle können über Messungen entweder direkt bestimmt oder über Fittingverfahren an die Messung angenähert werden.

Abbildung 3.10 zeigt das in dieser Arbeit verwendete Batteriemodell einer Blei-Säure-Batterie. Es besteht aus einer Spannungsquelle, einem Innenwiderstand und vier in Reihe geschalteten RC-Gliedern. Die Zeitkonstanten der RC-Glieder wurden zu 1 ms, 10 ms, 100 ms und 1 s gewählt. Sämtliche Parameter weisen eine Abhängigkeit vom aktuellen Ladezustand der Batterie auf, der über Kennlinien in dem Modell hinterlegt ist. Abhängigkeiten von Gesundheitszustand, Temperatur oder dem Batteriestrom wurden in dieser Arbeit aus Gründen des hohen Messaufwandes und der steigenden Komplexität nicht berücksichtigt.

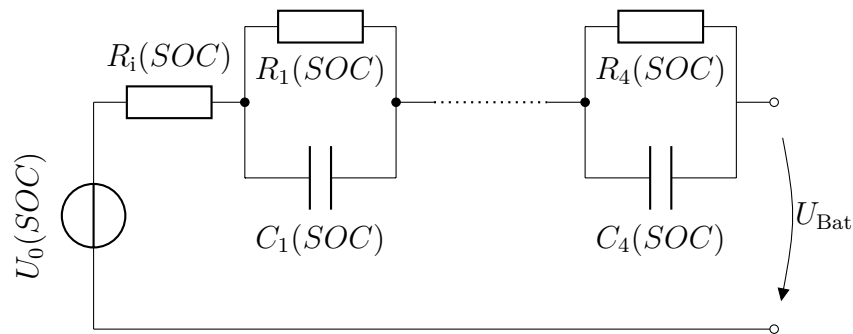


Abbildung 3.10: Verwendetes Simulationsmodell zur Abbildung einer Blei-Säure-Batterie in der Bordnetzsimulation: Sämtliche Parameter sind in Tabellenform in Abhängigkeit des Ladezustands hinterlegt und wurden messtechnisch ermittelt.

Die Ermittlung der Parameter und Kennlinien für die einzelnen Elemente im elektrischen Ersatzschaltbild erfolgt durch die Vermessung von vier Bleibatterien unterschiedlicher Kapazität. Zur Bestimmung der Ruhespannungskennlinie wurden die Lade- und Entladekennlinie mit kleinen Strömen vermessen und die beiden Kennlinien gemittelt. Die Parameter der RC-Glieder können näherungsweise aus den Spannungsantworten infolge von Strompulsen ermittelt werden. Die Pulsmessungen wurden über den gesamten Bereich des Ladezustandes von 10 % bis 100 % durchgeführt. Aus den Spannungsantworten lässt sich über den Spannungsabfall direkt der jeweilige Widerstand des RC-Glieds ablesen. Die Kapazität wurde unter Anwendung eines Fittingverfahrens an die Messung angepasst.

#### 3.4.2 Lithium-Eisenphosphat-Batterie

Blei-Säure-Batterien weisen insbesondere im bevorzugten Betriebsbereich hoher Ladezustände eine relativ geringe Ladeakzeptanz auf. Um den erhöhten Rekuperationsanforderungen eines aktiven Energiemanagementsystems gerecht zu werden, wurde eine

Batterie auf Lithium-Eisenphosphat-Basis ausgelegt und als Simulationsmodell implementiert. Für diese Auslegung wurden 1,1 Ah-Zellen des Formats *18650* verwendet, da deren dynamische Eigenschaften, für ein Simulationsmodell mit 2 RC-Gliedern, aus [19] bekannt sind. Die verwendete Konfiguration von vier seriell und 40 parallel geschalteten Zellen (*4s40p*) ergibt eine Batterie mit einer Kapazität von 44 Ah und einer Nennspannung von 13,2 V.

### 3.4.3 Schnittstelle zum Energie- und Leistungsmanagement

Die Batterie meldet an die überlagerte Speichergruppe im Energiemanagementsystem ihre Nennwerte, aktuelle Klemmenwerte sowie den Lade- und den Gesundheitszustand. Da es sich bei den heutzutage eingesetzten Batterien um passive Systeme handelt, sind derzeit keine Reaktionen auf globale Modifikatoren vorgesehen. Sobald aktive Energiespeicher<sup>20</sup> in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden, wäre denkbar, dass auch derartige Systeme aktiv auf Modifikatoren reagieren. Zudem beurteilt die Batterie, ebenso wie die Verbraucher und der Generator, ihre eigene Leistungsfähigkeit und kommuniziert diese über den in (3.17) definierten Vektor  $\vec{P}_{\text{Res,B}}$  an das Energie- und Leistungsmanagement.

$$\vec{P}_{\text{Res,B}} = \begin{pmatrix} P_{\text{Res,B},1 \text{ ms}} \\ P_{\text{Res,B},10 \text{ ms}} \\ P_{\text{Res,B},100 \text{ ms}} \\ P_{\text{Res,B},1 \text{ s}} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Batteriesysteme können bei Belastung kurzzeitig sehr hohe Ströme liefern, jedoch sinkt mit steigenden Strömen auch die Klemmenspannung der Batterie. Wird eine gewisse Mindestspannung  $U_{\text{Bat,min}}$  an den Klemmen der Batterie gefordert, so können die Leistungsreserven der Batterie näherungsweise über ihre Widerstände berechnet werden. Besteht das Batteriemodell lediglich aus einem Innenwiderstand  $R_i$  und einer Serienschaltung aus  $N$  RC-Gliedern, so kann der Gesamtwiderstand  $R_{\text{ges}}(\Delta t)$  unter der Annahme eines konstanten Stroms über die Innenwiderstände der Batterie für einen Stromfluss der Zeit des Vorschauhorizontes  $\Delta t$  berechnet werden [116]:

$$R_{\text{ges}}(\Delta t) = R_i + \sum_{n=1}^N R_n \cdot (1 - e^{-\frac{1}{R_n \cdot C_n} \cdot \Delta t}) \quad (3.18)$$

---

<sup>20</sup>Dabei handelt es sich um einen Energiespeicher mit zugehöriger Leistungselektronik, die den Energiefluss des Speichers regeln kann.

Über den Gesamtwiderstand  $R_{\text{ges}}(\Delta t)$  kann zunächst der Maximalstrom berechnet werden, welcher der Batterie entnommen werden darf, um die Mindestspannung nicht zu unterschreiten. Anschließend kann über diese Mindestspannung die maximale Reserveleistung berechnet werden:

$$P_{\text{res,B}}(\Delta t) = \frac{U_{\text{Bat}} - U_{\text{Bat,min}}}{R_{\text{ges}}(\Delta t)} \cdot U_{\text{Bat,min}} \quad (3.19)$$

## 3.5 Fahrzyklus und Kundeninteraktion

Der in Abbildung 3.11 dargestellte Zyklus zeigt einige Einträge des Umweltinformativvektors  $\vec{u}$  für die Bordnetzsimulation. Wie in Abschnitt 3.1 definiert, besteht dieser aus den Umweltinformationen und der Kundeninteraktion mit dem Fahrzeug.

Als Geschwindigkeitsprofil wird der *WLTC*<sup>21</sup> der Klasse 3<sup>22</sup> verwendet [136]. Aus der Geschwindigkeitsvorgabe wurden mit Hilfe der Modelica-Bibliothek *Powertrain Library* [61] die Drehmoment- und Drehzahlverläufe für ein Oberklassefahrzeug berechnet. Der Zyklus enthält fünf längere Stillstandsphasen, in denen die Start-Stopp-Funktionalität des Fahrzeugs aktiviert wird. In diesen Phasen wird das Bordnetz aus der Batterie versorgt. Zudem gibt es eine Vielzahl an Verzögerungsphasen in denen der Verbrennungsmotor vom Fahrzeug geschleppt wird. Da ohne Simulationsmodell des Verbrennungsmotors keine verwertbare Motortemperatur in der Simulation vorhanden ist, wird der Sollwert für den Motorlüfter über den Zyklus mit eingespeist.

Der Umweltzyklus kann nun um die Kundeninteraktion mit dem Fahrzeug erweitert werden. Für die in Kapitel 5 durchgeführte Optimierung wurde ein Kundenprofil mit zwei Fahrzeuginsassen konfiguriert. Zu Beginn der Fahrt werden von den Insassen zwei Sitzheizungen aktiviert und im Verlauf der Fahrt zunächst in der Leistung reduziert und dann abgeschaltet. Auch die Heckscheibenheizung wird zu Fahrtbeginn für ca. zehn Minuten zum Abtauen der Heckscheibe aktiviert. Zusätzlich laufen die Klimateilnehmer im Vorder- und im Fondbereich. Auch das Audiosystem wird vom Kunden bedient.

## 3.6 Kabelbaum

Die Grundlage für die Modellierung des Kabelbaums, der Sicherungselemente und der Karosserie bilden die Parameter des im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Bord-

<sup>21</sup>Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle.

<sup>22</sup>Ab einem Leistungsgewicht von  $34 \frac{\text{kW}}{\text{t}}$  werden die Fahrzeuge im *WLTC* als Hochleistungsfahrzeuge eingestuft und müssen mit der Klasse 3 den Zyklus mit der höchsten Maximalgeschwindigkeit von  $131 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  durchlaufen.



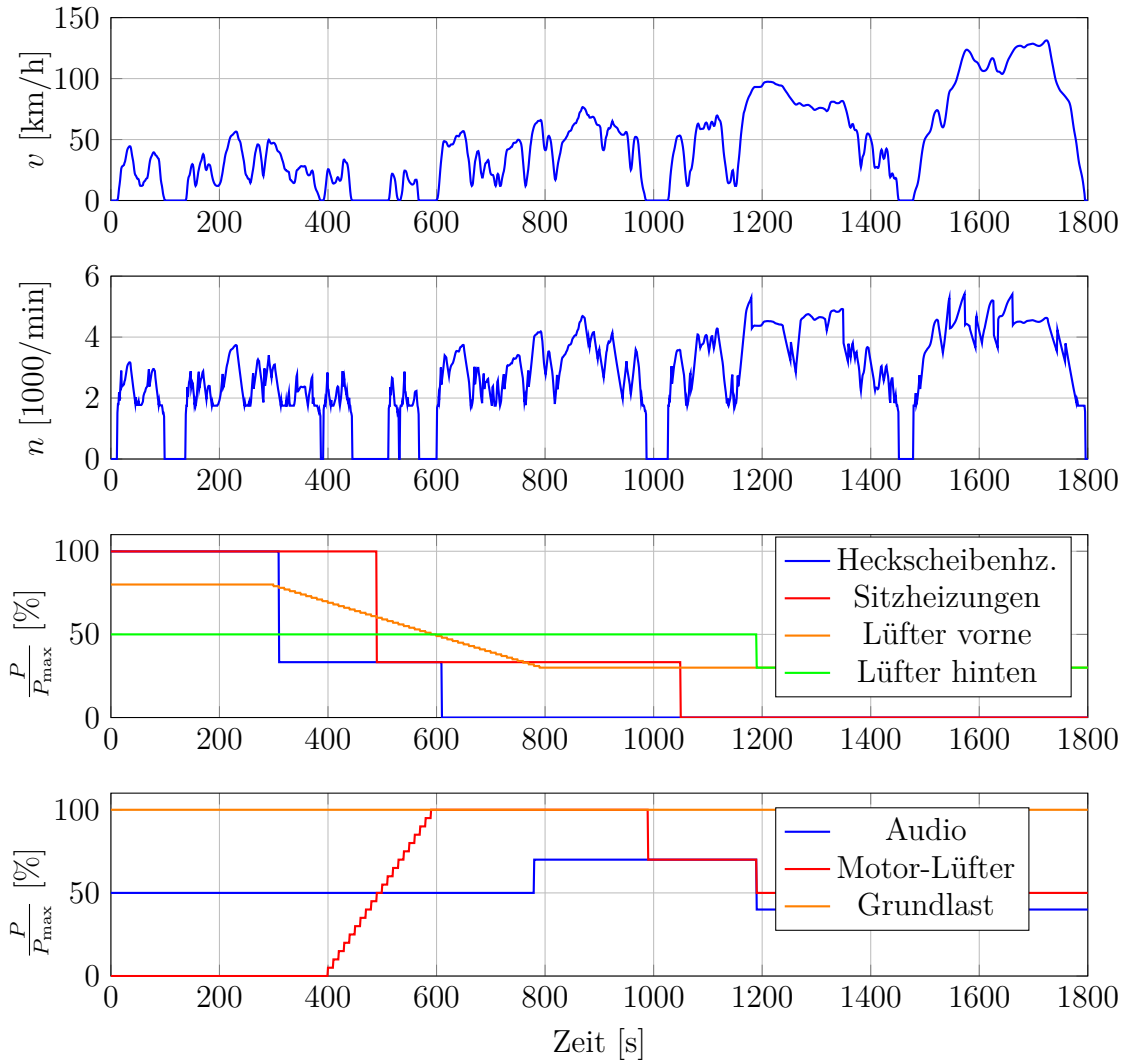


Abbildung 3.11: Als Fahrprofil wurde der *WLTC*-Zyklus der Klasse 3 verwendet und mit energetisch relevanten Bordnetzfunktionen überlagert.

netzprüfstandes. Dieser basiert auf der Karosserie eines BMW 7er, dem Kabelbaum einer Vollausstattung und den entsprechenden Stromverteilern und Sicherungselementen. Die Abmessungen und Durchmesser der Leiter sowie die Widerstandswerte der Schmelzsicherungen lassen sich direkt aus den Kabelbaumdaten entnehmen. Die Widerstände zwischen den einzelnen Massebolzen wurde bereits in [44] detailliert vermessen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Simulation längerer Zyklen im zweistelligen Minutenbereich mit dem Fokus auf energetische Zusammenhänge. Da die Betrachtung der höheren Frequenzanteile in den Strömen für eine energetische Aussage keinen Mehrwert bringt und ein Modell mit ohmsch-induktiven Leitern einen höheren

Modellierungs- und Berechnungsaufwand bedeutet [119], wurde zur Modellierung der Leiter des Kabelbaums und der Karosserie ein reines Widerstandsmodell gewählt.

### 3.7 Energie- und Leistungsmanagement

Das Energie- und Leistungsmanagement für das Energiebordnetz basiert im Wesentlichen auf dem kybernetischen Ansatz nach dem *Viable System Model* und wurde in [42] und [45] für Anwendungen im Energiebordnetz angepasst. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Durchgängigkeit zwischen Simulation und Prüfstand sowie auf der Validierung der optimierten Parameter liegt, wird eine vereinfachte Version des Energie- und Leistungsmanagements implementiert. Der wesentliche Unterschied zu der Implementierung nach [42] besteht in einem reduzierten Funktionsumfang. Des Weiteren wird auf eine starke Informationsverdichtung in Form von Kennzahlen und Zuständen verzichtet. Die Steuerung des Systems wird deshalb auf Basis physikalischer Einheiten betrieben.

Die Grundstruktur des implementierten Energie- und Leistungsmanagements ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Die hierarchische Struktur besteht für ein Bordnetz mit nur einer Spannungsebene aus drei Hierarchieebenen. Diese repräsentieren die Komponenten des Bordnetzes, die Komponentengruppen aus gleichartigen Komponenten und die 12 V-Ebene. Diese einzelnen Hierarchieebenen werden im Folgenden näher beschrieben.

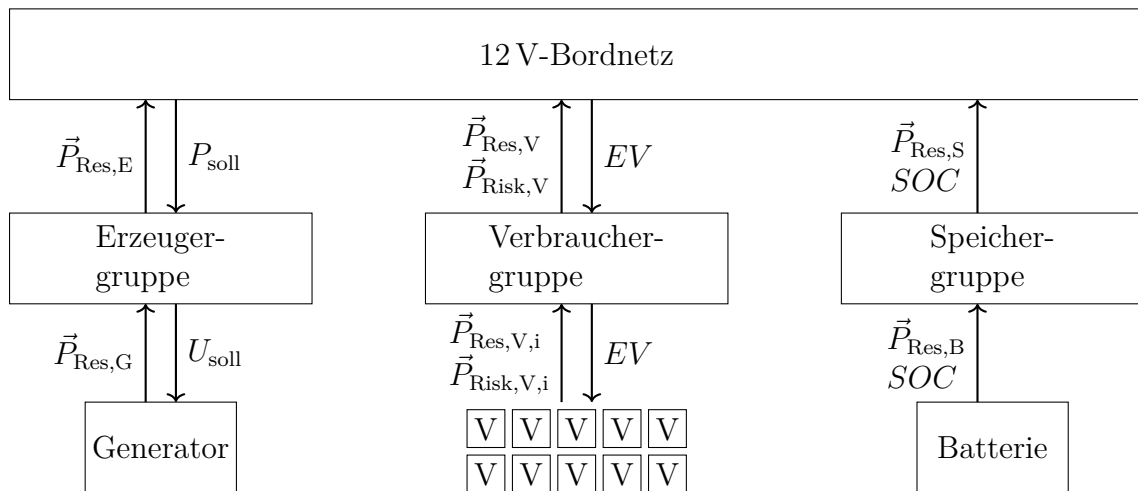


Abbildung 3.12: Grundstruktur des implementierten Energie- und Leistungsmanagementsystems: Die Grundstruktur basiert auf dem kybernetischen Ansatz des *Viable System Model*.

### 3.7.1 Hierarchieebene 0 – Komponenten

Auf der untersten Ebene des Energie- und Leistungsmanagements befinden sich diejenigen Anteile des Managementsystems, welche direkt den einzelnen Komponenten zuordenbar sind. Diese entsprechen den in den Abschnitten 3.2.4, 3.3.2 und 3.4.3 beschriebenen Funktionalitäten. Die heterogene Gesamtheit der Bordnetzkomponenten wird an dieser Stelle auf die drei Grundkomponenten der elektrischen Verbraucher, Erzeuger und Speicher reduziert. Es werden Informationen normiert und über eine einheitliche Schnittstelle an die nächste Hierarchieebene weitergeleitet.

### 3.7.2 Hierarchieebene 1 – Komponentengruppen

In der Hierarchieebene der Komponentengruppen findet eine weitere Informationsverdichtung statt. So kann von einer großen Anzahl an Bordnetzkomponenten auf die drei Komponentengruppen reduziert werden. Des Weiteren kann in den Komponentengruppen auch spezifische Funktionalität implementiert werden.

#### **Verbrauchergruppe**

In der Verbrauchergruppe werden die Informationen der einzelnen Verbraucher durch Summation zusammengefasst und so die Risiko- und die Reserveleistung für alle Verbraucher ermittelt. Zudem wird der Modifikator der Energieverfügbarkeit von der überlagerten 12 V-Ebene an die Verbraucher weitergeleitet.

Der Bedarf an elektrischer Energie im Bordnetz ist maßgeblich vom Kunden, seiner Fahrweise und seiner Nutzung der Komfort- und Infotainmentsysteme abhängig. Eingriffe des Energie- und Leistungsmanagements, wie z.B. die Degradation oder zeitweise Abschaltung von Komfortkomponenten, können vom Kunden als Fehler oder schlechte Qualität interpretiert werden. Auch die in Abschnitt 3.2.1 erwähnten Heizsysteme lassen sich nur über kurze Zeiträume von wenigen Sekunden unbemerkt deaktivieren und sind besser zur Spannungsstabilisierung geeignet. Aufgrund der für ein energetisches Management relativ geringen Freiheitsgrade der verwendeten Verbraucherkonfiguration wird auf ein aktives Management einzelner elektrischer Verbraucher verzichtet und es werden in dieser Arbeit nur die möglichen Leistungsreserven zur Spannungsstabilisierung berücksichtigt.

#### **Erzeugergruppe**

Da im aktuellen Ausbaustand der Kfz-Generator der einzige Erzeuger elektrischer Energie im Bordnetz ist, findet in der Erzeugergruppe keine weitere Datenverdichtung statt. Vom überlagerten Energiemanagement erhält die Erzeugergruppe die Sollwertvorgabe für die zu erzeugende elektrische Leistung. Diese wird von einem PI-Regler

mit Anti-Wind-Up-Funktionalität<sup>23</sup> in eine Sollspannungsvorgabe für den Generator gewandelt.

#### Speichergruppe

Da es sich bei den verwendeten Blei-Säure-Batterien um rein passive Systeme handelt, können keine Modifikatoren oder Sollwertvorgaben an die elektrischen Energiespeicher kommuniziert werden. Deshalb beschränkt sich der Ausbau der aktuellen Implementierung auf das Durchleiten der Informationen der Batterie zur nächsten Hierarchieebene.

### 3.7.3 Hierarchieebene 2 – 12 V-Bordnetz

In der Ebene des 12 V-Bordnetzes, die für das in dieser Arbeit betrachtete System auch die höchste Hierarchieebene darstellt, befindet sich das strategische Management des Gesamtsystems. In dieser Ebene werden die drei Komponentengruppen der elektrischen Verbraucher, Erzeuger und Speicher koordiniert. Das strategische Management verfolgt das Ziel, das Bordnetz möglichst stabil, zugleich aber auch energieeffizient zu betreiben.

Die Spannungsstabilität kann über einen Vergleich der kumulierten Risiko- und Reserveleistungen der einzelnen Komponentengruppen ermittelt werden. Der Bezug zur Bordnetzspannung ergibt sich dabei über die in Abschnitt 3.4.3 beschriebene Berechnung der Reserveleistung der Batterie unter Verwendung einer Mindestspannung, welche nicht unterschritten werden darf. Für die quantitative Definition von Stabilität und Energieeffizienz sei an dieser Stelle auf die Definition der Optimierungskriterien in Kapitel 5 verwiesen.

Um Freiheitsgrade für ein Energiemanagement in einem Energiebordnetz zu generieren, ist es zwingend erforderlich, die Erzeugung und Nutzung der elektrischen Energie über die aktive Nutzung des zur Verfügung stehenden Energiespeichers zeitlich zu entkoppeln. [24]

Auf ein aktives Management einzelner elektrischer Verbraucher wird bewusst verzichtet und nur der Modifikator der Energieverfügbarkeit an den aktuellen Betriebszustand des Fahrzeugs angepasst. Jedoch bieten sich in der Steuerung der Energieerzeugung zwei Eingriffsmöglichkeiten zur Verbesserung der Energiebilanz an. Die Phasen, in denen sich das Kraftfahrzeug im Schubetrieb<sup>24</sup> befindet, können genutzt werden, um

---

<sup>23</sup>Die Anti-Wind-Up-Funktion verhindert das weitere Ansteigen des Integralanteils des Reglers bei limitierter Stellgröße.

<sup>24</sup>In diesem Betriebszustand wird der Verbrennungsmotor durch das Fahrzeug geschleppt und es findet keine Kraftstoffeinspritzung statt.

elektrische Energie ohne negative Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch zu erzeugen<sup>25</sup>. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Energiebilanz besteht darin, die Energieerzeugung an den aktuellen Betriebszustand des Generators anzupassen. Für eine hohe Kundenakzeptanz dürfen diese Eingriffe vom Kunden aber weder in Einschränkungen im Fahrbetrieb resultieren noch in einer anderen Weise wahrgenommen werden. [24]

Es wurden zwei exemplarische Betriebsstrategien für das strategische Management des 12 V-Bordnetzes implementiert. Diese Betriebsstrategien (BS) werden als *Drehzahlabhängige Betriebsstrategie* und *Prädiktive Betriebsstrategie* bezeichnet und in Abschnitt 3.7.3 genauer beschrieben. Die Implementierung beider Strategien wurde mittels hierarchischer Zustandsautomaten realisiert, wie in Abbildung 3.13 dargestellt. Der Zustandsautomat erhält als Eingangsgrößen den aktuellen Ladezustand  $SOC$  der Batterie, das Antriebsmoment  $M_A$  zur Erkennung des Schubbetriebs, die aktuelle Motordrehzahl  $n$  sowie Ober- und Untergrenzen für den Ladezustand. Als Ausgänge für die unterlagerten Komponentenebenen dienen der Modifikator für die Energieverfügbarkeit  $EV$  und der Sollstrom für die Bordnetzbatterie  $I_{Batt,soll}$ , welcher für die Erzeugergruppe in die Sollleistung  $P_{soll}$  übersetzt wird.

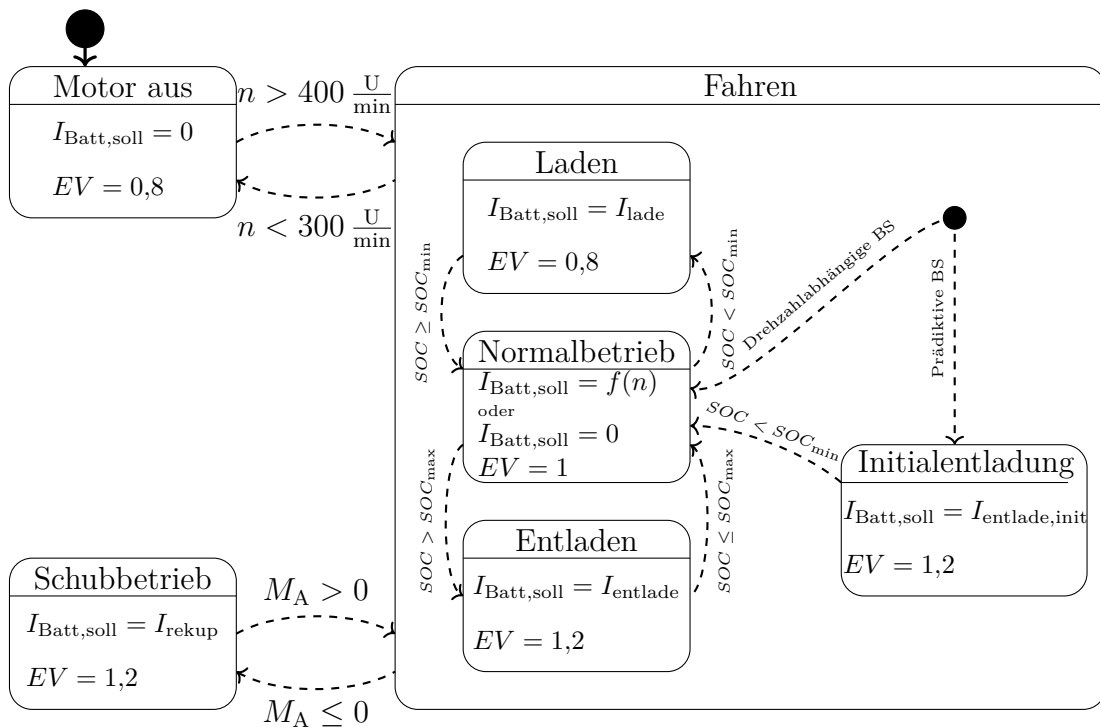


Abbildung 3.13: Hierarchischer Zustandsautomat des implementierten Energie- und Leistungsmanagementsystems.

<sup>25</sup>Aufgrund der relativ geringen Leistung des Generators von ca. 3 kW werden die Auswirkungen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die oberste Hierarchieebene des Zustandsautomaten besteht aus den drei Zuständen *Motor aus*, *Fahren* und *Schubbetrieb*. Im Anfangszustand *Motor aus* kann kein aktives Management der Energieerzeugung stattfinden. Hier wird lediglich die Energieverfügbarkeit auf 80 % gesetzt, um die Heizsysteme in ihrer Leistungsaufnahme zu beschränken. Der Übergang zwischen den Zuständen *Fahren* und *Motor aus* findet anhand der Motordrehzahl statt. Vom Zustand *Fahren* wechselt der Zustandsautomat anhand des Vorzeichens des Antriebsmoments in den Zustand *Schubbetrieb* bzw. wieder zurück. In diesem Zustand wird der Sollstrom für die Bordnetzatterie auf den Parameter  $I_{\text{rekup}}$  gesetzt.

Der Zustand *Fahren* gliedert sich wiederum in drei bzw. vier Unterzustände. Der Hauptzustand, in welchem auch die drehzahlabhängige Betriebsstrategie startet, wird hier als *Normalbetrieb* bezeichnet. In die Zustände *Laden* bzw. *Entladen* wird gewechselt, wenn der Ladezustand die von außen vorgegebene Obergrenze überschreitet bzw. die Untergrenze unterschreitet. Der Zustand *Initialentladung* wird nur von der prädiktiven Betriebsstrategie verwendet. Beide Strategien unterscheiden sich lediglich in ihrem Verhalten im Zustand *Normalbetrieb* und im Vorhandensein einer initialen Entladephase. Sie werden in den folgenden beiden Unterabschnitten erläutert.

#### **Drehzahlabhängige Betriebsstrategie**

Die drehzahlabhängige Betriebsstrategie basiert im Wesentlichen darauf, die Energieerzeugung des Generators an seinen aktuellen Betriebspunkt anzupassen und dadurch einen Effizienzgewinn zu erzielen. So soll in Arbeitspunkten mit geringem Wirkungsgrad die Energieerzeugung reduziert und die Energiedifferenz aus der Bordnetzatterie entnommen werden. In Arbeitspunkten mit hohem Wirkungsgrad hingegen soll zusätzliche Energie in die Bordnetzatterie eingespeichert werden. Aus der Wirkungsgradmessung zur Modellbildung des Klauenpolgenerators in Abschnitt 3.3.1 geht eine starke Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Motordrehzahl hervor. Es wurde ein sinkender Wirkungsgrad mit steigender Drehzahl ermittelt. Aus dieser Abhängigkeit wurde eine einfache Funktion für die Sollwertvorgabe der Batterieleistung abgeleitet, welche im Zustand *Fahren* aktiv ist und in Abbildung 3.14 dargestellt ist.

Die Funktion ist im Drehzahlbereich zwischen  $1000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  und  $6000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  variabel definiert. Sie wird über die drei Parameter der Eckdrehzahl  $n_{\text{Eck}}$ , dem Strom  $I_{n,1000}$  bei einer Drehzahl von  $1000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  und dem Strom  $I_{n,6000}$  bei einer Drehzahl von  $6000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$  beschrieben. Bei der Eckdrehzahl  $n_{\text{Eck}}$  wird die Batterieleistung auf null geregelt. Unterhalb dieser Drehzahl wird die Batterieleistung mit abnehmender Drehzahl linear erhöht, oberhalb der Eckdrehzahl mit linearer Steigung reduziert.

Da sich die Batterie durch diese Betriebsart praktisch immer im Lade- oder Entladebetrieb befindet, ergibt sich ein in Abbildung 3.15 qualitativ dargestellter Verlauf des Ladezustands. Dieser bewegt sich frei innerhalb der vorgegebenen Grenzen. Start- und Endwert des Ladezustands werden nach [125] für Blei-Säure-Batterien in einem

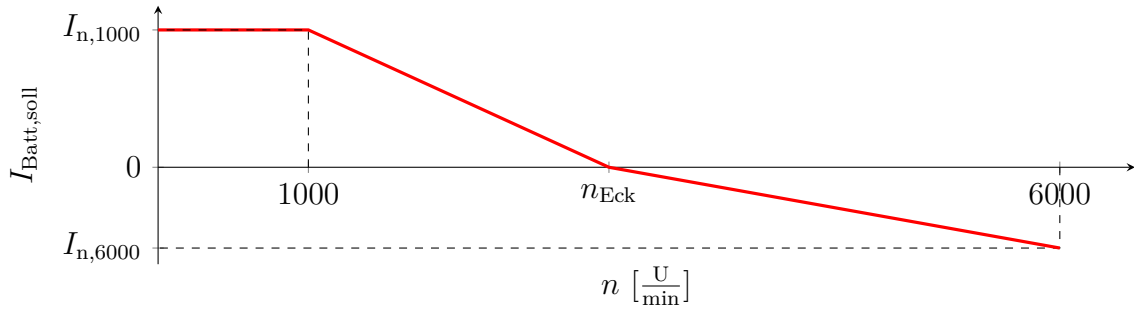


Abbildung 3.14: Funktion zur Anpassung der Batterieladung an die Motordrehzahl: Bei hohen Drehzahlen wird der Batterie Energie entnommen, bei niedrigen Drehzahlen wird die Batterie wieder geladen.

Mikro-Hybrid-Fahrzeug auf 85% mit einem Fenster von  $\pm 5\%$  gewählt. Um keine Ladezustandsdifferenz am Ende eines Zyklus zu erhalten, werden gegen Ende des Zyklus die Ober- und die Untergrenze linear an den Startwert angenähert.

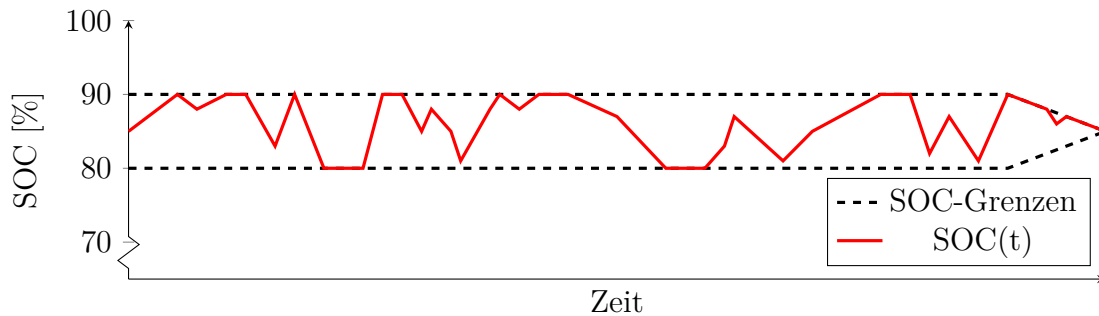


Abbildung 3.15: Qualitativer Verlauf des Ladezustands für die drehzahlabhängige Betriebsstrategie: Der Ladezustand bewegt sich mit wechselnden Gradienten, zwischen seiner erlaubten Ober- bzw. Untergrenze.

### Prädiktive Betriebsstrategie

Die Implementierung der zweiten Betriebsstrategie basiert im Wesentlichen auf der in [114] vorgestellten „Prädiktiven SOC-Regelung“. Die Strategie wurde für den Einsatz von Lithium-basierten Batterien im 12 V-Bordnetz entworfen. Der Fokus der Strategie liegt auf der maximalen Ausschöpfung des Rekuperationspotentials eines Zyklus.

Um die Ladeakzeptanz der Batterie zu steigern, wird sie zu Beginn des Zyklus stark entladen. Lediglich in Verzögerungsphasen wird die Batterie mit dem maximalen Ladestrom geladen. Sobald der Ladezustand sein erlaubtes Minimum erreicht hat, schaltet die Betriebsstrategie vom Entlade- in den Nullstrom- und Rekuperationsbetrieb.

Der prinzipielle Verlauf des Ladezustands ist in Abbildung 3.16 dargestellt. Wie schon bei der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie wird der erlaubte Bereich des Ladezustandes zum Ende des Zyklus linear an den Startwert des Ladezustands angenähert.

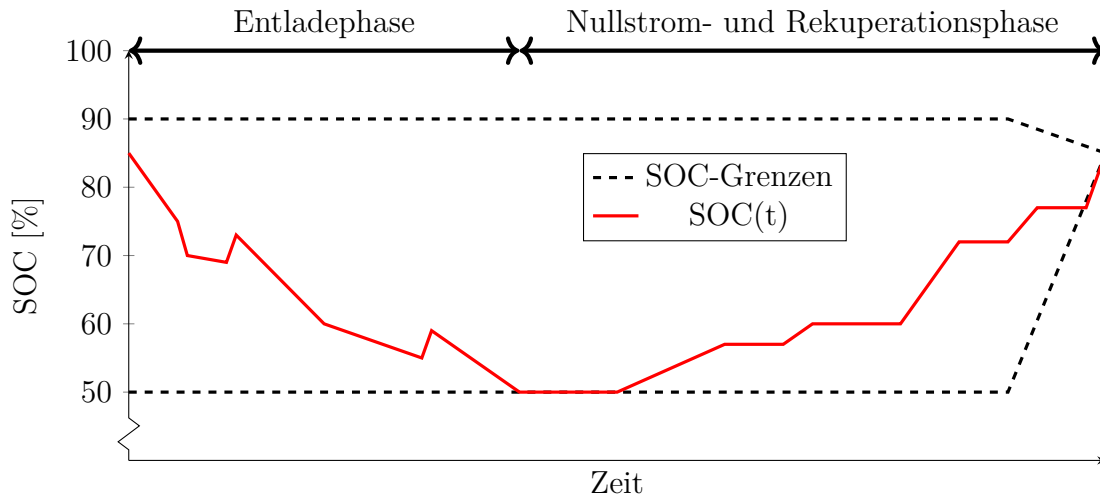


Abbildung 3.16: Qualitativer Verlauf des Ladezustands für die prädiktive Betriebsstrategie nach [114]: Zu Beginn des Zyklus wird die Batterie stark entladen. Nach dem Erreichen der unteren Ladezustandsgrenze wird in den Nullstrom- und Rekuperationsbetrieb gewechselt.

### 3.8 Systemsimulation Bordnetz und Energiemanagement

In den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels wurden Modelle für die Bordnetzkomponenten, das Energiemanagement und für eine einfache Umweltsimulation entwickelt. Diese werden nun zu einer Systemsimulation zusammengefügt. Abbildung 3.17 zeigt den prinzipiellen Aufbau dieser Systemsimulation.

Das elektrische Energiebordnetz in seiner derzeitigen Ausprägung besteht aus einer Batterie, einem Generator und einer variablen Anzahl an elektrischen Verbrauchern. Alle Komponenten sind durch den Kabelbaum miteinander verbunden<sup>26</sup>. Das Energie- und Leistungsmanagement ist über den Bordnetzkomponenten dargestellt. Gut zu erkennen ist die Strukturäquivalenz zu [42]. Jede Bordnetzkomponente verfügt über eine eigene Komponente im Energie- und Leistungsmanagement. Die Kommunikation zwischen den Bordnetzkomponenten und dem Managementsystem wird, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, über einen gemeinsamen Simulationsbus umgesetzt.

<sup>26</sup>Die Leitungswiderstände sind zur Steigerung der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.



Zur Anregung der Systemsimulation werden über das Zyklus-Modul die Umweltbedingungen wie Fahrzeuggeschwindigkeit, Drehzahl und Kundeninteraktion mit dem Fahrzeug in den Umweltbus eingespeist.

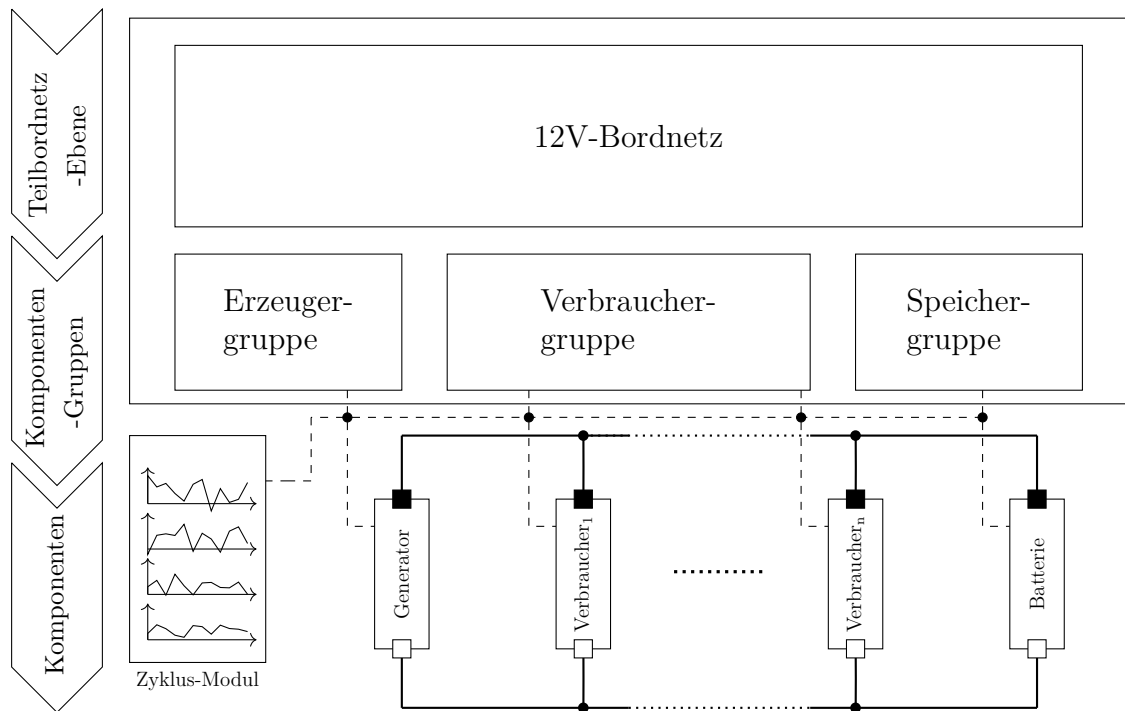


Abbildung 3.17: Prinzipieller Aufbau der Systemsimulation von Bordnetz und Energiemanagementsystem.

## 4 Bordnetzprüfstand

Im vorangegangenen Kapitel wurden der Aufbau der verwendeten Bordnetzsimulation und die Modellbildung der einzelnen Simulationsmodelle der Bordnetzkomponenten erläutert. In einer Simulationsumgebung sind die funktionalen Abhängigkeiten üblicherweise in den Simulationsmodellen hinterlegt. Damit ist der Implementierungsaufwand im Vergleich zu einem realen Fahrzeug überschaubar und Änderungen an Algorithmen und Schnittstellen sind leicht umzusetzen. Eine Bordnetzsimulation ist sehr flexibel und schon zu einem frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess einsetzbar. Eine vollständige Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf die reale Welt ist jedoch nicht immer gegeben, da sowohl bei der Modellierung der Komponenten an sich als auch bei den Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und der Umwelt oft vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen.

Im Gegensatz zur Simulation steht die Erprobung in einem Versuchsträger. Fahrversuche liefern naturgemäß Ergebnisse, die dem Verhalten im realen Betrieb entsprechen. Der Einsatz von Versuchsträgern kann aber erst sehr spät im Entwicklungsprozess durchgeführt werden, da ein fahrtüchtiger Versuchsträger benötigt wird. Zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess hat die Hard- und Software schon einen seriennahen Stand erreicht.

Auch sind einzelne Funktionen mitunter auf einer Vielzahl unterschiedlicher Steuergeräte verteilt. Aus diesem Grund sind Änderungen in dieser Phase nur noch bedingt möglich und mit einem erhöhten Implementierungsaufwand verbunden. Grundsätzliche konzeptionelle Änderungen, beispielsweise an der Softwarearchitektur des Energiemanagementsystems, sind zu diesem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess meist komplett ausgeschlossen.

Insbesondere bei einem komplexen System, wie dem Management des elektrischen Energiebordnetzes, dessen Gesamtfunktionalität sich aus dem Zusammenwirken verschiedener verteilter Systeme ergibt, stellt der Einsatz eines Bordnetzprüfstandes einen geeigneten Zwischenschritt zwischen der reinen Simulation und der Erprobung in einem Versuchsträger dar. Besteht die Möglichkeit der Wiederverwendung der physikalischen Modelle der Bordnetzkomponenten aus der Simulationsumgebung, inklusive ihrer für das Energiemanagement relevanten Funktionalität, muss keinerlei zusätzlicher Implementierungsaufwand investiert werden. Durch die vorgegebene Struktur des Energiebordnetzes ist ein Bordnetzprüfstand zwar weniger flexibel als eine Bordnetzsimulation, dennoch können verschiedene Ausstattungsgrade, Komponentenkonfigurationen und Betriebsstrategien sehr einfach getestet werden. Durch den Einsatz einiger

#### 4 Bordnetzprüfstand

weniger realer Komponenten mit hohem Wirkradius (vor allem Generator und Batterie), in Kombination mit den emulierten Komponenten aus der Bordnetzsimulation, kann dennoch ein wesentlich realitätsnäheres Szenario bei gleichzeitig hoher Reproduzierbarkeit getestet und damit der Reifegrad des Energie- und Leistungsmanagements gesteigert werden.

Tabelle 4.1 fasst die Stärken und Schwächen der einzelnen Entwicklungsschritte eines Energie- und Leistungsmanagementsystems für ein Energiebordnetz auf der Basis subjektiver Einschätzungen zusammen. Bei der Bewertung des Prüfstands wird hierbei von der beschriebenen hohen Durchgängigkeit zwischen Simulation und Prüfstand ausgegangen, wie sie im Laufe dieses Kapitels entwickelt wird.

Tabelle 4.1: Bewertung der einzelnen Entwicklungsschritte im Entwicklungsprozess eines elektrischen Energie- und Leistungsmanagementsystems für ein Energiebordnetz hinsichtlich der Erfüllung verschiedener Kriterien.

	Simulation	Prüfstand	Versuchsträger
Niedriger Implementierungsaufwand	+	++	--
Hohe Flexibilität	++	+	--
Gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	++	+	-
Früher Zeitpunkt im Entwicklungsprozess	++	+	-
Hohe Realitätsnähe / Serienreife	--	0	++

„++“ voll erfüllt bis „-“ nicht erfüllt

Mit Hilfe des Bordnetzprüfstandes soll die simulativ erprobte und optimierte Betriebsstrategie des Energie- und Leistungsmanagements an einem Referenz-Bordnetz validiert werden. Der am Fachgebiet Energiewandlungstechnik der Technischen Universität München vorhandene Referenz-Bordnetzprüfstand wurde in diversen Vorarbeiten zur Modellbildung für die Simulation [44] sowie zur Untersuchung von Teilaspekten prädiktiver Betriebsstrategien [45, 47, 48, 49, 50] und reaktiver Mechanismen zur Spannungsstabilisierung [119, 120, 121] eingesetzt. Die Dauer der dabei verwendeten Szenarien betrug meist wenige Sekunden und konnte losgelöst von einer Bordnetzsimulation betrachtet werden. Die vorliegende Arbeit betrachtet neben der Spannungsqualität auch energetische Aspekte des elektrischen Energiebordnetzes sowie die Schnittstelle und die Interaktion zwischen den Bordnetzkomponenten und dem Energiemanagement. Für diesen Zweck ist es zielführend, die Bordnetzsimulation und den Bordnetzprüfstand enger zu verzahnen, um einen fließenden Übergang zwischen beiden Entwicklungsmethoden zu gewährleisten.

Deshalb wird in dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, durch den Einsatz der Methode der modellbasierten Emulation, den Realitätsgrad in diskreten Stufen wählbar zu machen. Ausgangspunkt ist dabei die physikalische Simulation des Energiebordnetzes mit dem zugehörigen Energiemanagement, wie in Kapitel 3 beschrieben. Ein dazu passender

Bordnetzprüfstand sollte in der Lage sein, die Simulationsmodelle der Bordnetzkomponenten, inklusive ihrer Kommunikationsschnittstellen und datentechnischen Vernetzung, wiederzuverwenden und über leistungselektronische Aktoren zu emulieren. Da kein Simulationsmodell eine perfekte Abbildung der Realität bieten kann, sollte nach wie vor die Möglichkeit bestehen, auch reale Komponenten in den Prüfstand einzubinden.

In diesem Kapitel werden zunächst die neuen Anforderungen an den Bordnetzprüfstand definiert und mit der vorhandenen Prüfstandsinfrastruktur abgeglichen. Im Anschluss wird ein angepasstes Prüfstandskonzept entworfen. Das neue Konzept wird für die verschiedenen Komponenten des Energiebordnetzes umgesetzt und einzeln validiert. Anschließend wird die Automatisierung des Exports der Simulationsmodelle aus der Bordnetzsimulation auf den Bordnetzprüfstand erläutert. Am Ende des Kapitels wird das Gesamtsystem mit seinen Einsatzmöglichkeiten vorgestellt.

### 4.1 Bestandsanalyse und Konzeptentwicklung

In diesem ersten Abschnitt wird zunächst eine Bestandsanalyse der bestehenden Prüfstandsinfrastruktur durchgeführt, die neuen Anforderungen werden definiert und beide Sachverhalte aneinander gespiegelt. Darauf basierend wird ein Umstrukturierungs- und Erweiterungskonzept entwickelt, um die Möglichkeit zu schaffen, Simulation und Prüfstand enger zu verzahnen.

#### 4.1.1 Ausgangssituation

Die Basis des Prüfstandes bildet die Karosserie eines BMW 7er mit dem originalen Kabelbaum eines voll ausgestatteten Fahrzeugs, den Sicherungselementen und diversen Stromverteilern. Die Karosserie dient dabei dem elektrischen System als Rückleiter.

Am Anschlusspunkt des Kfz-Generators befand sich ein leistungsstarkes Netzgerät. Um die relativ geringe Dynamik des Generators sowie seine temperatur- und drehzahlabhängigen Leistungsbeschränkungen nachzubilden, wurde die Vorgabe der Sollspannung für das Netzgerät durch ein eingebettetes Echtzeitsystem derart manipuliert, dass ein generatorähnliches Verhalten hinsichtlich Stromgradient und Maximalstrom erzielt wurde. Zudem konnte der in [119] beschriebene und auf einem benachbarten Prüfbett aufgebaute Generatorprüfstand mit dem Bordnetzprüfstand verbunden werden. Dieser Generatorprüfstand bestand aus einem 230 A-Generator, der über eine umrichter gespeiste Asynchronmaschine drehzahlvariabel angetrieben wird.

Das Batteriefach des Fahrzeugs befindet sich im Heck. In diesem kann die Bordnetz-batterie an den Kabelbaum angeschlossen werden. Es stehen zahlreiche Batterien verschiedener Kapazitäten und Alterungszustände zur Verfügung.

Das Grundkonzept sah vor, keine realen elektrischen Verbraucher in den Prüfstand zu integrieren<sup>1</sup>. An den Anschlusspunkten der wichtigsten elektrischen Verbraucher waren deshalb elektronische Lasten angebracht, um die entsprechenden Verbraucherströme in das Bordnetz einzuprägen. An den Anschlusskontakten der Fahrwerksregelsysteme waren hochdynamische elektronische Lasten verbaut. Die restlichen Komponenten wurden mit selbst entwickelten elektronischen Lasten geringerer Dynamik abgebildet. Mit diesen Systemen ließ sich eine gewisse Grundlast einstellen, aber keine hochgenaue Emulation dynamischer Vorgänge durchführen.

Die gesamte Prüfstandsteuerung und Messdatenerfassung erfolgte über zwei PXI<sup>2</sup>-Systeme. Ein PXI-System übernahm dabei die Messdatenerfassung und -speicherung aller relevanten Spannungen und Ströme im Bordnetz. Das zweite PXI-System bediente die Sollwertvorgaben für die elektronischen Lasten über analoge Signale und die Generatornachbildung. Mit dieser Konfiguration konnten Lastprofile reproduzierbar abgespielt werden.

Das Leistungsmanagement lief auf einer separaten Echtzeitplattform und war über einen CAN-Bus mit dem Steuerungs- und dem Messdatenerfassungsrechner verbunden. Die Implementierung funktionaler Abhängigkeiten zwischen den Verbrauchern und dem Energiemanagementsystem, wie z.B. die Verbraucherdegradation konnte über die grafische Programmiersprache *LabVIEW* direkt auf dem Steuerungsrechner vorgenommen werden. Die Kommunikation zwischen den beiden PXI-Systemen erfolgte mit Hilfe der proprietären Technologie der Netzwerk-Umgebungsvariablen in *LabVIEW*, was im Wesentlichen eine TCP/IP-basierte Datenverbindung zwischen einzelnen Servern auf den PXI-Systemen bedeutet [97].

Für ein typisches Versuchsszenario wurde der Bordnetzprüfstand mit Hilfe der elektronischen Lasten und des Netzgerätes in einen Zustand gewisser Vorspannung gebracht. Anschließend wurde über den Steuerungsrechner und die hochdynamischen elektronischen Lasten ein leistungskritisches Szenario eingespielt und die zu untersuchenden prädiktiven oder reaktiven Wirkmechanismen angewandt.

### 4.1.2 Neue Anforderungen

Der Schwerpunkt der bisherigen Prüfstandsarchitektur lag darauf, das reale Spannungsverhalten eines Bordnetzes während eines leistungskritischen Szenarios exakt nachzubilden [45, S. 12]. Um die Validierung der in dieser Arbeit vorgestellten und simulativ optimierten Energiemanagementstrategien zu ermöglichen, ergeben sich für den Bordnetzprüfstand neue Anforderungen:

---

<sup>1</sup>Abgesehen von der Beleuchtung, da eine Emulation keinen technischen Mehrwert bringt und das An- und Ausgehen der Lichter auch der Veranschaulichung dient.

<sup>2</sup>Beim **PCI eXtensions for Instrumentations**-Standard handelt es sich um einen offenen Industriestandard auf Basis des PCI-Standards für die Mess- und Automatisierungstechnik. Der Standard erlaubt es, herstellerübergreifend Rechen- und Peripherieeinheiten ohne Kabelverbindungen in einem gemeinsamen Gehäuse zu kombinieren [102].

- Nicht nur Hochleistungsverbraucher, sondern alle energetisch relevanten Verbraucher sollen mit sehr hoher Genauigkeit auf dem Bordnetzprüfstand abgebildet werden und in der Lage sein, direkt mit dem Energiemanagement zu interagieren.
- Um aufwendige und fehlerträchtige Neuimplementierungen zu vermeiden, sollen sowohl die physikalischen Modelle der Bordnetzverbraucher als auch das Energiemanagement und der Umweltzyklus direkt aus der Bordnetzsimulation wiederverwendet werden.
- Aufgrund ihres großen Einflusses auf die Spannungslage und die Energieeffizienz sollen sowohl Generator als auch Batterie weiterhin als reale Komponenten im Prüfstand betrieben werden können.
- Um Vorteile hinsichtlich Flexibilität und Reproduzierbarkeit zu generieren, soll es aber auch möglich sein, anstatt der realen Komponenten von Generator<sup>3</sup> und Batterie<sup>4</sup> die physikalischen Modelle aus der Bordnetzsimulation auf dem Prüfstand zu emulieren.
- Da die Klemmengrößen der Bordnetzkomponenten von deren physikalischen Modellen berechnet werden sollen, bedarf es einer neuen Art von Eingangsanregung. Anstatt Strom- und Leistungsprofile werden Informationen wie Umweltgrößen und Kundeninteraktion an die Simulationsmodelle verteilt, siehe Abschnitt 3.5. Die Zyklen stammen entweder aus gemessenen oder künstlich generierten Fahrdaten oder werden in Echtzeit aus dem in [79] aufgebauten Fahrsimulator in den Bordnetzprüfstand eingespeist.
- Alle vorhandenen Messwerte sowie wie Daten der Simulationsmodelle sollen zeit-synchron abgespeichert werden, um eine nachgelagerte Analyse zu ermöglichen.

Zudem gibt es weitere nachgelagerte Anforderungen, die den technischen Lösungsraum einschränken:

- Die bereits vorhandene Mess- und Steuerungstechnik soll – soweit möglich – weiterverwendet werden.
- Neben den Modellen aus der *Modelica*-basierten Bordnetzsimulation sollen auch nach dem *FMI*-Standard<sup>5</sup> erstellte Modelle unterstützt werden. Somit kann ein einfacher Modellaustausch mit industriellen Partnern bei gleichzeitiger Wahrung des jeweiligen geistigen Eigentums gewährleistet werden.

---

<sup>3</sup>Beim Generator spricht vor allem die zusätzliche Flexibilität für den Einsatz der Emulation, da ein Wechsel des Generators mit sehr hohem Aufwand verbunden ist.

<sup>4</sup>Für eine Emulation der Bordnetzbatterie spricht vor allem die gesteigerte Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, da das Klemmenverhalten von Batterien stark von thermischen und alterungsbedingten Effekten abhängig ist. Zudem können so, ohne Wechsel der Batterie, verschiedene Kapazitäten getestet werden und es entfällt das Nachladen nach Benutzung.

<sup>5</sup>Beim **F**unctional **M**ock-up **I**nterface-Standard handelt es sich um eine offene und standardisierte Schnittstelle, mit deren Hilfe Simulationsmodelle zwischen verschiedenen Simulationswerkzeugen ausgetauscht werden können [43].

- Aufgrund der hohen Anzahl der Bordnetzkomponenten und deren funktionalen Verbindungen untereinander und mit dem Energiemanagement soll der Export-Prozess von der Bordnetzsimulation auf den Bordnetzprüfstand (teil-)automatisiert erfolgen.
- Obwohl eine zweite Spannungsebene von 48 V in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wird, soll der Bordnetzprüfstand dennoch für eine mögliche Erweiterung vorbereitet werden.

### 4.1.3 Analyse der bestehenden Prüfstandsinfrastruktur

Um die im vorhergehenden Abschnitt definierten Anforderungen auf dem Bordnetzprüfstand umzusetzen, genügt keine Erweiterung der bereits vorhandenen Prüfstandsinfrastruktur. Vielmehr bedarf es einer Neukonzeptionierung und Anpassung einiger Hardware- und Softwarekomponenten, hauptsächlich in folgenden drei Themengebieten:

- *Prüfstandsarchitektur*: Das Verhalten, insbesondere die Stromaufnahme, nahezu aller Bordnetzkomponenten ist stark abhängig von der eigenen Klemmenspannung. Daher muss die informationstechnische Schleife zwischen der Messung der eigenen Klemmenparameter, der Berechnung des physikalischen Modells und des Stellens der neuen Sollwerte für die Aktorik sehr kurz und zudem deterministisch sein. Dies ist aufgrund der Netzwerk-Verbindung zwischen Messrechner und Steuerungsrechner nicht gegeben, da diese keine harten Echtzeitanforderungen erfüllen kann<sup>6</sup>.
- *Betriebssysteme*: Bisher wurden Windows sowie Echtzeitbetriebssysteme, basierend auf dem *LabVIEW Real-Time Module*, eingesetzt. Dieses ist für die Ausführung physikalischer Modelle aus der Bordnetzsimulation nur bedingt geeignet.
- *Leistungselektronische Aktoren*: Die selbst entwickelten elektronischen Lasten verfügen über eine relativ geringe Dynamik. Die Ausregelzeit der Systeme für einen Vollastsprung liegt bei ca. 1 s. Für eine exakte Nachbildung der Bordnetzkomponenten ist diese Dynamik um mehrere Größenordnungen zu klein.

### 4.1.4 Neues Prüfstandskonzept

Um die in Abschnitt 4.1.2 genannten Anforderungen zu erfüllen, wird der Bordnetzprüfstand hinsichtlich seiner Hardware- und Softwarekomponenten neu strukturiert. Das Grundkonzept, den Kabelbaum und die Karosserie als Leiter zu verwenden und alle elektrischen Verbraucher über elektronische Lasten abzubilden, wird beibehalten. Die Umstrukturierung umfasst im Wesentlichen folgende Punkte:

---

<sup>6</sup>Die Erweiterung des IEEE 802.1 - Standards um das Time-Sensitive-Networking zur harten Echtzeitkommunikation war zum Zeitpunkt der Umstrukturierung noch nicht abgeschlossen.

- *Prüfstandsarchitektur*: Die gesamte Prüfstandsarchitektur wird auf einen *Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL)*-basierten Ansatz umgestellt. Um die Latenzen in der Berechnung der physikalischen Modelle minimal und deterministisch zu halten, darf keine Netzwerkverbindung in der Schleife aus Digitalisierung der Messgröße, Berechnung des Modells und der analogen Sollwertvorgabe für die leistungselektronischen Aktoren bestehen.
- *Betriebssystem*: Als neue Ausführungsplattform soll *VeriStand* [95] von *National Instruments* dienen. Dabei handelt es sich um eine Softwareumgebung zur Konfiguration von Echtzeittestanwendungen. Das dabei eingesetzte Echtzeitbetriebssystem *Pharlab* ist mit der bereits vorhandenen Hardware und Messtechnik kompatibel. Zudem wird das Ausführen von Simulationsmodellen auf den Echtzeitzielsystemen unterstützt. Über das Plug-In eines Drittanbieters [101] können auch Simulationsmodelle, die auf dem FMI-Standard basieren, auf den Echtzeitzielsystemen ausgeführt werden.
- *Leistungselektronische Aktoren*: Im Zuge der Umstrukturierung werden alle leistungselektronischen Aktoren auf ihre dynamischen Eigenschaften überprüft und gegebenenfalls angepasst.
- *Integration Generatorprüfstand und Generatoremulation*: Der bisher separat verwendete Generatorprüfstand wird in den Bordnetzprüfstand integriert und parallel mit einer zu entwickelnden Generatoremulation verwendet.
- *Batterieemulation*: Der Bordnetzprüfstand soll um die Möglichkeit der Batterieemulation erweitert werden.

## 4.2 Umsetzung des neuen Prüfstandkonzepts

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Umstrukturierungsmaßnahmen zur Umsetzung des neuen Prüfstandkonzepts erläutert. Zunächst werden die Bordnetzkomponenten und deren Simulationsmodelle auf ihre Zeitkonstanten und maximalen Gradienten untersucht. Dann findet eine Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften sämtlicher leistungselektronischer Stellglieder statt. Im Anschluss daran werden zunächst die einzelnen Teilsysteme des Prüfstands vorgestellt. Aufgrund von Beschränkungen der Hardware, hinsichtlich der Rechenleistung und der maximalen Anzahl an analogen und digitalen Schnittstellen, lässt sich nicht die komplette Prüfstandansteuerung auf einem einzigen Echtzeitsystem realisieren. Daher wurden die einzelnen Teilsysteme des Prüfstandes auf unterschiedlichen Echtzeitsystemen implementiert. Diese sind unterteilt in die Verbraucher-, die Batterie- und die Generatoremulation, wobei auf dem Echtzeitsystem der Verbraucheremulation auch das Energiemanagement berechnet wird. Obwohl die prinzipielle Vorgehensweise der modellbasierten Emulation stets dieselbe



ist, unterscheiden sich die Teilsysteme doch stark, da sie sehr unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich Dynamik, Rechenleistung, Schnittstellen und Anwendungsfelder haben.

### 4.2.1 Analyse der Anforderungen an die Emulationssysteme

Die Kenntnis der dynamischen Eigenschaften der Bordnetzkomponenten und ihrer physikalischen Simulationsmodelle ist von zentraler Bedeutung, um im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Emulationssysteme stabil und mit einer hohen Emulationsqualität auslegen zu können.

#### Anforderungen an die Rechensysteme

Moderne Simulationsplattformen verwenden in der Regel Lösungsalgorithmen mit variabler Schrittweite, um auch große Simulationen effizient durchführen zu können. Für die Echtzeitsimulation kommen aber nur Lösungsalgorithmen mit fester Schrittweite in Betracht. Daraus folgt, dass die kleinsten Zeitkonstanten der in Echtzeit zu berechnenden Modelle die minimal benötigte Ausführungsfrequenz für die Echtzeitsysteme bestimmen. Für ein numerisch stabiles System sollte die Schrittweite höchstens ein Viertel bis ein Achtel der kleinsten Zeitkonstante des Modells betragen [76, 107]. In [80] wird für eine korrekte Abbildung von sinusförmigen Größen in Emulationssystemen die mindestens 25-fache Ausführungsrate empfohlen. Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht über die Zeitkonstanten der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Modelle und die sich daraus ergebenden minimalen Simulationsfrequenzen  $f_{\text{Sim,min}}$ .

Tabelle 4.2: Übersicht über die kleinsten Zeitkonstanten der verwendeten Simulationsmodelle der Bordnetzkomponenten und der daraus resultierenden minimalen Ausführungsfrequenzen.

	$f_{\text{Modell}}$	Ursprung	$f_{\text{Sim,min}} = 25 \cdot f_{\text{Modell}}$
Ohmsche Verbraucher	50 mHz	Thermisches System	1,25 Hz
DCDC-Wandler mit LC	40 kHz	LC-System	1 MHz
DCDC-Wandler ohne LC	-	-	-
Generator	10 Hz	Erregerkreis	250 Hz
Batterie	400 Hz	kleinstes RC-Glied	10 kHz

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich mit diesen Werten nur eine Aussage über die numerische Stabilität des in Echtzeit berechneten Modells treffen lässt, aber noch keine Aussage über dessen Abbildungsqualität. Dies lässt sich am Beispiel der Sitzheizung erläutern. Die Zeitkonstante von 20s resultiert aus den thermischen Kapazitäten und den Wärmeleitwerten des thermischen Modells. Der Stromfluss durch den Heizwiderstand setzt aber augenblicklich nach dem Schließen des Leistungsschalters ein.

Unter Vernachlässigung der induktiven Komponente des Heizsystems wäre somit eine unendlich hohe Ausführungsfrequenz des Modells wünschenswert, um die Totzeit zu minimieren. Dieses Beispiel macht deutlich, dass die Ausführungsfrequenz, schon alleine zur Reduzierung der Totzeiten im System, so hoch wie möglich gewählt werden sollte. Zudem ist die Stromaufnahme praktisch aller Bordnetzverbraucher direkt von der eigenen Klemmenspannung abhängig. Bei limitierter Rechenleistung jedoch kann eine detaillierte Analyse der einzelnen Modelle helfen, diejenigen Simulationsmodelle zu identifizieren, die tatsächlich von einer hohen Ausführungsrate profitieren.

Mit den PC-basierten Echtzeitsystemen lassen sich stabile Ausführungsraten von ca. 25 kHz erreichen. Daraus folgt, dass das Modell des Gleichspannungswandlers aus Abschnitt 3.2.2 nicht mit den induktiven und kapazitiven Komponenten simuliert werden kann, sondern auf das reduzierte Modell ohne Induktivitäten und Kapazitäten zurückgegriffen werden muss<sup>7</sup>.

### Anforderungen an die leistungselektronischen Stellglieder

Zur Abbildung der Bordnetzkomponenten in einem automobilen Energiebordnetz werden leistungselektronische Stellglieder unterschiedlichen Typs benötigt, abhängig davon, in welchem Quadranten das zu emulierende System arbeitet<sup>8</sup>. Folgende Aktoren werden zur Emulation der Bordnetzkomponenten verwendet:

- *Elektrische Verbraucher*: 15 elektronische Lasten mit Nennströmen von 60 A bis 600 A.
- *Elektrische Erzeuger*: Drei 100 A-Netzgeräte, die über eine Master-Slave-Schaltung zu einem 300 A-Netzgerät verschalten sind.
- *Elektrische Speicher*: Eine elektronische Quelle-Senke mit einem Strombereich von  $-340$  A bis 340 A.

Sämtliche Geräte werden über analoge Signale von 0 V bis 10 V bzw. von  $-10$  V bis 10 V angesteuert und können somit als reine Analogverstärker aufgefasst werden.

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die benötigten Ausführungszeiten zur korrekten Berechnung der Ausgänge der physikalischen Modelle hergeleitet. Zur korrekten Abbildung der von den Simulationsmodellen berechneten Klemmengrößen auf dem Bordnetzprüfstand müssen die leistungselektronischen Aktoren der verschiedenen Emulationssysteme über eine ausreichende Dynamik verfügen. Die Stromgradienten diverser Bordnetzkomponenten wurden aus Messungen in einem Versuchsträger extrahiert. Eine Übersicht über die Stromgradienten und Amplituden diverser Bordnetzkomponenten kann Tabelle 4.3 entnommen werden.

---

<sup>7</sup>Die Echtzeitsimulation mit Ausführungsraten in diesem Bereich ist nur mit FPGA-basierten Systemen zu realisieren.

<sup>8</sup>Da es sich bei dem betrachteten System um ein unipolares System handelt, kommen nur der 1. und der 4. Quadrant in Betracht.

#### 4 Bordnetzprüfstand

Tabelle 4.3: Übersicht über die maximalen Stromgradienten und Amplituden der Bordnetzkomponenten, basierend auf Messungen in einem Versuchsträger.

	$I_{\max}$	$\dot{I}_{\max}$
Generator	230 A	$1,5 \frac{\text{A}}{\text{ms}}$
Heizsysteme	50 A	$50 \frac{\text{A}}{\text{ms}}$
Elektronische Systeme	70 A	$20 \frac{\text{A}}{\text{ms}}$
Batterie	250 A	$50 \frac{\text{A}}{\text{ms}}$

Da die Klauenpolmaschine im Vergleich zu den anderen Bordnetzkomponenten über eine relativ geringe Dynamik verfügt, kann sie keinen wirksamen Beitrag zur Spannungsstabilisierung in hochdynamischen Szenarien liefern. Unter der Annahme eines konventionellen Bordnetzes, bestehend aus einem Generator, einer Batterie und mehreren Verbrauchern, kann daraus gefolgert werden, dass die höchste Verbraucherdynamik gleichzeitig auch das dynamischste Szenario für die Bordnetzatterie darstellt, da nur diese die benötigte Energie augenblicklich zur Verfügung stellen kann.

Zur Auswahl der geeigneten leistungselektronischen Aktoren für die Emulationssysteme müssen deren dynamische Eigenschaften genau bekannt sein. Neben den erreichbaren Spannungs- und Stromgradienten ist die Kenntnis der Grenzfrequenz ein wesentliches Auswahlkriterium. Die Herstellerangaben zu solchen Systemen treffen in der Regel keine genauen Aussagen über die erreichbaren Grenzfrequenzen. Üblicherweise werden hier nur die Anstiegszeit von 10 % auf 90 % des Sollwerts oder entsprechend die Abfallzeit von 90 % auf 10 % des Sollwerts angegeben. Aus diesen Angaben lässt sich über die Faustformel in (4.1) die Großsignalgrenzfrequenz<sup>9</sup> ermitteln [51, 122].

$$f_{G,3\text{dB}} = \frac{0,35}{t_{\text{rise}}} \quad (4.1)$$

Daraus ergeben sich für die Datenblattangaben der verwendeten leistungselektronischen Aktoren, die in Tabelle 4.4 dargestellten Eckfrequenzen.

Tabelle 4.4: Übersicht über die aus den Datenblattangaben und Gleichung 4.1 berechneten Eckfrequenzen der leistungselektronischen Aktoren.

	$t_{\text{Anstieg}}$	$f_{G,3\text{dB,berechnet}}$
Netzgerät	5 ms	70 Hz
El. Quelle-Senke	250 $\mu\text{s}$	1,4 kHz
El. Lasten	60 $\mu\text{s}$	5,8 kHz

<sup>9</sup>Dabei handelt es sich um die Frequenz, bei der die Amplitude des Ausgangs gegenüber der Amplitude des Sollwerts bei einer Auslenkung von 100 % um 3 dB gefallen ist.

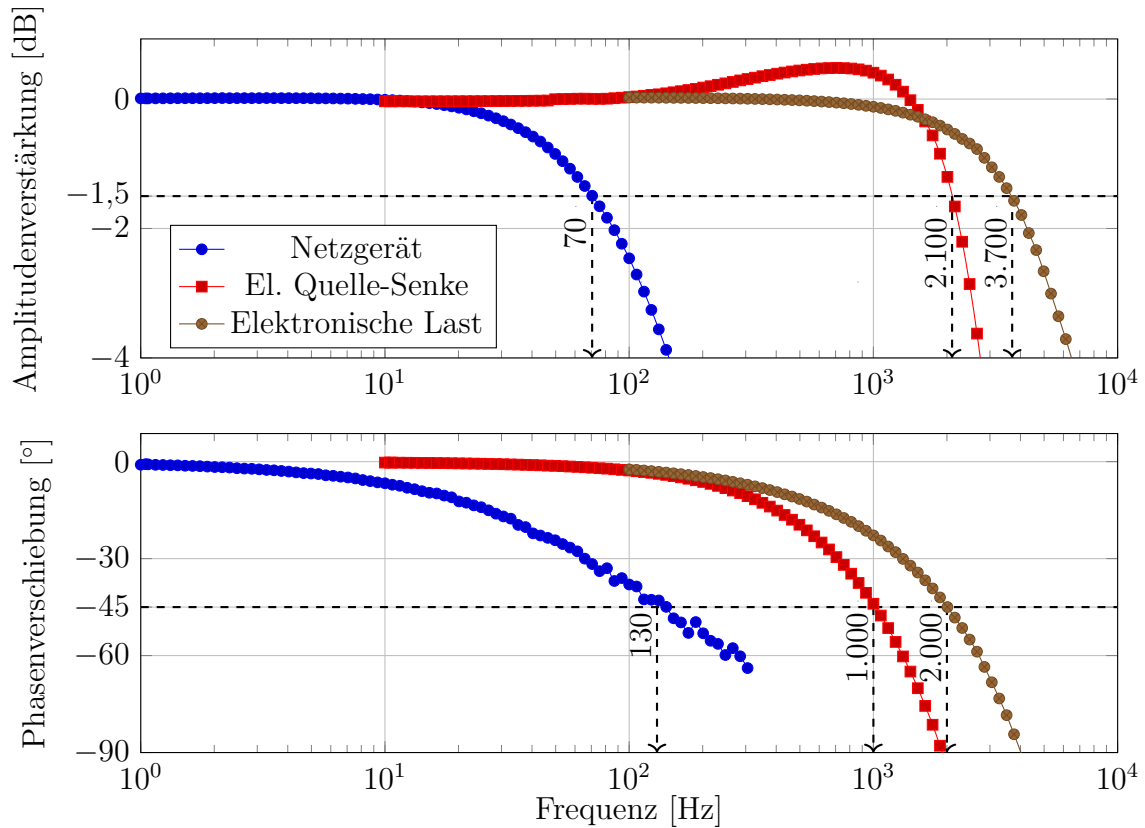


Abbildung 4.1: Frequenzgänge der verwendeten leistungselektronischen Aktoren bei einer Sollwertauslenkung von 100 %. Die dynamischsten Systeme sind die elektronischen Lasten, gefolgt von der elektronischen Quelle-Senke und dem Netzgerät.

Diese Werte treffen aber noch keine Aussage über die an der Eckfrequenz auftretende Phasenverschiebung. In [80] wird zudem für eine stabile Auslegung von PHIL-Systemen eine maximale Amplitudenverstärkung von  $-1,5$  dB und eine maximale Phasenverschiebung von  $-45^\circ$  empfohlen. Da die dynamischen Eigenschaften der leistungselektronischen Stellglieder einen wesentlichen Einfluss auf Abbildungsgenauigkeit und Stabilität der Emulationssysteme haben, wurden für alle verwendeten Komponenten die Frequenzgänge bei Vollaussteuerung ermittelt. Um die nötige elektrische Aufnahme- bzw. Abgabeleistung bereitstellen zu können und um die Prüflinge dabei auf das Spannungsniveau des Bordnetzes zu fixieren, wurden die Tests gegen eine Parallelschaltung mehrerer Bleibatterien durchgeführt. Die Frequenzen wurden dann schrittweise erhöht und für jede Frequenz Amplitudenverstärkung und Phasenverschiebung bestimmt. Das Ergebnis dieser Messungen ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

In der Abbildung sind zudem Markierungen für die Grenzwerte der Amplitudenverstärkung von  $-1,5\text{ dB}$  und der Phasenverschiebung von  $-45^\circ$  eingetragen. Aus dem Diagramm lassen sich somit direkt die Werte für  $f_{G,-1,5\text{ dB}}$  bzw.  $f_{G,-45^\circ}$  ermitteln. Eine Übersicht über diese Werte ist in Tabelle 4.5 aufgeführt. Wie zu erwarten, stimmt die Größenordnung der Dynamik mit den Angaben der Datenblätter überein. Es zeigt sich, dass bei dem verwendeten Netzgerät die Amplitudenverstärkung der einschränkende Faktor ist. Bei der elektronischen Quelle-Senke und den elektronischen Lasten limitiert jedoch die Phasenverschiebung den Betriebsbereich. Ein Abgleich mit den Anforderungen der Bordnetzkomponenten und deren Simulationsmodellen zeigt jedoch, dass die Dynamik der leistungselektronischen Aktorik über ausreichend Reserven verfügt, um diese korrekt abbilden zu können.

Tabelle 4.5: Übersicht über die gemessenen Eckfrequenzen für die Auslegungskriterien einer maximalen Amplitudenverstärkung von  $-1,5\text{ dB}$  bzw. einer maximalen Phasenverschiebung von  $-45^\circ$ . Die jeweilige Limitierung ist rot markiert.

Komponente	$f_{G,-1,5\text{ dB}}$	$f_{G,-45^\circ}$	$f_{G,-3\text{ dB}}$
Netzgerät	70 Hz	130 Hz	115 Hz
El. Quelle-Senke	2,1 kHz	1 kHz	2,5 kHz
El. Lasten	3,7 kHz	2 kHz	5,3 kHz

## 4.2.2 Verbraucheremulation und Energiemanagement

Das Echtzeitsystem zur Verbraucheremulation zeichnet sich vor allem durch seine hohe Anzahl an analogen Schnittstellen sowie einen sehr hohen Bedarf an Rechenleistung aus. Bei dem verwendeten Zielsystem handelt es sich um ein PXI-System, das über Einschubkarten mit einer ausreichenden Anzahl an analogen und digitalen Ein- und Ausgängen ausgerüstet ist. Abbildung 4.2 zeigt den prinzipiellen schematischen Aufbau des Systems inklusive der Datenflüsse. Auf dem Emulationssystem sollen bis zu 15 Simulationsmodelle elektrischer Verbraucher in Echtzeit berechnet werden. Jedes der Verbrauchermodelle ist über die analoge Schnittstelle mit einer elektronischen Last im Bordnetzprüfstand verbunden, welche als Sollwert den berechneten Verbraucherstrom erhält. Die elektronischen Lasten messen ihrerseits die eigenen Klemmengrößen und stellen diese über zwei weitere Analogsignale der Messtechnik bereit. Die Klemmenspannung wird dann wieder in die Simulationsmodelle der Bordnetzverbraucher zurückgeführt, so dass diese den Strom für den nächsten Ausführungsschritt berechnen können.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist das Energiemanagement datentechnisch mit allen Komponenten im Energiebordnetz verbunden. Zudem wird der Fahrzyklus, bestehend aus Umweltinformationen und Kundeninteraktion, an alle Simulationsmodelle verteilt. Um den Kommunikationsbedarf zwischen den einzelnen Echtzeitsystemen gering zu

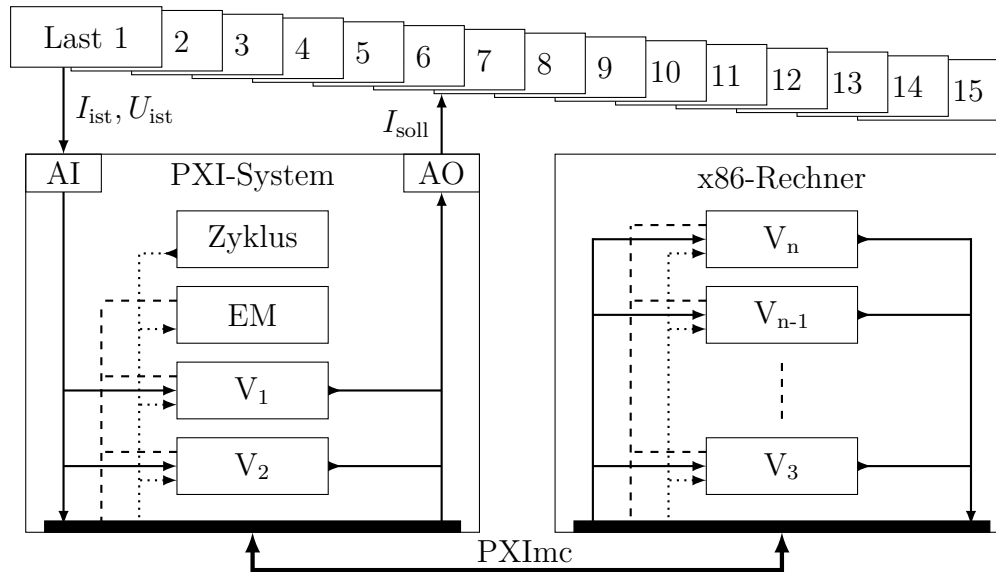


Abbildung 4.2: Das PXI-System dient als Hauptsteuerrechner zur Berechnung der Sollströme aller Verbrauchermodelle ( $V$ ), des Energiemanagements (EM) und zur Einspeisung des Zyklus. Zur Skalierung der Rechenleistung ist ein weiterer PC über eine PXImc-Schnittstelle angebunden.

halten, werden das Energiemanagement und der Fahrzyklus auf dem Echtzeitsystem der Verbraucheremulation ausgeführt. Somit kann ein Großteil der notwendigen Kommunikation lokal abgehandelt werden. Die Kommunikation mit dem Generatorprüfstand erfolgt über eine herkömmliche Ethernet-Verbindung. Diese kann zwar keine harte Echtzeit garantieren, jedoch wird die Ethernet-Kommunikation am gesamten Bordnetzprüfstand über ein separates Prüfstandnetzwerk geführt. Die so erreichten Latenzen im Bereich einer Millisekunde sind somit immer noch schneller als typische Zykluszeiten von CAN-Nachrichten oder die LIN-Kommunikation.

Die Rechenleistung des PXI-Systems ist limitiert und wird zu einem nicht unerheblichen Teil mit der Steuerung der analogen Peripherie und der notwendigen Kommunikation mit dem Host-PC belegt. Um eine hohe Anzahl von physikalischen Modellen mit ausreichend kleinen Integrationsschrittweiten deterministisch berechnen zu können, sollte die Rechenleistung zu einem gewissen Grad skalierbar sein. Zumal absehbar ist, dass die Komplexität der Simulationsmodelle mit zunehmender Modellierungstiefe steigen wird. Zur Skalierung der Rechenleistung wurde dem PXI-System ein zweiter Rechenknoten mit zwölf Kernen zur Verfügung gestellt, auf den die Berechnung der physikalischen Modelle ausgelagert werden kann. Die beiden Rechner sind über eine PXImc<sup>10</sup>-Schnittstelle [66, 96] miteinander gekoppelt. So wird eine deterministische Kommunikation mit Latenzen kleiner  $5 \mu\text{s}$  erreicht, welche angesichts der Modellzykluszeiten vernachlässigt werden kann.

<sup>10</sup>Bei der Spezifikation **PXI multi computing** handelt es sich um eine Erweiterung des PXI-Standards zur Kopplung von zwei oder mehr Systemen direkt über den PCI-Express-Bus.

### 4.2.3 Generatorprüfstand und Generatoremulation

Der in [119] beschriebene Generatorprüfstand besteht aus einem 230 A-LIN-Generator, der über eine elektrische Maschine angetrieben wird. Über die LIN-Schnittstelle kommuniziert der Prüfstandsrechner mit dem Generator. So können ein Sollwert für die Generatorspannung oder Einstellungen für eine künstliche Beschränkung der Generatordynamik vorgegeben werden. Zudem können aktuelle Systemgrößen wie der Erregerstrom oder die Temperatur des Generatorreglers ausgelesen werden. Der Generator wird über einen Riementrieb von einer umrichter gespeisten 13 kW-Asynchronmaschine angetrieben und kann mit variabler Drehzahl betrieben werden. Die Messung von Drehmoment und Drehzahl über eine Drehmomentenmesswelle erfolgt an der Antriebswelle der Asynchronmaschine.

Die gesamte Ansteuerung des Prüfstands erfolgte bisher über einen handelsüblichen PC mit Windows als Betriebssystem und war in der grafischen Programmiersprache LabVIEW implementiert. Die CAN-Schnittstelle zur Drehzahlvorgabe für den Umrichter und die LIN-Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Generator waren über USB-Erweiterungen nachgerüstet. Bedingt durch die Umstellung auf *NI VeriStand* sind die USB-Erweiterungen nicht mehr verwendbar, da keine entsprechenden Treiber verfügbar sind. Daher wurde für die Ansteuerung ein weiteres PXI-System konfiguriert, das über PXI-Einschubkarten entsprechende Schnittstellenerweiterung integrieren kann. Der gesamte Generatorprüfstand wurde im Laufe der Umstrukturierung in den Bordnetzprüfstand integriert, so dass lange Leitungswege zum Anschlusspunkt an das Bordnetz vermieden werden konnten.

Zusätzlich soll der Teilprüfstand die Möglichkeit der Generatoremulation bieten. Dafür wurde ein 300 A-Netzgerät parallel zum Generator an das Bordnetz angeschlossen. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt. Für die Generatoremulation wird die Ausgangsspannung des Netzgeräts  $U_{\text{Gen}}$  erfasst und als Eingang in das Simulationsmodell geführt. Das physikalische Simulationsmodell des Kfz-Generators berechnet den Generatorstrom und gibt diesen über ein analoges Signal als neuen Sollwert an das Netzgerät. Im Generatorbetrieb wird die Solldrehzahl über den CAN-Bus an den Frequenzumrichter gesendet und die Sollspannung über den LIN-Bus an den Generator. Zusätzlich werden alle Größen von Generator und Frequenzumrichter mitgeloggt und über zwei weitere Analogsignale werden Drehmoment und Drehzahl des Antriebsstrangs erfasst.

Um zu verhindern, dass beide System zeitgleich an das Bordnetz angeschlossen sind oder untereinander wechselwirken<sup>11</sup>, sind beide Systeme jeweils über sehr niederohmige<sup>12</sup> Doppelpol-Schütze an das Bordnetz angebunden.

<sup>11</sup>Inbesondere die relativ große Ausgangskapazität des Netzgerätes kann das Klemmenverhalten des Generators beeinflussen.

<sup>12</sup>Der Spannungsabfall beträgt laut Datenblatt 50 mV bei einer Stromstärke von 100 A, das entspricht einem Widerstand von 0,5 m $\Omega$ .

## 4 Bordnetzprüfstand

Je nachdem, ob der echte Generator betrieben wird oder eine Generatoremulation stattfinden soll, wird entweder die Generator- und Antriebssteuerung oder ein physikalisches Generatormodell auf das Echtzeitsystem geladen und das entsprechende Schütz geschlossen. Die Kommunikation mit dem Energiemanagementsystem erfolgt über eine Ethernet-Verbindung. Da sowohl die Generator- und Antriebssteuerung als auch das Generatormodell dieselbe Kommunikationsschnittstelle nutzen, erkennt das Energiemanagement keinen Unterschied zwischen realem oder emuliertem Generator. Abbildung 4.4 zeigt eine Fotografie des gesamten Aufbaus.

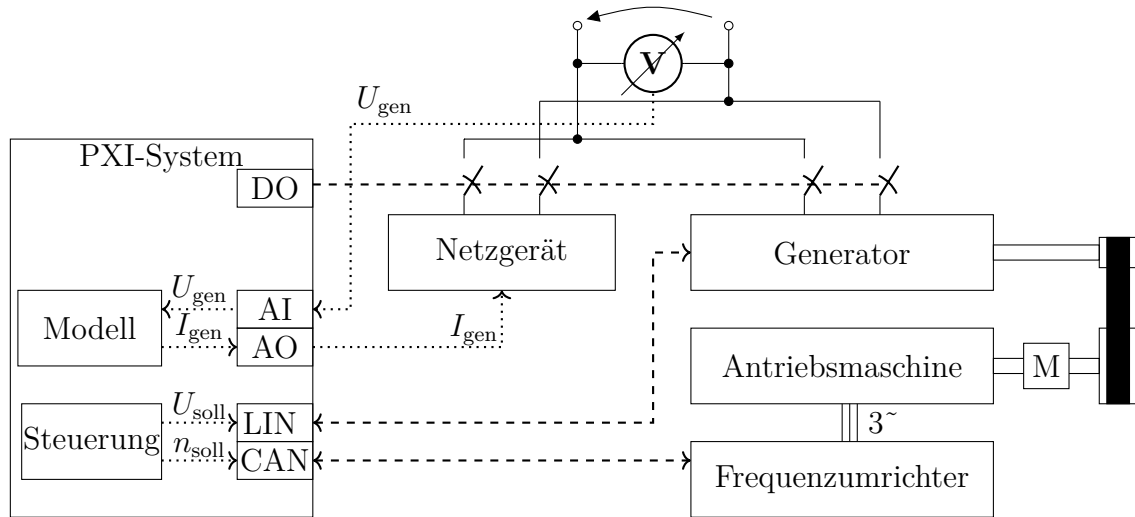


Abbildung 4.3: Schema des Generator- und Generatoremulationprüfstandes: Im Emulationsbetrieb wird das Netzgerät an den Bordnetzprüfstand geschaltet und über ein Simulationsmodell der Generatorstrom vorgegeben.

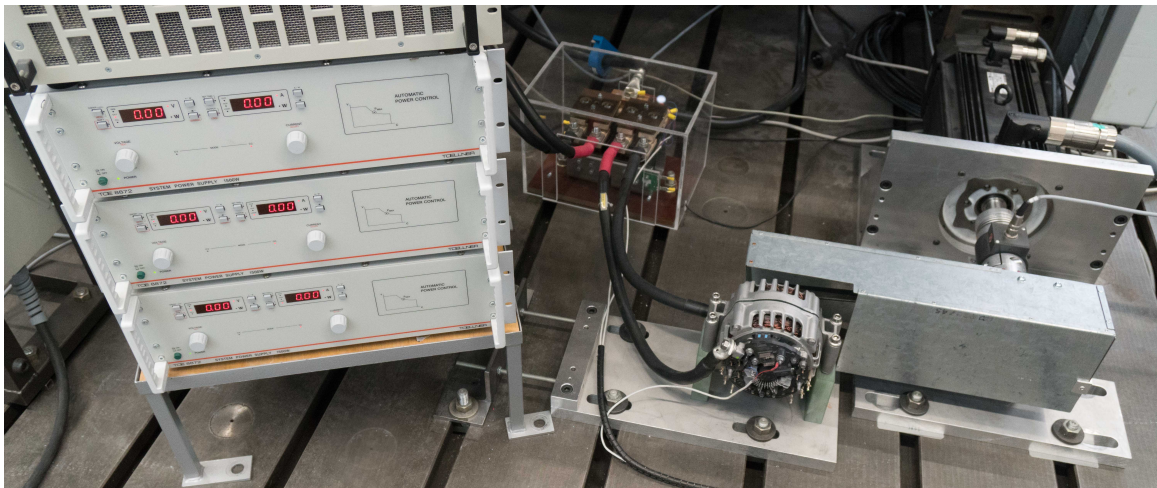


Abbildung 4.4: Generatorprüfstand und Generatoremulation: Über Leistungsschütze kann entweder der Generator oder das Netzgerät mit dem Bordnetzprüfstand verbunden werden.



#### 4.2.4 Batterieemulation

Das Klemmenverhalten der Batterie hat einen ähnlich großen Einfluss auf das 12 V-Bordnetz wie das des Generators. Aus diesem Grund soll für diese Komponente die gleiche Strategie wie bei den Erzeugern verfolgt werden und der Einsatz realer oder emulierter Batterien möglich sein. Bisher werden als elektrische Energiespeicher sowohl Blei-Säure als auch Li-Ionen-Batterien verwendet. Dazu steht eine Vielzahl an Batterien verschiedener Kapazitäten und Alterungszuständen zur Verfügung. Insbesondere die Verwendung realer Batterien ist bei der Generierung reproduzierbarer Ergebnisse kritisch zu betrachten [74]. Die genaue Vorgeschichte der Batterie ist dem Anwender oft unbekannt. Ohne entsprechend lange Ruhezeiten oder eine dauerhafte Strommessung ist auch der aktuelle Ladezustand nur bedingt bestimmbar. Zudem wirken sich bei Langzeitmessungen thermische und alterungsbedingte Effekte auf die Messergebnisse aus.

Der Batterieemulator besteht aus einer elektronischen Quelle-Senke und einem Echtzeitrechner. Die beiden Komponenten sind über analoge und digitale Mess- und Steuerleitungen verbunden, wie in Abbildung 4.5 (a) dargestellt. Bei der elektronischen Quelle-Senke handelt es sich um ein unipolares System, d.h. sie kann Strom und Spannung in zwei Quadranten stellen. Die Bereichsgrenzen der gewählten Ausführung liegen bei einem Spannungsbereich von 0 V bis 20 V und einem Strombereich von  $-340$  A bis 340 A. Zudem besitzt das System eine sehr hohe Dynamik. Für einen Lastsprung von  $-90\%$  auf  $90\%$  (ca.  $-300$  A auf 300 A) werden  $250\ \mu\text{s}$  benötigt. Prinzipiell lässt sich eine elektronische Quelle-Senke auch durch Parallelschaltung und entsprechende Ansteuerung einer elektronischen Last und eines Netzgeräts realisieren. Vorversuche mit bereits vorhandenen Geräten haben jedoch nicht die gleiche Dynamik erreicht wie ein vom Hersteller abgestimmtes Gerät.

Bei dem Echtzeitrechner handelt es sich um einen handelsüblichen PC, der über eine PCI-Erweiterungskarte mit den benötigten analogen und digitalen Ein- und Ausgängen ausgestattet wurde. Als Echtzeitbetriebssystem wird wiederum *NI Veristand* verwendet. Da es sich bei Batterien um sehr dynamische Komponenten handelt und die Bordnetzatterie einen sehr großen Einfluss auf die Bordnetzspannung hat, wurde bei dem Emulationssystem Wert darauf gelegt, dass die Modelle mit einer hohen Ausführungsfrequenz berechnet werden können. Die erreichbare Zykluszeit ist dabei stark von der verwendeten Hardware und von deren Einstellungen abhängig. Durch geeignete Konfiguration der Hardware konnte, trotz der Verwendung eines handelsüblichen Rechners, eine Ausführungsfrequenz von 25 kHz unter harten Echtzeitbedingungen erreicht werden.

Die elektronische Quelle-Senke und der Echtzeitrechner sind in einen fahrbaren 19"-Serverschrank integriert, siehe Abbildung 4.5 (b). Die Quelle-Senke misst an den eigenen Klemmen Strom und Spannung<sup>13</sup>, welche als Analogsignal zu dem Echtzeitrech-

<sup>13</sup>Zur Kompensation des Spannungsfalls über die Anschlussleitungen werden separate Messleitungen verwendet.

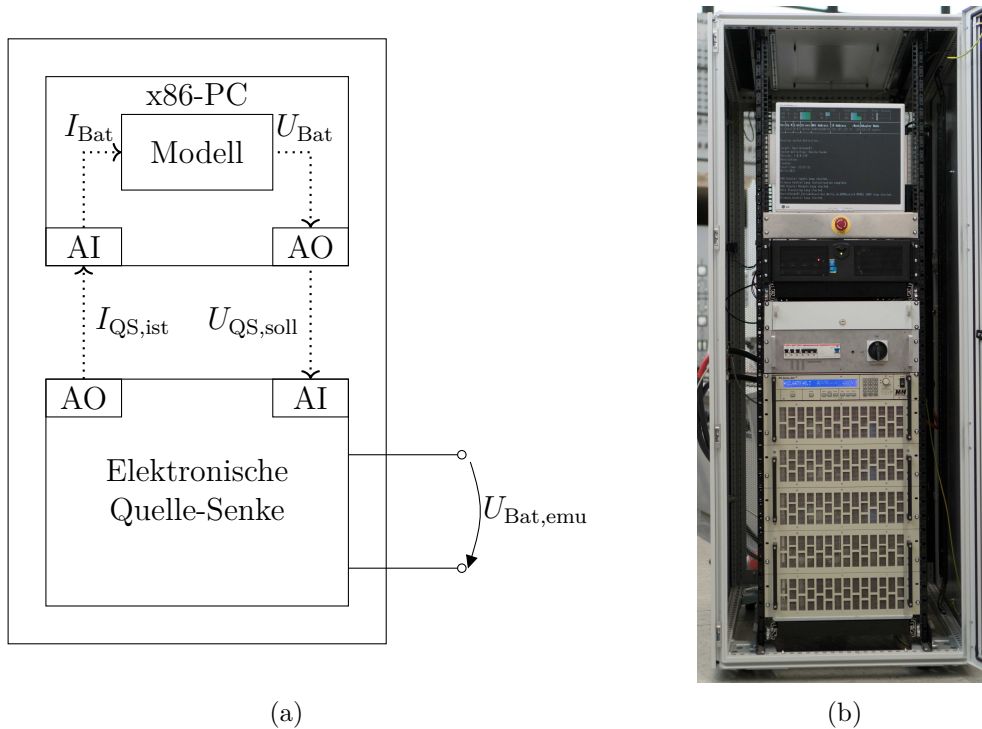


Abbildung 4.5: Schema (links) und Aufbau (rechts) eines Batterieemulationssystems bestehend aus einer elektronischen Quelle-Senke und einem Echtzeitrechner in einem fahrbaren Schaltschrank.

ner geführt werden. Zur Ansteuerung dient ein analoger Kanal zur Sollwertvorgabe. Einige weitere digitale Kanäle werden genutzt, um Einstellungen sowie Betriebsart der elektronischen Quelle-Senke zu ändern. Auf einem Monitor gibt das Echtzeitsystem aktuelle Statusmeldungen aus. Des Weiteren befinden sich in dem Schrank ein Stromverteiler sowie eine Not-Aus-Einheit, welche direkt auf die Not-Aus-Funktion der elektronischen Quelle-Senke wirkt.

Neben dem anvisierten Hauptanwendungsbereich der Batterieemulation bietet das System auch die Möglichkeit zur Emulation weiterer Komponenten. Prädestiniert dafür sind Systeme, die energetisch bidirektional mit dem 12 V-Bordnetz wechselwirken. Vorstellbar ist beispielsweise die Emulation einer 48 V-Ebene inklusive deren Komponenten und des Gleichspannungswandlers zur Kopplung mit der 12 V-Ebene, wie in [V5] erläutert. Mit diesem Ansatz können die Auswirkungen einer zweiten Spannungsebene auf das 12 V-Bordnetz untersucht werden.

#### 4.2.5 48 V-Ebene

Um den Bordnetzprüfstand auf die Einführung einer weiteren Spannungslage vorzubereiten, wurde schon in [45] ein 48 V-Prüfstand vorgesehen. Der verwendete Gleich-

spannungswandler für den Industrieinsatz wurde durch einen Vorserienprototyp eines 48 V/12 V Gleichspannungswandlers für den Einsatz im Automobil ersetzt. Das Gerät empfängt über seine CAN-Schnittstelle Sollwerte für Strom oder Spannung und kann eine Dauerleistung von 3 kW bidirektional übertragen. Da sich diese Arbeit auf das 12 V-Bordnetz beschränkt, wird dieses System jedoch im weiteren Verlauf nicht verwendet.

### 4.3 Validierung der Emulationssysteme

In diesem Abschnitt soll die Funktionalität der einzelnen Emulationssysteme validiert werden. Ziel der Emulation physikalischer Modelle von Bordnetzkomponenten ist, dass der leistungselektronische Aktor sich an seinen Klemmen möglichst exakt so verhält wie das physikalische Modell, das mit denselben Eingangswerten in der Simulationsumgebung unter numerisch idealen Bedingungen berechnet wurde. Dieses wird im Folgenden als Referenzsimulation bezeichnet. Der Ausdruck *numerische ideale Bedingungen* meint, dass die Simulation mit einem Lösungsverfahren mit variabler Schrittweite und einer sehr geringen Fehlertoleranz gelöst wurde.

Zwei wesentliche Effekte tragen zu einer Abweichung zwischen Referenzsimulation und dem Klemmenverhalten des Emulationssystems bei. Zum einen ergibt sich eine rechnerische Abweichung durch den für den Echtzeitbetrieb notwendigen Einsatz deterministischer Lösungsverfahren mit fester Integrations-schrittweite. Sind, wie bei den verwendeten physikalischen Modellen, die Zeitkonstanten groß genug bzw. können ausreichend kleine Schrittweiten verwendet werden, liegt die rechnerische Abweichung im Promillebereich und kann vernachlässigt werden. Zum anderen ergibt sich eine weitaus größere Abweichung durch die erreichbare Stellgenauigkeit, die Totzeiten im System und durch die begrenzte Dynamik der nachgelagerten Aktorik.

Um die Abbildungsqualität der Emulation zu bestimmen, wurden die drei Teilsysteme einzeln mit Szenarien getestet, bei denen eine maximale Dynamik des Teilsystems gefordert ist. Diese Dynamik kann durch sprunghaften Wechsel der jeweiligen Eingangsgröße bzw. durch eine Änderung des Sollwertes abgerufen werden. Da bei diesen Messungen nie ein ideales Szenario<sup>14</sup> dargestellt werden kann, genügt es zur Berechnung des Verlaufs der Referenzsimulation nicht, dasselbe Testszenario in der Simulationsumgebung zu modellieren und mit der Messung abzugleichen. Vielmehr muss der gemessene Verlauf der jeweiligen Eingangsgröße in die Simulation zurückgeführt und daraus der Verlauf der Referenzsimulation berechnet werden.

Abbildung 4.6 zeigt die erläuterte Validierungsmethode am Beispiel eines Emulationssystems mit Strommessung und Spannungseinprägung, wie es beispielsweise für Batterien verwendet wird. Das zu testende Emulationssystem wird mit einem weiteren

---

<sup>14</sup>Auch die Testhardware hat Einschränkungen in ihrer Dynamik und kann Strom- oder Spannungssprünge nur mit einem gewissen Gradienten abbilden.

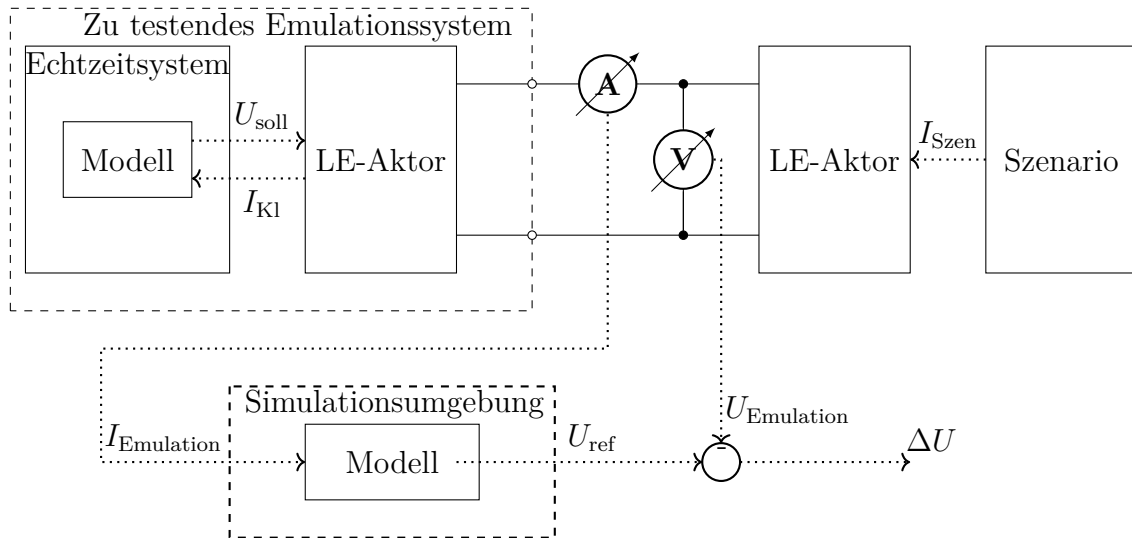


Abbildung 4.6: Zur exakten Validierung der Emulationssysteme werden die Messsignale aus den Testszenarien in die Simulationsumgebung rückgeführt und dort abermals simuliert. Aus der Differenz kann der Fehler zwischen Simulation und Emulation bestimmt werden.

leistungselektronischen Aktor verbunden, welchem das gewählte Szenario als Stromprofil vorgegeben werden kann. Nachdem die Messung vorgenommen wurde, wird der Klemmenstrom  $I_{K1}$ , der sich tatsächlich eingestellt hat, in die Simulationsumgebung importiert und dort das Testszenario simuliert. Der sich daraus ergebende Referenzspannungsverlauf kann anschließend mit der Messung aus dem Testszenario verglichen werden.

### 4.3.1 Verbraucheremulation

Die Komponenten mit den höchsten Stromgradienten im Energiebordnetz sind Heizsysteme wie z.B. Sitzheizungen oder die Heckscheibenheizung. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, wird der Stromanstieg lediglich durch die Induktivität des Kabelbaums begrenzt. Es treten Stromgradienten bis zu  $50 \frac{\text{A}}{\text{ms}}$  auf.

Abbildung 4.7 zeigt das Zuschalten der emulierten Sitzheizung an das Bordnetz sowie den Referenzstromverlauf aus der Simulation. Zum Zeitpunkt 0,1 s erhält die Kontrollebene des Sitzheizungsmodells über den Umweltbus den Befehl zur Aktivierung des Heizsystems. Der Widerstand hat zu diesem Zeitpunkt einen Wert von  $0,78 \Omega$ . Zum Zeitpunkt der Aktivierung der Sitzheizung kommt es, bedingt durch die Induktivitäten im Leitungssatz, zu einem kurzzeitigen Einbruch der Klemmenspannung direkt an der Sitzheizung. Der gemessene Stromverlauf weist eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Referenzverlauf auf. Der maximale Fehler zwischen Emulation und Simulation tritt zum Zeitpunkt der Aktivierung der Sitzheizung auf. Er liegt in diesem Szenario bei 4 A absolut oder 2 % relativ, bezogen auf den Vollausschlag der elektronischen Last von 150 A.

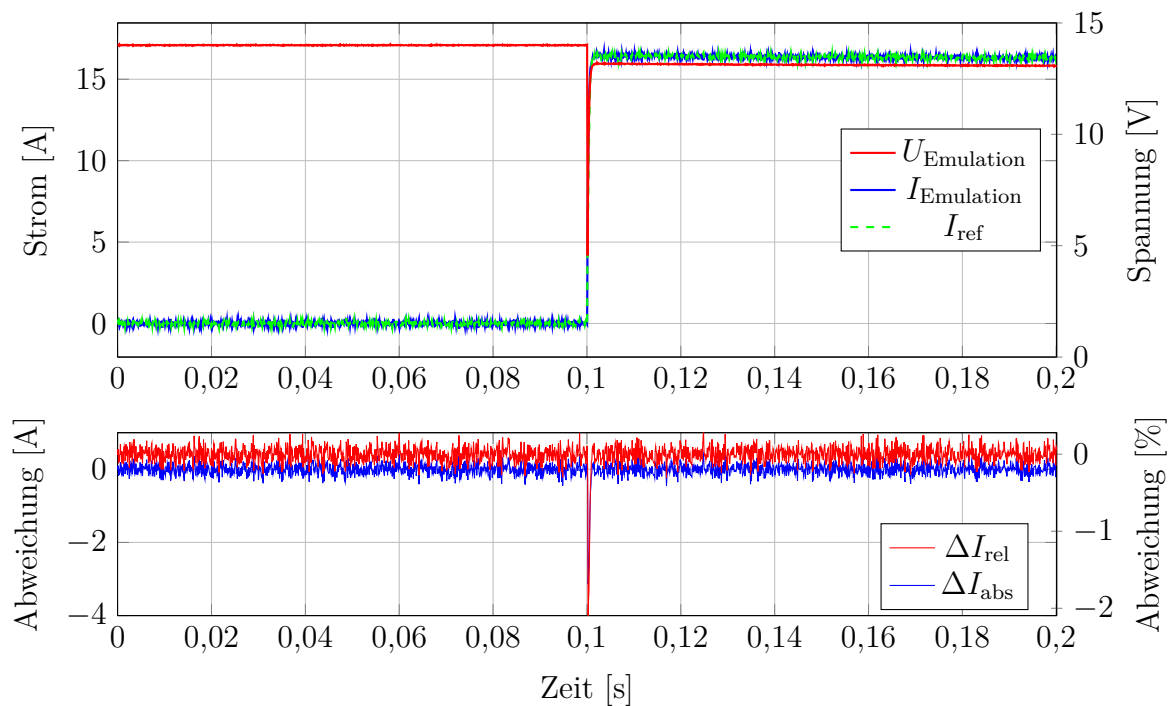


Abbildung 4.7: Spannungs- und Stromverläufe der Emulation einer Sitzheizung verglichen mit dem Referenzverlauf aus der Simulationsumgebung.

### 4.3.2 Generatoremulaton

In dem in Abbildung 4.8 dargestellten Validierungsszenario handelt es sich um einen sprunghaften Anstieg der Verbraucherleistung. Zu Beginn des Szenarios liefert der Generator einen konstanten Strom von ca. 20 A in das Bordnetz. Zum Zeitpunkt 0,2s wird der Verbraucherstrom um 150 A erhöht. Die damit einhergehende Absenkung der Spannung an den Generatorklemmen führt zu einem Anstieg des Generatorstroms solange bis die Sollspannung wieder erreicht ist.

Der gemessene Verlauf der Klemmenspannung am Generator wurde in die Simulationsumgebung zurückgeführt, um den Referenzverlauf für den Generatorstrom zu erzeugen. Wiederum zeigt sich eine sehr hohe Abbildungsgenauigkeit. Lediglich zum Zeitpunkt des Stromanstiegs eilt der Ausgangsstrom des Netzgeräts dem Referenzverlauf leicht nach. Die maximale Abweichung zwischen Simulation und Emulation in diesem Zeitraum beträgt 4 A absolut bzw. 2 % relativ bezogen auf den Nennstrom des Kfz-Generators von 230 A. Im Diagramm der Abweichungen ist zudem die veränderte Schaltfrequenz des emulierten Generatorreglers nach dem Lastsprung erkennbar. Da dieser Frequenzanteil vom Netzgerät nicht perfekt nachgebildet werden kann, entsteht ein pulsierender Fehler mit einer Amplitude von ca. 1 A.

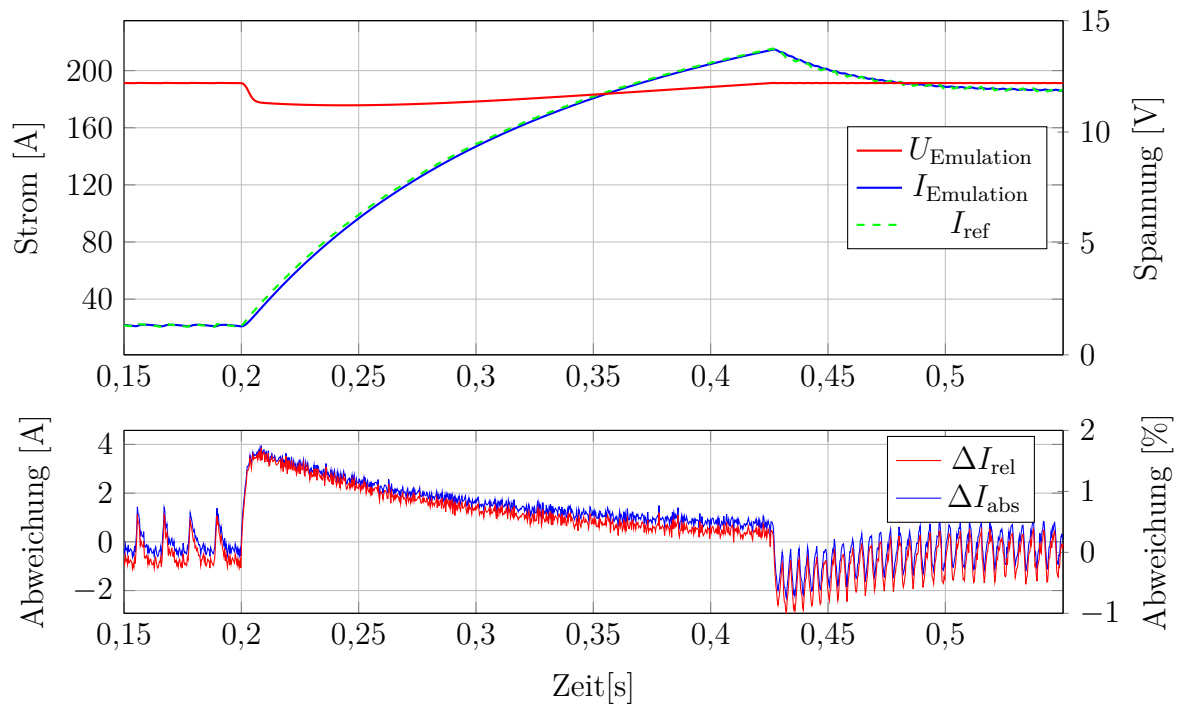


Abbildung 4.8: Spannungs- und Stromverläufe der Emulation eines Kfz-Generators verglichen mit dem Referenzverlauf aus der Simulationsumgebung.

### 4.3.3 Batterieemulation

Zur Validierung des Batterieemulationssystems wurde dieses, ausgehend von einem Anfangsstrom von 20 A, mit einem Stromsprung von 300 A und einem Gradienten von  $50 \frac{\text{A}}{\text{ms}}$  an den Klemmen belastet. Um eine möglichst hohe Spannungsdynamik zu erreichen, wurde dazu ein Batteriemodell mit einem relativ hohen Innenwiderstand von  $15 \text{ m}\Omega$  gewählt.

Abbildung 4.9 zeigt das Ergebnis dieses Versuchs. Im Bereich des linearen Stromanstiegs ist der sofortige und proportionale Spannungsabfall über dem Innenwiderstand des Batteriemodells erkennbar. Im Bereich der Konstantstromphase bei 320 A wird das Verhalten der RC-Elemente des Ersatzschaltbildes sichtbar.

Die maximale Abweichung der Klemmenspannung während des Stromanstiegs gegenüber der Referenzsimulation liegt bei 0,23 V bzw. bei 1,1 % relativ, bezogen auf den maximalen Ausgangsstrom der elektronischen Quelle-Senke, von 340 A. Während der Konstantstromphase verringert sich die relative Abweichung auf 0,1 % und liegt damit im Bereich der Stellgenauigkeit der elektronischen Quelle-Senke.

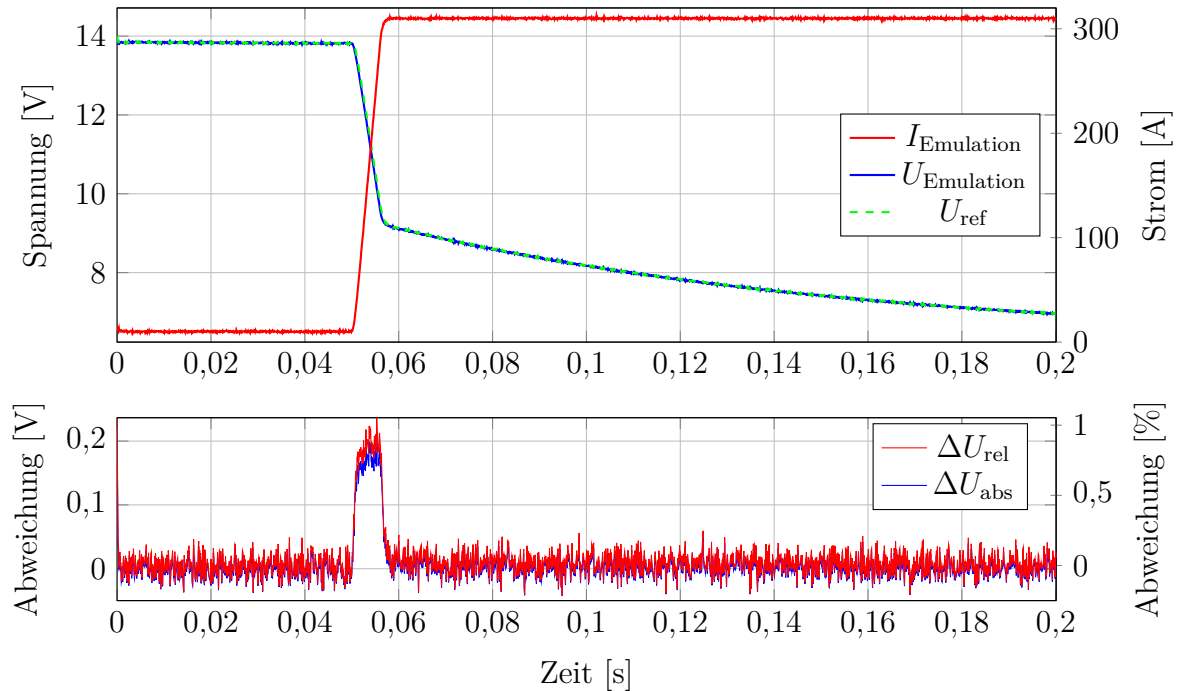


Abbildung 4.9: Spannungs- und Stromverläufe der Emulation einer Bordnetzatterie verglichen mit dem Referenzverlauf aus der Simulationsumgebung.

## 4.4 Automatisierung des Modellexports

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die einzelnen Teilsysteme des Bordnetzprüfstands erläutert und deren Funktionalität anhand ausgewählter Szenarien validiert, wofür die Teilsysteme manuell konfiguriert wurden. Aufgrund der hohen Anzahl an Modellen und logischen Verbindungen zwischen den Modellen wäre eine manuelle Konfiguration des Echtzeittests für eine komplette Bordnetzsimulation, wie in Abschnitt 3.8 beschrieben, sehr zeitaufwendig und zudem fehlerträchtig. Aus diesem Grund wurde der komplette Exportvorgang von der Bordnetzsimulation in den Echtzeittest am Bordnetzprüfstand vollautomatisiert. Dazu wurde ein Softwarewerkzeug entwickelt, das den Anwender über eine grafische Benutzeroberfläche durch den gesamten Exportprozess führt. Das Werkzeug nutzt dazu die APIs<sup>15</sup> von *Dymola*, *Matlab/Simulink* und *NI VeriStand*, um die nötigen Abläufe zu automatisieren, die ansonsten manuell ausgeführt werden müssten. Dabei werden im Wesentlichen folgende fünf Schritte durchlaufen:

1. *Identifikation*: Im ersten Schritt müssen zunächst alle Komponenten für den Echtzeittest, d.h. alle elektrischen Verbraucher, Erzeuger, Speicher und das Energiemanagement aus der Bordnetzsimulation, identifiziert werden. Die in Abschnitt 3.1 beschriebene generische Schnittstelle erleichtert dabei die Identifikation, da nur Modelle, welche von den generischen Klassen abgeleitet wurden, auch gültige Bordnetzkomponenten sind. Der Anwender entscheidet dann, welche Komponenten er in den Echtzeittest mit einbeziehen will und ob Generator und Batterie emuliert werden sollen oder die realen Komponenten verwendet werden.
2. *Extraktion und Kausalisierung*: Nach der Identifikation werden die Modelle für die Kompilation vorbereitet, d.h. sie werden einschließlich der gewählten Modellparameter, aus der Gesamtsimulation extrahiert. Zur Auflösung der akausalen Verbindungen aus der Simulationsumgebung werden die Modelle kausalisiert. Dazu wird für die Modelle von Verbraucher und Generator die Stromeinprägung, für das Modell der Batterie die Spannungseinprägung verwendet.
3. *Kompilation*: Wenn die Modelle der im Echtzeittest zu verwendenden Komponenten einzeln und kausalisiert vorliegen, können sie für die Echtzeitzielsysteme kompiliert werden. Dabei kann der Anwender für jedes Modell individuell den Lösungsalgorithmus und die Ausführungsfrequenz festlegen. Die ausführbaren Dateien werden dann in einer Datenbank abgelegt. Da die Kompilation relativ zeitintensiv ist, sollen nur Modelle kompiliert werden, die nicht bereits in der Datenbank enthalten sind. Mittels einer rekursiven Funktion wird eine eindeutige Prüfsumme aus dem *Modelica*-Code des Modells, einschließlich aller verwendeter Untermodelle gebildet. Für jedes der Modelle wird im Vorfeld geprüft, ob das

---

<sup>15</sup>Eine API (Application Programming Interface) ist eine Programmierschnittstelle mit deren Hilfe ein Programm auf die Funktionalität eines anderen Programms zugreifen kann.



Modell schon mit denselben Parametern kompiliert vorliegt. Entsprechend wird das Modell dann entweder aus der Datenbank geladen oder der Kompilationsvorgang wird neu angestoßen.

4. *Konfiguration des Echtzeittestprojekts:* In diesem Schritt werden zunächst die ausführbaren Modelle den vom Anwender bestimmten Echtzeitzielsystemen zugewiesen. Um die Modelle der Bordnetzkomponenten für die Emulation mit den entsprechenden leistungselektronischen Aktoren zu koppeln die Ein- und Ausgänge der Modelle für Strom oder Spannung werden entsprechend der Wahl des Schnittstellenalgorithmus mit den analogen Ein- und Ausgängen des Zielsystems verbunden. Zudem wird der Umweltzyklus in das Projekt geladen. Wird anstelle der Emulation der Betrieb der realen Batterie oder des Generators gewählt, werden anstatt der kompilierten physikalischen Modelle entsprechende Mess- und Steerroutinen zur Erfassung der Klemmengrößen und des Betriebs des Generators in das Projekt geladen. Des Weiteren müssen alle logischen Verbindungen zwischen dem Energiemanagement und den Bordnetzkomponenten neu angelegt sowie die Umweltinformationen verteilt werden.
5. *Verteilung und Start:* Nachdem der Echtzeittest konfiguriert wurde, werden die Modelle der Bordnetzkomponenten und des Energiemanagements auf die vorgesehenen Echtzeitzielsysteme verteilt, und der Echtzeittest wird gestartet.

### 4.5 Zusammenfassung des Bordnetzprüfstandes

In diesem Teil der Arbeit wurde ein neues Prüfstandskonzept zur Validierung von Energiemanagementsystemen auf einem Bordnetzprüfstand entwickelt, umgesetzt und die Teilkomponenten wurden separat validiert. Abbildung 4.10 zeigt ein Schema des Bordnetzprüfstandes. In diesem sind die einzelnen Teilsysteme und ihre Aufgaben aufgeführt.

Auf dem Hauptrechensystem, bestehend aus einem PXI-System und einem weiteren Rechner zur Erhöhung der Rechenleistung, werden das Energiemanagement und bis zu 15 physikalische Modelle elektrischer Verbraucher berechnet und die entsprechenden Ströme über elektronische Lasten in das Bordnetz eingepreßt. Die datentechnische Verbindung des Energiemanagements mit den weiteren Emulationssystemen erfolgt über eine Netzwerkverbindung.

Zur Darstellung des Generators kann entweder der echte Generator oder die Generatoremulation mit dem Bordnetz verbunden werden. Damit besteht die Möglichkeit, weitere Generatortypen bzw. Konfigurationen ohne Änderungen am Prüfstand selbst zu untersuchen.

Das Batterieemulationssystem ist in einem fahrbaren Schaltschrank untergebracht und bietet daher die Flexibilität, an allen Punkten im Bordnetz angeschlossen werden zu

können. Dies erlaubt auch in Zukunft die einfache Emulation weiterer Systeme, die mit dem 12 V-Bordnetz energetisch wechselwirken.

Gesteuert wird der gesamte Prüfstand über einen handelsüblichen PC auf Windows-Basis, der über das Netzwerk mit den Echtzeitsystemen verbunden ist. Dieser PC visualisiert während der Versuche aktuelle Daten aus dem Prüfstand und stellt eine grafische Benutzeroberfläche zur Steuerung bereit. Zudem ist auf diesem Rechner ein weiterer Server implementiert, der die Daten für ein Visualisierungsprogramm [41] des Projektpartners aufbereitet.

Die Anwendung der Methode der modellbasierten Komponentenemulation erlaubt einen fließenden Übergang zwischen der reinen Simulation und dem Einsatz realer Komponenten. Tabelle 4.6 fasst die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten zusammen.

Tabelle 4.6: Übersicht der Möglichkeiten der Komponentenemulation und des Einsatzes realer Komponenten am Bordnetzprüfstand

	Simulation	Emulation	Reale Komponenten
Kabelbaum	✓	✗	✓
Verbraucher	✓	✓	✗
Erzeuger	✓	✓	✓
Speicher	✓	✓	✓
Wandler	✓	✓	✓

Prinzipiell lässt sich jede Komponente emulieren, von der ein entsprechend validiertes Modell existiert. Ausgehend von den Modellen aus der Simulationsumgebung können alle elektrischen Verbraucher, Erzeuger und Energiespeicher durch die entsprechenden Emulationssysteme auf dem Bordnetzprüfstand abgebildet werden. Nur das Bordnetz selbst mit der Karosserie als Rückleiter kann nicht emuliert werden, da es zum heutigen Stand der Technik keinen Aktor gibt, der in der Lage ist, ein niederohmiges, vielpoliges System zu emulieren. Ein erster Vorschlag zur technischen Realisierung eines solchen Systems wurde in [V4] gemacht.

Zusätzlich zur Möglichkeit der Emulation stehen ein 230 A-Generator, ein 3 kW-Gleichspannungswandler und diverse Blei- und Li-Ionen-Batterien als reale Komponenten zur Verfügung, so dass der Emulationsgrad in mehreren Stufen wählbar ist. Abbildung 4.11 zeigt eine Fotografie des gesamten Bordnetzprüfstands.

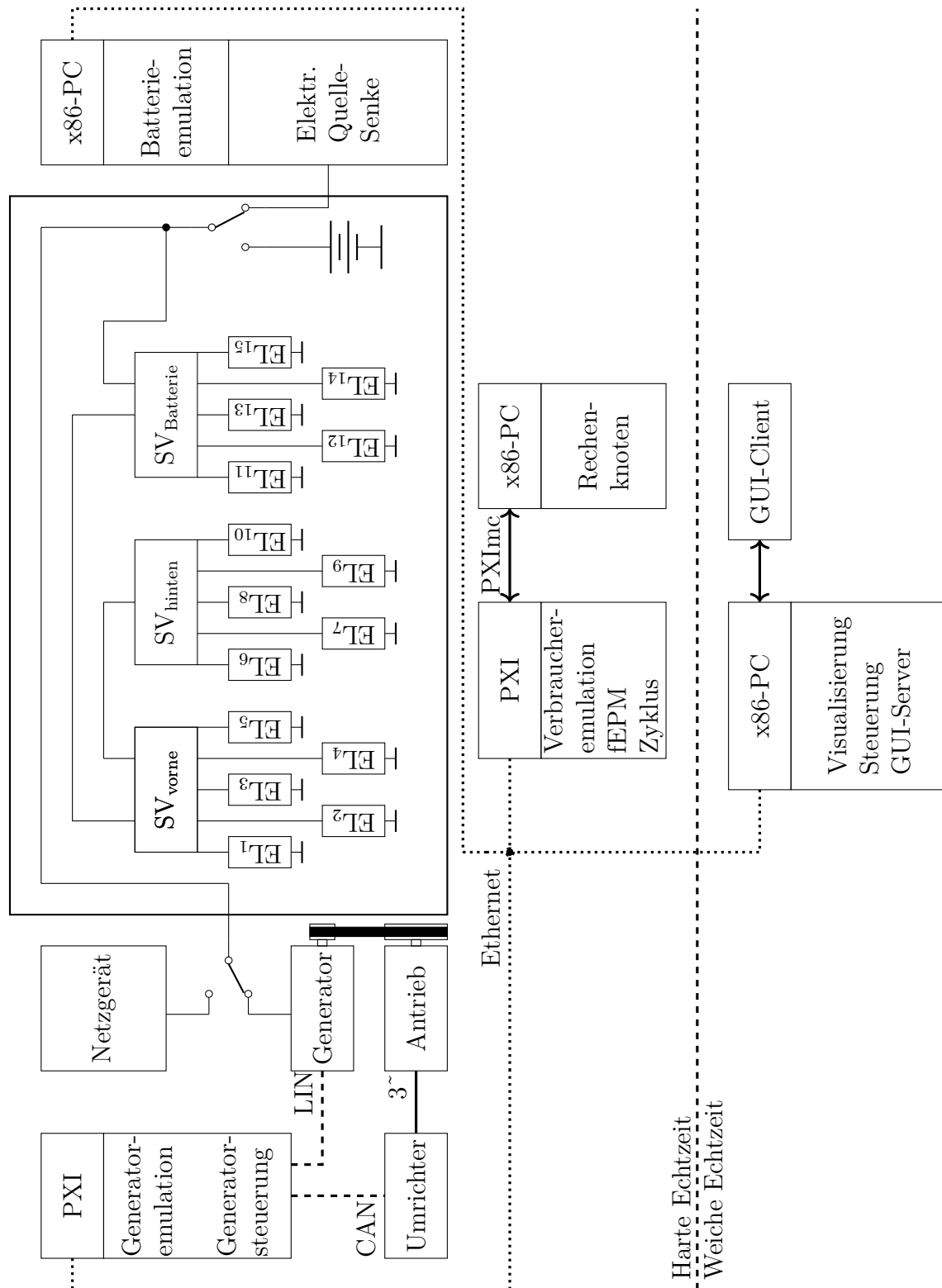


Abbildung 4.10: Schema des Bordnetzprüfstandes: Der kombinierte Generator- und Generatoremulationsprüfstand befindet sich im Motorbereich, der Batterieemulator am Heck. Das Haupt-PXI steuert 15 elektronische Lasten und berechnet das Energiemanagement.

#### 4 Bordnetzprüfstand

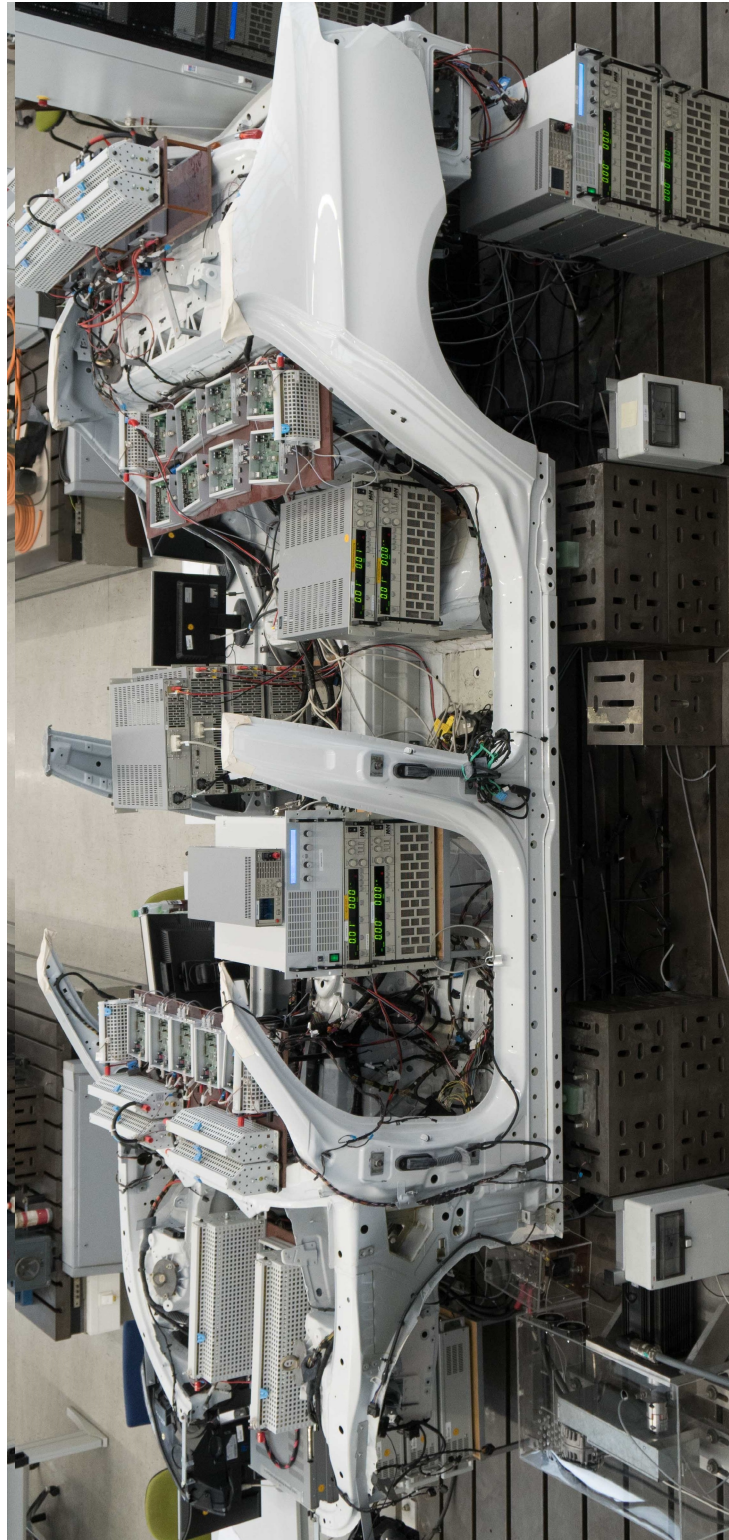


Abbildung 4.11: Bordnetzprüfstand auf Basis einer Fahrzeugkarosserie inkl. Kabelbaum. Die Verbraucher werden über 15 elektronische Lasten dargestellt. Im Motorbereich ist der kombinierte Generator / Generator-emulationsprüfstand, im Heckbereich das Batterieemulationssystem zu sehen.

# 5 Optimierung und Validierung der betriebsstrategischen Parameter

In diesem Kapitel wird eine multikriterielle Optimierung der betriebsstrategischen Parameter des Energie- und Leistungsmanagementsystems für ein 12 V-Bordnetz durchgeführt. Dazu wird zunächst das Optimierungsproblem definiert und ein passender Optimierungsalgorithmus ausgewählt. Damit kann die Menge aller möglichen Lösungen berechnet werden. Anschließend werden einzelne Punkte dieser Menge auf dem im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Bordnetzprüfstand validiert.

## 5.1 Definition des Optimierungsproblems

Klassische Optimierungsverfahren versuchen den Wert einer gegebenen Zielfunktion zu minimieren oder zu maximieren<sup>1</sup>. Dazu wurde für die unterschiedlichen Arten von Optimierungsproblemen eine Vielzahl an angepassten Optimierungsalgorithmen entwickelt [64].

Insbesondere bei der Optimierung der Parameter technischer Systeme sind meist mehrere Systemgrößen gleichzeitig zu verbessern bzw. in gewissen Grenzen zu halten. Dabei führt die Verbesserung einer Eigenschaft oft zu einer Verschlechterung einer anderen Eigenschaft, woraus sich ein Zielkonflikt ergibt. Für diese Art von Problem können multikriterielle Optimierungsverfahren verwendet werden [10]. Das Ergebnis einer multikriteriellen Optimierung ist kein globales Optimum, sondern eine Menge aus Kompromisslösungen, welche alle als optimal anzusehen sind. Das heißt, keine Eigenschaft kann verbessert werden, ohne gleichzeitig eine andere Eigenschaft zu verschlechtern. Diese Menge wird auch *Paretomenge* genannt [34]. Aus der Paretomenge kann der Anwender die Lösung wählen, die der gewünschten Gewichtung der Optimierungskriterien entspricht [137].

In diesem Abschnitt werden zunächst die Optimierungskriterien und die Freiheitsgrade des Optimierungsproblems definiert, und im Anschluss wird die Zielfunktion aufgestellt.

---

<sup>1</sup>Optimierungsalgorithmen sind in der Regel auf die Minimierung der Zielfunktion ausgelegt. Eine Maximierung kann aber durch Multiplikation mit -1 in eine Minimierung verwandelt werden.

### 5.1.1 Optimierungskriterien

Ziel der multikriteriellen Optimierung dieser Arbeit ist die Ermittlung der Pareto-menge hinsichtlich der drei Kriterien Energieeffizienz, Batteriebelastung und Spannungsstabilität. Der Zielkonflikt zwischen Energieeffizienz und Batteriebelastung ist sofort ersichtlich. Sämtliche Abweichungen von einer Nullstromregelung der Batterie müssen sich sofort in deren Belastung niederschlagen. Das dritte Kriterium der Stabilität soll zudem sicherstellen, dass das Fahrzeug zu jeder Zeit eine ausreichende Reserve an elektrischer Leistung für kritische Fahrzeugzustände zur Verfügung stellen kann.

#### Energieeffizienz

Die prinzipiellen Möglichkeiten zur Optimierung der Energiebilanz des elektrischen Bordnetzes wurden in Abschnitt 3.7 beschrieben. Diese bestehen aus einer verstärkten Nutzung von Rekuperationsphasen und Arbeitspunkten mit hohem Wirkungsgrad sowie einer zeitlichen Verschiebung der Leistungsaufnahme von Verbrauchern mit energetischen Reserven in diesen Phasen.

Zur Bewertung der energetischen Bilanz eines Systems über einen bestimmten Zyklus eignet sich der Nutzungsgrad. Der Nutzungsgrad entspricht dem Verhältnis aus genutzter zu zugeführter Energie. Für das in dieser Arbeit betrachtete System entspricht die Nutzenergie der aufintegrierten Summe aller Wirkleistungen der Bordnetzverbraucher, wie in (5.1) definiert. Verluste in den Eingangsstufen (siehe Abschnitt 3.2.2) und ohmsche Verluste im Kabelbaum werden nicht auf die Wirkleistung angerechnet.

$$E_{\text{wirk}} = \sum_{n=1}^{N_{\text{Verbraucher}}} \int_{t=0}^{T_{\text{Zyklus}}} P_{\text{wirk},n}(t) \cdot dt \quad (5.1)$$

Die vom Bordnetz aufgenommene Energie stammt aus der mechanischen Energie des Riemtrieb, die vom Generator in elektrische Energie gewandelt wird. Die mechanisch aufgenommene Leistung  $P_{\text{mech}}(t)$  kann über Drehmoment und Drehzahl des Generators bestimmt werden. Die aufgenommene mechanische Energie  $E_{\text{mech}}$  während eines Zyklus wird über die Integration der mechanischen Leistung berechnet, siehe (5.2). Um Rekuperationsphasen zu berücksichtigen, ist an dieser Stelle eine Fallunterscheidung nach (5.3) notwendig. In Phasen, in denen sich der Verbrennungsmotor im Schubbetrieb befindet, wird die mechanische Energie zu Null gesetzt.

$$E_{\text{mech}} = \int_{t=0}^{T_{\text{Zyklus}}} P_{\text{mech}}(t) \cdot dt \quad (5.2)$$

$$P_{\text{mech}}(t) = \begin{cases} 2\pi \cdot M_{\text{Gen}} \cdot n_{\text{Gen}} & \text{für } M_A > 0 \\ 0 & \text{für } M_A \leq 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Prinzipiell wird vom strategischen Management des Energiebordnetzes angestrebt, am Ende eines Zyklus denselben Ladezustand der Batterie wie beim Start zu erreichen. Geringe Abweichungen sind jedoch unvermeidbar und können über die Integration der Batterieleistung über der Zeit nach (5.4) mitbilanziert werden.

$$E_{\text{Batt}} = \int_{t=0}^{T_{\text{Zyklus}}} P_{\text{Batt}}(t) \cdot dt \quad (5.4)$$

Somit ergibt sich der gesamte Nutzungsgrad  $\zeta$  über einen Zyklus nach (5.5).

$$\zeta = \frac{E_{\text{wirk}}}{E_{\text{mech}} + E_{\text{Batt}}} \quad (5.5)$$

### Batterielastung

Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, ist die Modellierung der Alterung von Blei-Säure-Batterien nach wie vor Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Die dafür eingesetzten Simulationsmodelle benötigen oft detailliertes Wissen über den mechanischen Aufbau und elektrochemische Details. In dieser Arbeit wird hingegen nur ein sehr vereinfachtes Alterungsmodell für die Batterielastung  $B$  nach (5.6) verwendet. Dieses beschränkt sich auf das arithmetische Mittel des quadrierten Batteriestroms, welcher mit Hilfe der *C-Rate*<sup>2</sup> normiert wurde. Durch die Quadrierung der C-Rate wird der gesamte Ladungsdurchsatz erfasst und höhere Ströme, welche auch für den Wärmeeintrag in die Batterie verantwortlich sind, werden wesentlich stärker gewichtet als geringe Lade- bzw. Entladeraten.

$$B = \frac{1}{T_{\text{Zyklus}}} \int_{t=0}^{T_{\text{Zyklus}}} \left( \frac{I_{\text{Batt}}(t)}{C_{\text{N}}} \right)^2 \cdot dt \quad (5.6)$$

### Spannungsstabilität

Im Gegensatz zu den Optimierungskriterien des Nutzungsgrades und der Batterielastung ist der Begriff der Spannungsstabilität schwerer greifbar, da viele Systeme untereinander wechselwirken. In diversen Vorarbeiten im Bereich spannungsstabilisierender Maßnahmen wurden bereits Definitionen des Stabilitätsbegriffs mit entsprechenden Bewertungsalgorithmen entwickelt.

In [55] wird das Zusammenspiel zwischen einzelnen Hochlastverbrauchern und der Bordnetzatterie betrachtet. Unter Einbeziehung der maximalen Stromdynamik des

---

<sup>2</sup>Als *C-Rate* wird der Quotient aus Nennkapazität (angegeben in Amperestunden) und einer Stunde bezeichnet. Der Wert dient zur Normierung von Lade- und Entladestrom und erleichtert die Vergleichbarkeit von Zellen unterschiedlicher Kapazität [65].

Generators wird eine Ladungsmenge berechnet, die ein Hochleistungsverbraucher kurzfristig benötigt. Diese Ladungsmenge und der auftretende maximale Strom werden in ein Strom-Ladungs-Diagramm übertragen. In Kombination mit der I-Q-Batteriekennlinie kann eine Aussage getroffen werden, ob der Hochleistungsverbraucher einen unzulässig hohen Spannungseinbruch verursachen würde. Diese Methode berücksichtigt jedoch keine Überlagerungen mehrerer Hochleistungsverbraucher und bezieht keine Reserven in den Verbrauchern oder in anderen Komponenten mit ein.

Eine weitere verwendete Bewertungsmethode ist die Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Bordnetzspannung. Diese wird in [106] an einem zentralen Punkt im Bordnetz ermittelt. In [74] hingegen wird dieser Wert für jede Bordnetzkomponente ermittelt. Aus der Häufigkeitsverteilung werden unter Verwendung der Mindestspannung und der Nennspannung des Bordnetzes die beiden Indikatoren Stabilitätsgrad und Stabilitätsreserve ermittelt. Diese Methode eignet sich zur Bewertung der Wirksamkeit spannungsstabilisierender Maßnahmen bzw. auch zur Bewertung einer korrekten Auslegung des gesamten Bordnetzes. Zur Bewertung eines gesamten Energieversorgungssystems unter Berücksichtigung aller Risiken und Reserven der Bordnetzkomponenten, ist dieser Ansatz jedoch nicht ausreichend.

In [119] wurde gezeigt, dass Leistungsreserven in schnell degradierbaren Verbrauchern einen wesentlichen Beitrag zur Spannungsstabilisierung leisten können. Zudem wurden in [74] und [119] aktive Stabilisierungsmaßnahmen entwickelt, welche in zukünftige Energiebordnetz integriert werden könnten. Aus diesen Gründen soll für die Bewertung der Spannungsstabilität im Weiteren folgende Definition gelten:

**Spannungsstabilität.** *„Ein Bordnetz ist dann spannungsstabil, wenn die Spannung in den Hauptversorgungspfaden zu jeder Zeit in einem definierten Bereich liegt und die Bordnetzkomponenten genügend Leistungsreserven bereitstellen, um die gesamte Risikoleistung zu kompensieren.“*

Die Beschränkung auf die Hauptversorgungspfade<sup>3</sup> ist legitim, da lokale Spannungsunterschreitungen keinen Einfluss auf das Management des Gesamtbordnetzes haben sollten. Unterschreitet die Klemmenspannung einer Bordnetzkomponente die eigene zulässige Mindestspannung, ist jedoch die Spannung am nächsten Stromverteiler im definierten Bereich, deutet dies eher auf eine falsch dimensionierte Zu- oder Rückleitung oder einen Fehlerfall hin. Derartige lokale Probleme sind durch eine geeignete Dimensionierung bzw. anderweitige spannungsstabilisierende Maßnahmen zu beheben [33, 119]. Ein spannungstabiles Bordnetz zeichnet sich dadurch aus, dass es zu jeder Zeit in einem definierten<sup>4</sup> Spannungsbereich bleibt.

---

<sup>3</sup>In dieser Arbeit wird dafür stellvertretend die Klemmenspannung der Bordnetzatterie herangezogen. In weiterführenden Arbeiten sollte die Bewertung der Risiken und Reserven in jedem Stromverteiler getroffen werden.

<sup>4</sup>Im Rahmen dieser Arbeit wird nur die untere Schwelle betrachtet. Eine Überschreitung der oberen Schwelle ist nur durch einen erheblichen Lastabwurf (engl. *Load Dump*) in Kombination mit dem induktiven Verhalten des Generators möglich. Derartige Betrachtungen sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.



Wie in Kapitel 3 beschrieben, verfügen die einzelnen Bordnetzkomponenten über genau definierte Schnittstellen zum Energie- und Leistungsmanagement. Über diese Schnittstelle melden die Komponenten die eigenen Leistungsreserven sowie die potentielle Risikoleistung für die nächste Sekunde in einem Zeitraster von 1 ms, 10 ms, 100 ms und 1 s.

Die Risikoleistung stammt in der derzeitigen Implementierung ausschließlich von Hochleistungsverbrauchern aus dem Fahrwerksbereich. Sie wird für eine Fahrzeugkonfiguration als konstanter Wert angenommen, da diese Risikoleistung jederzeit abgerufen werden kann und das System auch ohne Prädiktion als rein reaktives System stabil bleiben muss.

Die Reserveleistung wird von Generator, Batterie und bestimmten Verbrauchern bereitgestellt. Die Bereitstellung an sich erfolgt dabei, im Sinne des kybernetischen Ansatzes, autonom. Das heißt, es muss keinerlei Steuerbefehl vom übergeordneten Energiemanagement erfolgen. Als passives System folgt das Verhalten der Batterie den Spannungsverhältnissen im Bordnetz. Der Generator reagiert auf Änderungen seiner Klemmenspannung. Die Reserveleistung der Verbraucher setzt sich aus den Leistungen derjenigen Verbraucher zusammen, die über autonome Abschaltmechanismen nach [119] verfügen.

Mit dem Wissen über die Reserveleistung und die Risikoleistung der einzelnen Komponenten kann über eine Bilanzierung nach (5.7) eine gute Aussage darüber getroffen werden, ob für die einzelnen Zeithorizonte genügend Reserveleistung im System vorhanden ist, um die aktuelle Risikoleistung zu kompensieren. Der Rückschluss von einer Leistungsbilanz auf das Erreichen einer unteren Spannungsgrenze erfolgt dabei über die in 3.4.3 dargestellte Berechnung der Reserveleistung der Bordnetzatterie<sup>5</sup>.

$$\Delta \vec{P}_{\text{Reserve}} = \vec{P}_{\text{Res,V}} + \vec{P}_{\text{Res,G}} + \vec{P}_{\text{Res,B}} - \vec{P}_{\text{Risk,V}} \quad (5.7)$$

Diese Leistungsdifferenz könnte in dieser Form schon zur Optimierung herangezogen und maximiert werden. Dadurch würden jedoch Vorzeichenwechsel in der Leistungsdifferenz unberücksichtigt bleiben. Sehr hohe Vorhalte an Reserveleistung würden als unverhältnismäßig gut bewertet werden, obwohl diese keinen nennenswerten Vorteil bieten. Daher bietet es sich an, den Wert  $\Delta P_{\text{Reserve}}$  mit einer Bewertungsfunktion nach (5.8) zu hinterlegen. Die Bewertungsfunktion gewichtet negative Leistungsdefizite mit dem Faktor 1000 stärker als positive Leistungsüberschüsse und stoppt die Honorierung von Leistungsüberschüssen größer 1000 W.

$$f(\Delta P_{\text{Reserve}}) = \begin{cases} -1 \frac{1}{\text{W}} \cdot \Delta P_{\text{Reserve}} + 1 & \text{für } \Delta P_{\text{Reserve}} \leq 0 \\ -0,001 \frac{1}{\text{W}} \cdot \Delta P_{\text{Reserve}} + 1 & \text{für } 0 < \Delta P_{\text{Reserve}} \leq 1000 \text{ W} \\ 0 & \text{für } \Delta P_{\text{Reserve}} > 1000 \text{ W} \end{cases} \quad (5.8)$$

---

<sup>5</sup>Für ein Bordnetz mit mehreren passiven Energiespeichern wäre eine weitergehende Betrachtung unter Berücksichtigung der Leistungsaufteilung zwischen den einzelnen Speichern notwendig.

Das Optimierungskriterium zur Spannungsstabilität im gesamten Bordnetz wird im Folgenden als Stabilitätsrisiko  $S$  bezeichnet und ergibt sich aus der Summe der arithmetischen Mittel der Bewertungsfunktion nach (5.9). Somit ist dieser Wert von der Optimierung zu minimieren.

$$S = \sum_{i=1}^{ms, \dots, 1s} \left[ \frac{1}{T_{\text{Zyklus}}} \int_{t=0}^{T_{\text{Zyklus}}} f(\Delta P_{\text{Reserve},i}) \cdot dt \right] \quad (5.9)$$

### 5.1.2 Zielfunktion und Kopplung an den Optimierungsalgorithmus

Bei der Zielfunktion in dieser Arbeit handelt es sich um keine klassische mathematische Funktion. Vielmehr beinhaltet die Zielfunktion das Ausführen der in Kapitel 3 beschriebenen Bordnetzsimulation. Dieses wird anschließend mit den im vorangegangenen Abschnitt definierten Zielkriterien bewertet. Abbildung 5.1 zeigt ein Flussdiagramm der Zielfunktion sowie deren Anbindung an den in *MATLAB* implementierten Optimierungsalgorithmus. Die Zielfunktion kann mehrfach parallel ausgeführt werden. Somit können die Vorteile von Mehrkernprozessoren und moderne heuristische Optimierungsalgorithmen voll ausgeschöpft werden.

Die Zielfunktion erhält ihre Parameter vom Optimierungsalgorithmus. Als erster Schritt werden die ausführbare Simulationsdatei, die Eingabedatei, welche den Zyklus enthält, und die Parameterdatei in ein separates Verzeichnis kopiert, um eine parallele Ausführung mehrerer Simulationen zu ermöglichen. Anschließend wird die Parameterdatei mit den neuen Parametern konfiguriert und die Simulation durch Aufruf der Simulationsdatei durchgeführt. Nach erfolgreich durchgeführter Simulation werden aus dem Simulationsergebnis die gewünschten Kriterien berechnet und extrahiert, die restlichen Simulationsdaten werden im Anschluss verworfen. Dies hat den Vorteil, dass die rechenintensive Bewertung der Simulationsergebnisse zusammen mit der Ausführung der Simulation parallelisiert werden kann. Zudem beschränkt sich der Datenaustausch zwischen Optimierer und Zielfunktion somit auf einige wenige Werte.

## 5.2 Auswahl der Optimierungsalgorithmen

Bei der beschriebenen Problemstellung handelt es sich um eine simulationsbasierte Optimierung, bei der das Systemverhalten maßgeblich durch das zu optimierende Energiemanagementsystem, also durch Software, bestimmt ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Problem weder stetig noch differenzierbar ist. Aus diesem Grund können weder gradientenbasierte noch geometriebasierte Lösungsverfahren eingesetzt werden.

Für derartige Problemstellungen eignen sich vor allem metaheuristische Suchverfahren [7, 52, 67, 139, 143]. Zwar gibt es keine Garantie, dass diese Verfahren das globale

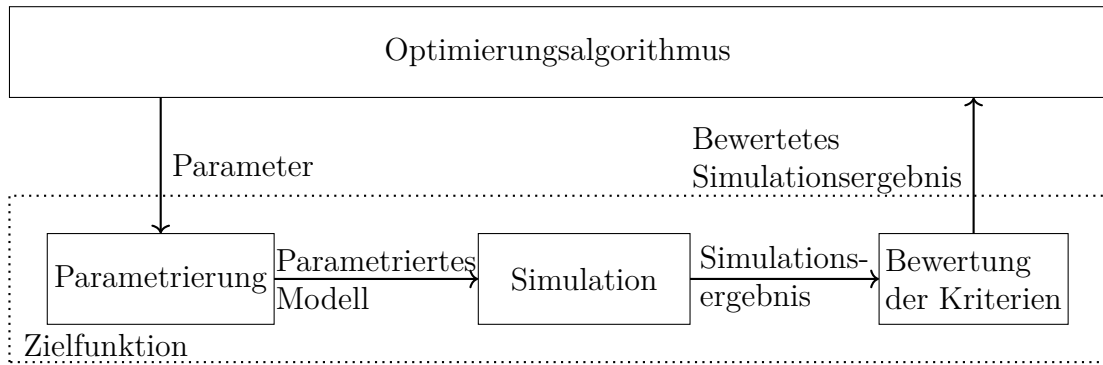


Abbildung 5.1: Flussdiagramm der Zielfunktion. Die Optimierung ist in *MATLAB* implementiert, die Zielfunktion selbst kann mehrfach parallel ausgeführt werden.

Optimum finden, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit hoch, genügend sehr gute Lösung zu finden. Für die Algorithmen wurde auf die freie Implementierung aus [99] zurückgegriffen und diese entsprechend erweitert.

Folgende Optimierungsalgorithmen wurden verwendet:

- *Partikelschwärme*: Partikelschwarmalgorithmen imitieren das Schwarmverhalten von Lebewesen wie z.B. von Fischen oder Vögeln. Die einzelnen Partikel bewegen sich dabei mit einer gewissen Geschwindigkeit und Richtung durch den mehrdimensionalen Parameterraum auf der Suche nach dem Optimum der Zielfunktion. Geschwindigkeit und Richtung werden dabei neben der Massenträgheit durch den eigenen Bestwert des Partikels, den Bestwert des Schwarms, Interaktion mit Nachbarpartikeln und durch zufällige Veränderungen bestimmt. [67, 139]
- *Simulierte Abkühlung*: Diese Optimierungsmethode beruht auf dem Abkühlprozess von Werkstoffen. Bei einem langsameren Abkühlen eines Werkstoffes ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass regelmäßige Strukturen auf einem energetisch niedrigeren Niveau entstehen. Während der Optimierung steht die simulierte Temperatur stellvertretend für die Wahrscheinlichkeit, dass der Algorithmus sich auch in Richtung schlechterer Lösungen bewegt. Diese Wahrscheinlichkeit wird durch den Abkühlungsplan definiert, der mit fortschreitender Simulation die Temperatur verringert. Somit bewegt sich der Algorithmus zu Beginn der Optimierung im gesamten Parameterraum ohne in lokalen Minima zu verweilen. Mit weiter absinkender Temperatur nähert sich der Algorithmus seinem zuvor gefundenen Bestpunkt. [139]
- *Genetischer Algorithmus*: Genetische Algorithmen gehören zur Gruppe der evolutionären Algorithmen. Angelehnt sind sie an die genetische Evolution. Sie basieren auf den drei grundlegenden Wirkmechanismen Rekombination, Mutation und Selektion. Bei der Rekombination werden die Eigenschaften aus zwei oder mehreren Elternindividuen kombiniert. Daraus werden ein oder mehrere Kindindividuen mit zufällig gemischten Eigenschaften der Eltern generiert. Durch die Mutation kommt

ein gewisser Zufallsfaktor in das Erbgut, um den kompletten Parameterraum abzutasten. Durch die Selektion werden schlechte Individuen eliminiert, so dass sie ihre Eigenschaften nicht weitervererben können. [139]

- *Differentialevolution*: Bei der Differentialevolution handelt es sich auch um einen evolutionären Algorithmus. Im Gegensatz zum genetischen Algorithmus werden die Kinderindividuen hier nicht durch eine Rekombination aus einigen wenigen Individuen generiert. Stattdessen wird aus den Differenzen zwischen den Individuenpaaren einer Population ein Modifikator gebildet, der zur Rekombination mit einem Individuum genutzt wird. Dieses neue Kindindividuum muss sich im Anschluss dem direkten Vergleich mit seinem Elternindividuum stellen. Das Schlechtere der beiden Individuen wird ausselektiert. [139]

In dieser Arbeit werden die vier genannten metaheuristischen Verfahren parallel eingesetzt, um die Robustheit gegen lokale Minima oder schlecht initialisierte Algorithmen zu steigern. Nach Abschluss der Optimierung werden die vier einzelnen Pareto-mengen zu einer Gesamtmenge zusammengefügt. Aus dieser wiederum werden diejenigen Punkte, welche von anderen Punkten dominiert werden, entfernt. Somit sind nur noch die paretooptimalen Punkte Bestandteil der Menge und bilden gemeinsam eine neue Paretofront.

Abbildung 5.2 zeigt das Ergebnis einer so durchgeführten, multikriteriellen Optimierung einer Bordnetzsimulation. Es ist gut zu erkennen, dass jedes der vier Optimierungsverfahren Ergebnisse zu der neu gebildeten Paretofront beiträgt. In diesem Beispiel wurden von der *Simulierten Abkühlung* 137, von der *Differentialevolution* 74, vom *Partikelschwarm* 45 und vom *genetischen Algorithmus* 35 Lösungen gefunden.

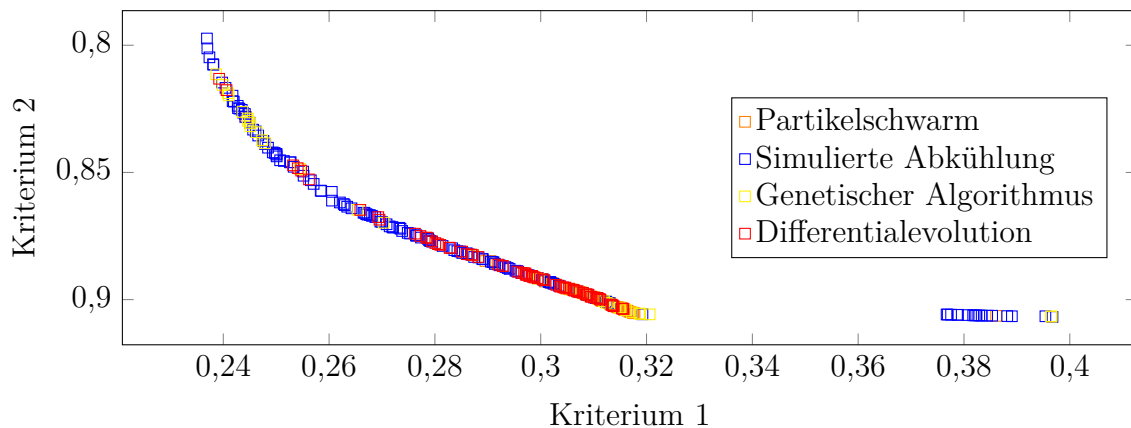


Abbildung 5.2: Paralleler Einsatz mehrerer Optimierungsverfahren: Nachdem jeder Optimierungsalgorithmus selbstständig konvergiert ist, wird aus den einzelnen Pareto-mengen eine gemeinsame Paretofront ermittelt.

## 5.3 Drehzahlabhängige Betriebsstrategie

Im Folgenden wird die drehzahlabhängige Betriebsstrategie aus Abschnitt 3.7.3 optimiert und anschließend auf dem Bordnetzprüfstand validiert.

Als Zyklus dient der in Kapitel 3 vorgestellte *WLTC*-Zyklus mit den überlagerten Kundenfunktionen. Als Bordnetzbatteie wird eine 80 Ah-Blei-Säure-Batterie verwendet, welche mit einem Ladezustand von 85 % initialisiert wird.

### 5.3.1 Parameter

Die drehzahlabhängige Betriebsstrategie basiert auf der Anpassung des Batteriestroms an die aktuelle Motordrehzahl. So soll bei niedrigen Drehzahlen, in denen der Generator einen höheren Wirkungsgrad aufweist, die Erzeugung elektrischer Energie erhöht und die überschüssige Energie in der Batterie gespeichert werden. Bei höheren Drehzahlen hingegen soll das Bordnetz zumindest teilweise aus der Batterie versorgt werden.

Die Anpassung erfolgt über die in Abbildung 3.14 dargestellte, abschnittsweise beschriebene Funktion. Die Funktion lässt sich über die drei Parameter Eckdrehzahl  $n_{\text{Eck}}$ , Lade- bzw. Entladestrom  $I_{\text{RPM},1000}$  und  $I_{\text{RPM},6000}$  parametrieren. Zudem kann unabhängig von der gewählten Betriebsstrategie ein Batteriesollstrom  $I_{\text{rekup}}$  für diejenigen Phasen definiert werden, in denen sich das Fahrzeug im Schubbetrieb befindet, siehe Abbildung 3.13. Eine Auflistung der zur Optimierung freigegebenen Parameter und ihrer Wertebereiche findet sich in Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Übersicht über die zur Optimierung freigegebenen Parameter der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie und der zugelassenen Wertebereiche.

Parameter	Wertebereich	Beschreibung
$I_{\text{rekup}}$	0 A...150 A	Batteriesollstrom während Schubphasen
$n_{\text{Eck}}$	$1000 \frac{\text{U}}{\text{min}} \dots 4000 \frac{\text{U}}{\text{min}}$	Eckdrehzahl für Nullstromregelung
$I_{\text{RPM},1000}$	0 A...50 A	max. drehzahlabhängiger Ladestrom
$I_{\text{RPM},6000}$	0 A...−50 A	max. drehzahlabhängiger Entladestrom

Die Wertebereiche für die einzelnen Parameter wurden dabei basierend auf Vorerfahrung auf sinnvolle Wertebereiche begrenzt. Die Parameter für die erlaubten Ladezustände der Batterie wurden fest auf das Fenster zwischen 80 % und 90 % gelegt.

### 5.3.2 Optimierungsergebnisse

Als nächster Schritt wurde eine Optimierung der im vorangegangenen Abschnitt definierten betriebsstrategischen Parameter durchgeführt. Als Optimierungskriterien wurden zunächst nur der Nutzungsgrad und die Batteriebelastung gewählt.

Die vier parallel arbeitenden Optimierungsalgorithmen haben dabei die Zielfunktion, also die Ausführung der Bordnetzsimulation mit anschließender Bewertung des Simulationsergebnisses, insgesamt knapp 41000 Mal durchgeführt. Es wurde dafür ein leistungsstarker Rechner mit 48 Rechenkernen eingesetzt. Die gesamte Berechnungszeit lag bei ca. acht Stunden.

Der anschließende Abgleich der Einzelergebnisse der Optimierungsalgorithmen ergab 608 Punkte, die alle anderen Ergebnisse dominieren und somit die Paretomenge darstellen, welche in Abbildung 5.3 dargestellt ist.

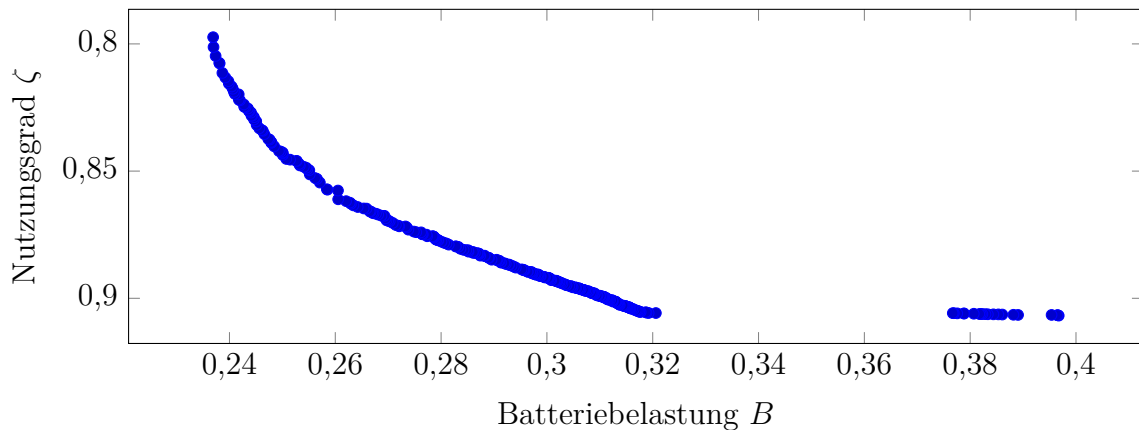


Abbildung 5.3: Paretofront der beiden Optimierungskriterien Batteriebelastung und Nutzungsgrad als Ergebnis der durchgeführten Optimierung der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie.

Wie zu erwarten zeigt sich, dass die beiden Optimierungskriterien Nutzungsgrad und Batteriebelastung gegensätzliche Ziele sind. Im mittleren Bereich der Paretofront besteht eine annähernd lineare Abhängigkeit zwischen beiden Größen. In den Randbereichen dagegen ist eine Art Sättigungseffekt zu erkennen, in denen keine wesentliche Verbesserung des einen Kriteriums auf Kosten des anderen Kriteriums mehr möglich ist. Die Kurve zeigt jedoch auch, dass durch geeignete Parametrierung der Betriebsstrategie das Systemverhalten maßgeblich zu beeinflussen ist.

Auffällig ist, dass die Paretofront in einem erheblichen Bereich unterbrochen ist. So wurden von drei der vier eingesetzten Optimierungsverfahren Punkte gefunden, welche einen um ca. ein Promille besseren Nutzungsgrad aufweisen, jedoch mit einer überproportional hohen Batteriebelastung erkaufte sind. Da diese Punkte technisch nicht sinnvoll erscheinen, wurden sie nicht weitergehend untersucht.

Abbildung 5.4 veranschaulicht die Abhängigkeiten der Optimierungskriterien von den optimierten Parametern. Am deutlichsten ist die Abhängigkeit der beiden Optimierungskriterien vom eingestellten Batteriesollstrom  $I_{\text{rekup}}$  während Schubphasen ersichtlich. Sowohl Nutzungsgrad als auch Batteriebelastung steigen mit zunehmenden Rekuperationsstrom an. Bei einem Strom von ca. 70 A nimmt dieser Effekt immer weiter ab. Diese Sättigung ist dadurch bedingt, dass der geforderte Batteriesollstrom dann nicht mehr vollständig erreicht werden kann. Dafür kommen im Wesentlichen zwei Gründe in Betracht. Entweder ist die Bordnetzlast so hoch, dass der Maximalstrom des Generators erreicht ist, bevor der gewünschte Ladestrom eingestellt werden kann. Oder der Ladezustand der Batterie ist so hoch, dass sie bei maximaler Ladespannung nicht den gewünschten Ladestrom aufnehmen kann.

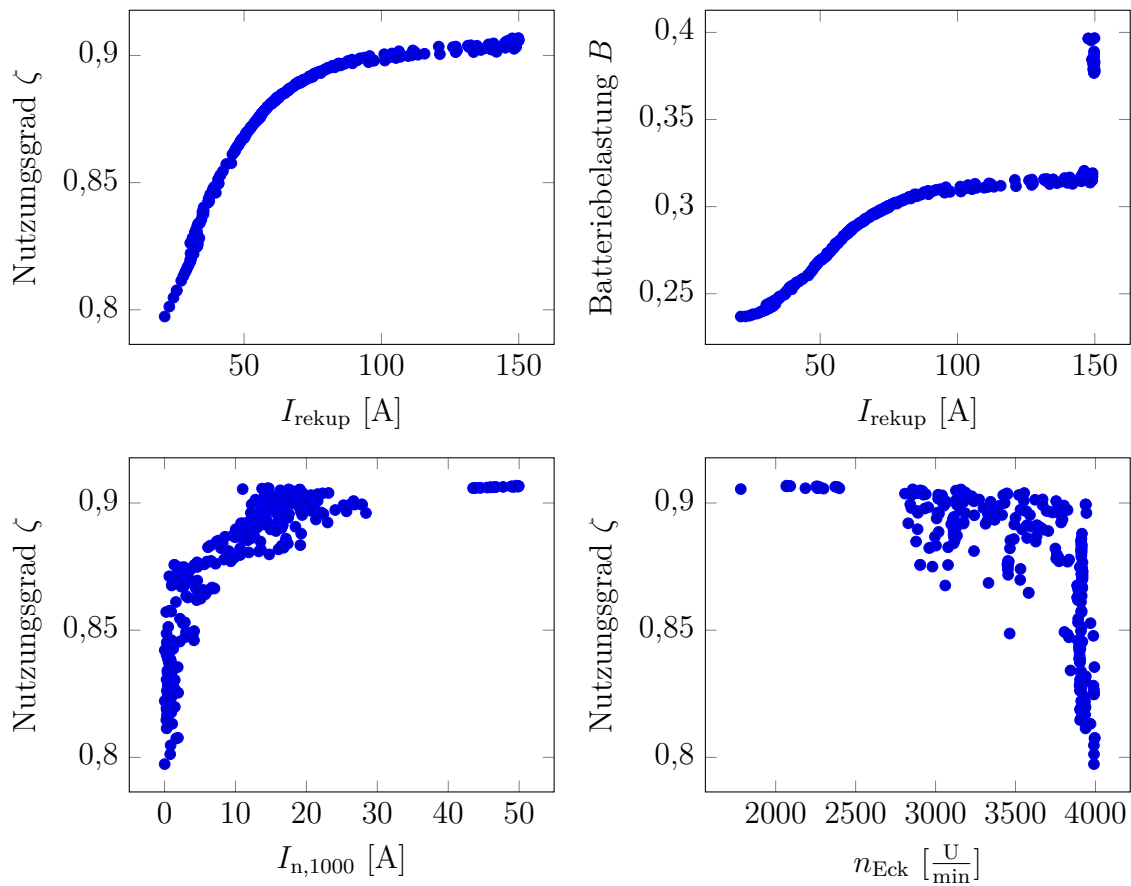


Abbildung 5.4: Abhängigkeiten der Optimierungskriterien Nutzungsgrad und Batteriebelastung von den gewählten Parametern der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie.

Bei dem maximalen Batterieladestrom  $I_{n,1000}$  für niedrige Drehzahlen ist die Abhängigkeit weniger deutlich ausgeprägt. Auch ohne aktive Batterieladung in Phasen mit hohem Wirkungsgrad des Generators kann der Nutzungsgrad zwischen ca. 80 % und 87 % variieren. Dieser Effekt wird dann alleine durch die Rekuperation in Schubphasen

verursacht. Es zeigt sich jedoch auch, dass für das Erreichen hoher Nutzungsgrade die aktive Batterieladung erforderlich ist.

Eine direkte Abhängigkeit des Nutzungsgrades von der Eckdrehzahl  $n_{\text{Eck}}$  ist nicht erkennbar. Jedoch ist eine Tendenz zu kleineren Drehzahlen für das Erreichen höherer Nutzungsgrade erkennbar. Dieser Parameter ist jedoch auch immer in der Kombination mit den beiden Strömen  $I_{\text{RPM},1000}$  und  $I_{\text{RPM},6000}$  zu betrachten, so dass eine direkte Abhängigkeit auch nicht zwingend gegeben sein muss.

### 5.3.3 Validierung ausgewählter Punkte

Als nächster Schritt wird eine Validierung der im vorangegangenen Abschnitt simulativ ermittelten Punkte durchgeführt. Dafür werden auf der Paretofront zwei Punkte ausgewählt. Der erste Punkt weist dabei einen relativ hohen Nutzungsgrad auf, dafür aber auch eine deutlich erhöhte Batteriebelastung. Der zweite Punkt steht für eine weniger aggressive Betriebsstrategie bei niedrigerem Nutzungsgrad und moderater Batteriebelastung. Tabelle 5.2 zeigt die verwendeten Parameter der Betriebsstrategie und die ermittelten Werte für Nutzungsgrad und Batteriebelastung.

Tabelle 5.2: Parameter der zwei zur Validierung der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie herangezogenen Punkte des Optimierungsergebnisses.

Parameter	Erster Punkt	Zweiter Punkt
$\zeta$	90 %	84 %
$B$	0,31	0,25
$I_{\text{rekup}}$	111 A	35 A
$n_{\text{Eck}}$	$3432 \frac{\text{U}}{\text{min}}$	$3900 \frac{\text{U}}{\text{min}}$
$I_{\text{RPM},1000}$	16,4 A	0,3 A
$I_{\text{RPM},6000}$	3 A	35,8 A

Die beiden ausgewählten Punkte wurden im Anschluss auf dem Bordnetzprüfstand validiert. Dazu wurde das entsprechend parametrisierte Energie- und Leistungsmanagement auf das Echtzeitsystem geladen und der Zyklus mit den überlagerten Kundenfunktionen, wie in Kapitel 4 beschrieben, durchlaufen. Anschließend wurden die Messdaten nach denselben Kriterien wie bei der Referenzsimulation bewertet.

Jeder der beiden Punkte wurden dazu mit drei unterschiedlichen Prüfstandskonfigurationen validiert. Zunächst wurde eine Messung mit dem realen Generator und einer emulierten Bordnetzatterie durchgeführt, dann eine Messung mit der echten Bordnetzatterie und einem emulierten Generator. Abschließend wurde die Messung mit echter Batterie und echtem Generator durchgeführt. Vor jeder Messung wurde die Batterie auf einen Ladezustand von 85 % gebracht und der Generator mit halber Nennlast betrieben bis keine wesentlichen Temperaturänderungen mehr zu verzeichnen waren.



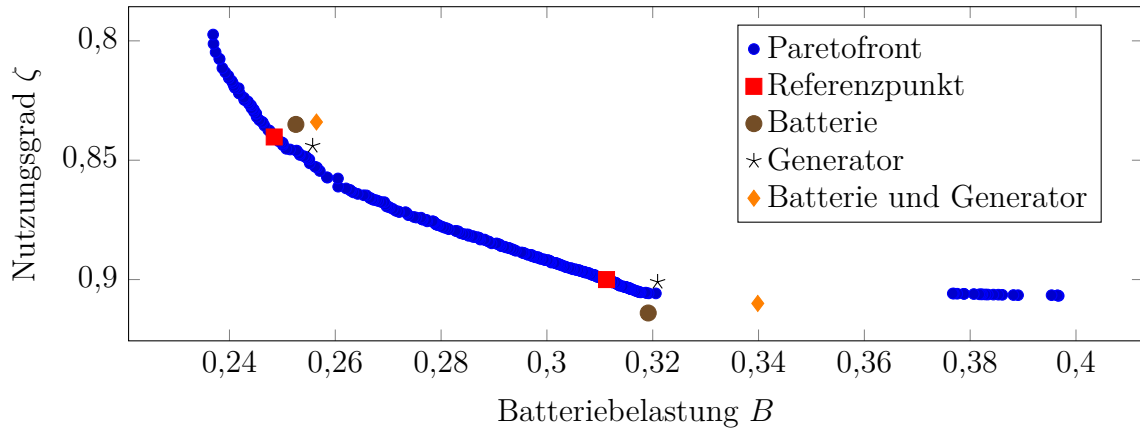


Abbildung 5.5: Paretofront der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie inkl. der validierten Punkte mit verschiedenen Kombinationen an realen Komponenten.

Das Ergebnis der Messreihe ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Es kann gezeigt werden, dass die simulativ ermittelten Werte für Nutzungsgrad und Batteriebelastung auch auf dem Prüfstand unter dem Einsatz mehrerer realer Komponenten nachvollzogen werden können. Die Abweichung des Nutzungsgrades beträgt ca. 1,5 %. Die Abweichungen der Batteriebelastung sind etwas höher und liegen im Maximum bei etwa 3,5 %.

Die Abweichungen zwischen Simulation und Bordnetzprüfstand können vielfältige Ursachen haben. Den größten Anteil an diesen Abweichungen hat höchstwahrscheinlich der Unterschied zwischen Simulationsmodell und echter Komponente, welcher auf vereinfachte Annahmen bei der Modellierung zurückzuführen ist. Zudem weisen die Simulationsmodelle von Generator und Batterie keine Temperaturabhängigkeiten auf. Die Messungen zur Parametrierung der Modelle wurden für die Batterien bei Raumtemperatur und für den Generator im thermischen Beharrungszustand bei halber Nennlast durchgeführt. Während eines Zyklus von 30 Minuten waren jedoch deutliche Schwankungen der Generatortemperatur und auch eine Erwärmung der Bordnetzbatterie zu verzeichnen.

Zugleich sind die Abweichungen zwischen der Bordnetzsimulation und der Messung auf dem Bordnetzprüfstand ein starkes Argument für die Notwendigkeit eines prüfstandsgestützten Entwicklungsprozesses für das Management elektrischer Energiebordnetze.

Abbildung 5.6 zeigt die Spannungs- und Stromverläufe von Generator und Batterie, den Verlauf des Ladezustands der Batterie für Einzelmessungen des zweiten Validierungspunkts und den Referenzverlauf aus der Simulation.

## 5 Optimierung und Validierung der betriebsstrategischen Parameter

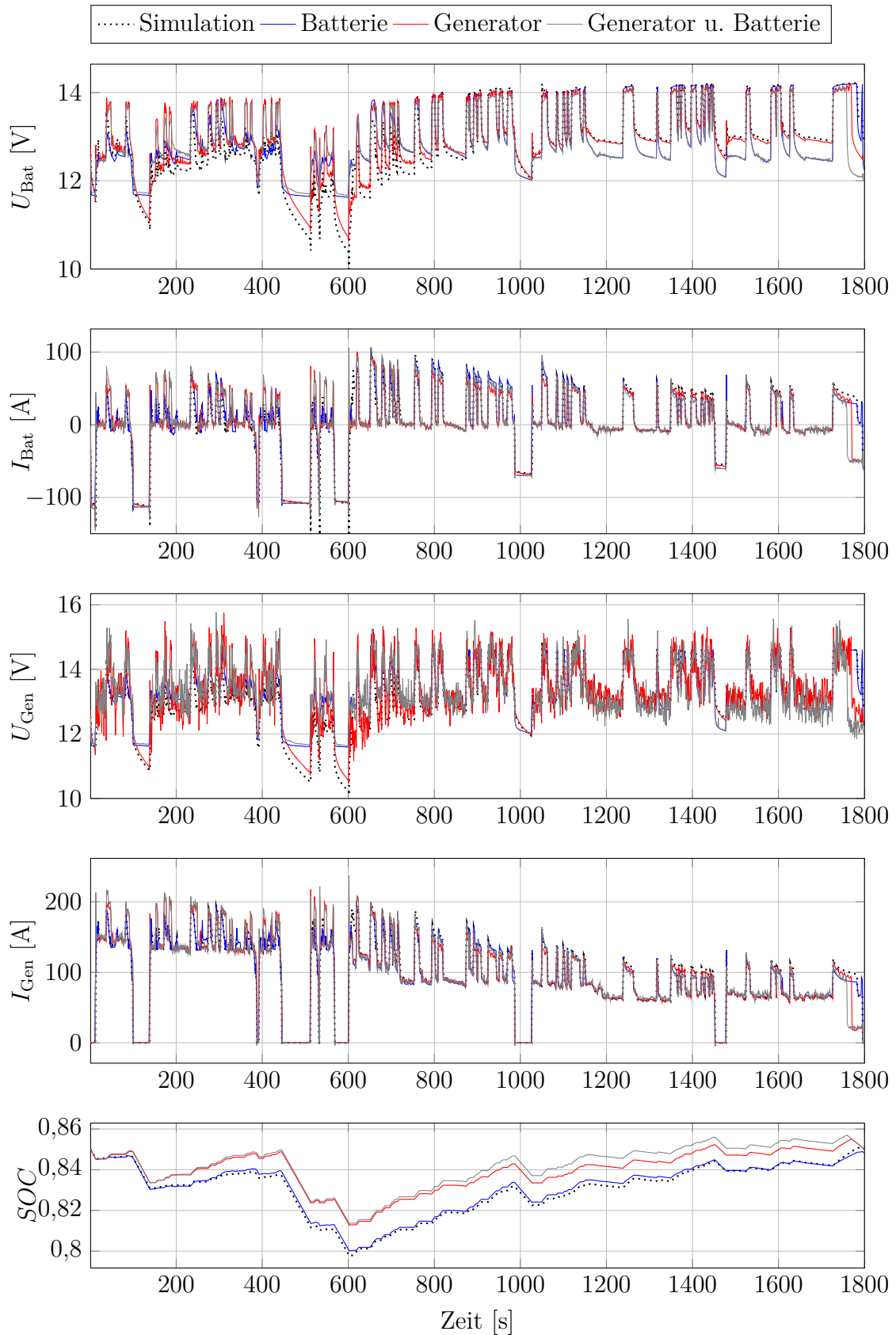


Abbildung 5.6: Verläufe wichtiger Größen von Generator und Batterie während der Validierung der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie.

Der prinzipielle Verlauf ist für alle Messungen ähnlich, jedoch fallen bei genauerer Betrachtung einige Unterschiede auf. Die Klemmenspannung der Batterie weicht bei den einzelnen Messungen teilweise um mehrere 100 mV voneinander ab. Besonders deutlich ist dies erkennbar während den Rekuperationsphasen und in den Phasen während des Motorstillstands, welche durch den Start-Stopp-Betrieb sind. Die Generatorspannung ist durch die Messung direkt an den Generatorklemmen sehr verrauscht und daher nur bedingt vergleichbar. Während des Motorstillstands entspricht die Generatorspannung der Batteriespannung.

Zudem ist eine Abweichung des Generator- bzw. des Batteriestroms während der Rekuperationsphasen erkennbar. Abbildung 5.7 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt für den Zeitbereich von 150 s bis 380 s. Der Generatorstrom des echten Generators ist in Rekuperationsphasen mit niedriger Drehzahl wesentlich höher als der simulierte oder der emulierte Generatorstrom. Dieser Effekt ist auf die im Simulationsmodell hinterlegte, drehzahlabhängige Begrenzung des Generatorausgangsstroms zurückzuführen. Als Datenbasis für diese Strombegrenzung wurden die vom Hersteller genannten Werte verwendet. Es zeigt sich jedoch, dass der Generator durchaus in der Lage ist, auch bei niedrigeren Drehzahlen sehr hohe Ströme zu liefern.

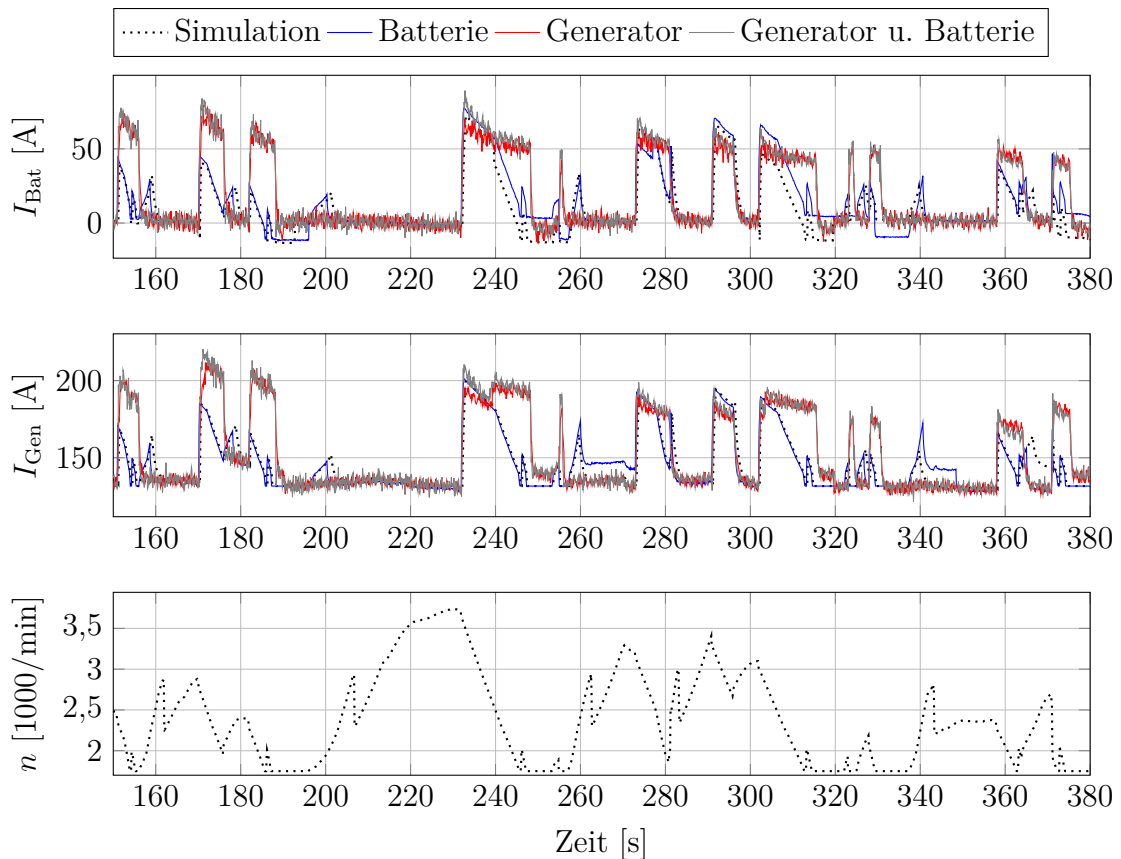


Abbildung 5.7: Vergleich der Generator- und Batterieströme während einer Phase mit relativ niedrigen Motordrehzahlen.

## 5.4 Prädiktive Betriebsstrategie

In diesem Abschnitt wird die prädiktive Betriebsstrategie aus Abschnitt 3.7.3 optimiert und anschließend auf dem Bordnetzprüfstand validiert. Die Vorgehensweise ist dabei prinzipiell identisch zur Validierung der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie. Lediglich die Bordnetzatterie wurde durch die 44 Ah Lithium-Eisenphosphat-Batterie aus Abschnitt 3.4.2 ersetzt, da für diese Betriebsstrategie ein Energiespeicher mit einer höheren Ladeakzeptanz vorteilhaft ist.

Da keine entsprechende Lithium-Eisenphosphat-Batterie zur Verfügung stand, wird in diesem Fall die Validierung immer mit einer emulierten Batterie durchgeführt. Zugleich kann somit der Vorteil einer prüfstandsgetriebenen Entwicklung demonstriert werden, da Systeme, welche lediglich als Simulationsmodell vorhanden sind, trotzdem im Verbund mit dem restlichen Energiebordnetz getestet werden können.

### 5.4.1 Parameter

Der Grundgedanke der prädiktiven Betriebsstrategie nach [114] basiert auf einer initialen Entladung der Bordnetzatterie. Dies schafft zum einen freie Speicherkapazitäten in der Batterie für nachfolgende Rekuperationsphasen und zugleich wird die Ladeakzeptanz der Batterie durch einen niedrigeren Ladezustand gesteigert. Der qualitative Verlauf des Ladezustands ist in Abbildung 3.16 dargestellt.

Für die in dieser Arbeit verwendete Implementierung kann die Betriebsstrategie über drei Parameter in ihrem Verhalten angepasst werden, welche in Tabelle 5.3 dargestellt sind. Der Batteriesollstrom  $I_{\text{rekup}}$  während der Schubphasen hat dieselbe Funktionalität wie schon in der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie. Über den Parameter  $I_{\text{entlade,init}}$  kann der maximale Entladestrom während der initialen Entladephase festgelegt werden. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass der maximal mögliche Entladestrom natürlich immer durch die Bordnetzlast bestimmt wird. Zudem kann über  $SOC_{\text{min}}$  ein Wert für den Ladezustand definiert werden, an welchem die Initialentladung für abgeschlossen erklärt wird und die Betriebsstrategie in den Nullstrom / Rekuperationsbetrieb wechselt.

Tabelle 5.3: Übersicht über die zur Optimierung freigegebenen Parameter der prädiktiven Betriebsstrategie und der zugelassenen Wertebereiche.

Parameter	Wertebereich	Beschreibung
$I_{\text{rekup}}$	0 A...200 A	Batteriesollstrom während Schubphasen
$I_{\text{entlade,init}}$	0 A...100 A	Entladestrom während Entladephase am Anfang des Zyklus
$SOC_{\text{min}}$	50 %...70 %	$SOC$ -Wert, bei welchem die Entladephase am Anfang des Zyklus beendet wird

### 5.4.2 Optimierungsergebnisse

Bei der Optimierung der betriebsstrategischen Parameter wurde in diesem Fall auch das Stabilitätsrisiko  $S$  mit einbezogen. Wird ein Optimierungsproblem nach drei Kriterien optimiert, liegt die Paretofront in Form einer Linie oder Fläche im dreidimensionalen Raum vor. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Kriterien daher immer paarweise gegeneinander angetragen, wie in Abbildung 5.8 dargestellt.

Das Verhältnis von Nutzungsgrad zu Batteriebelastung ergibt ein ähnliches Bild wie auch schon bei der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie, mit dem Unterschied, dass der Nutzungsgrad auf einem höheren Niveau startet. Dies ist vor allem durch die höhere Aufnahmefähigkeit der Rekuperationsenergie durch die Lithium-Eisenphosphat-Batterie bedingt. Zudem ist erkennbar, dass hohe Nutzungsgrade mit einem erhöhten Stabilitätsrisiko einhergehen. Dies ist damit erklärbar, dass ein hoher Nutzungsgrad eine höhere Initialentladung bedingt. Durch die damit verbundene niedrigere Spannungslage sinkt auch die Reserveleistung der Bordnetzatterie.

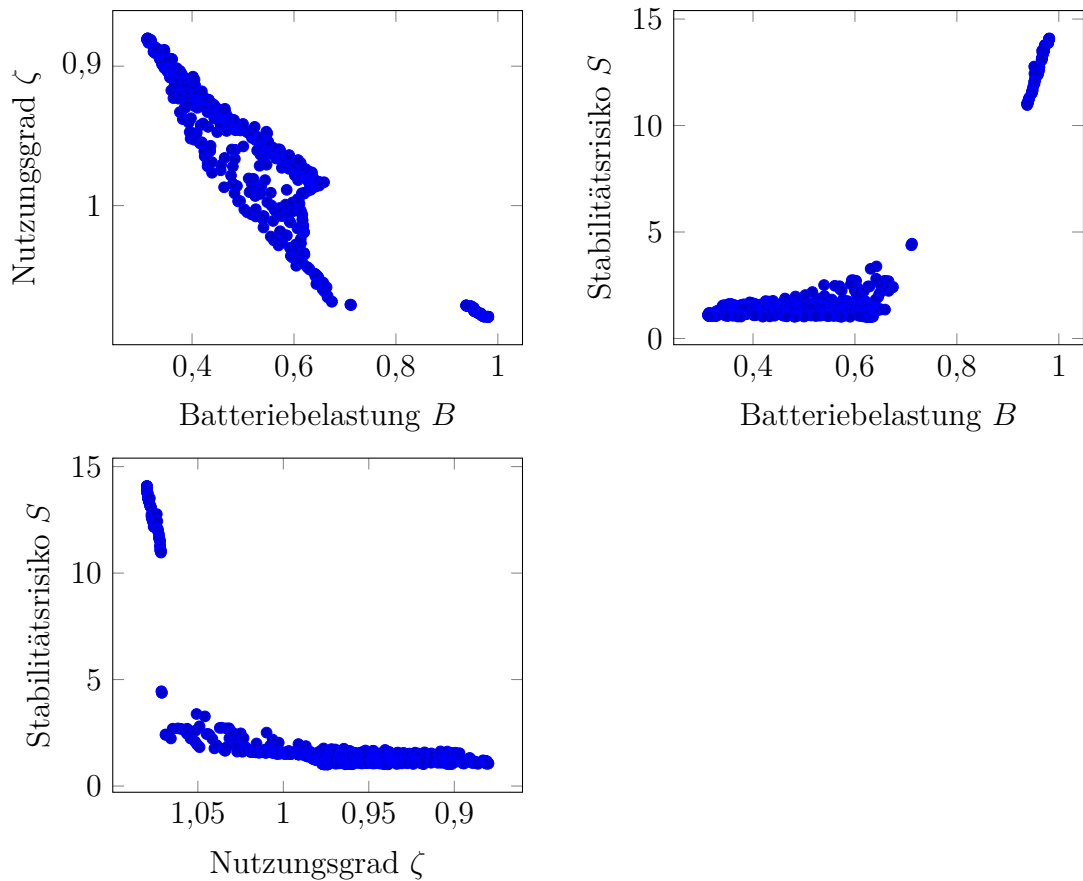


Abbildung 5.8: Paretofront der drei Optimierungskriterien Batteriebelastung, Nutzungsgrad und Stabilitätsrisiko als Ergebnis der durchgeführten Optimierung der prädiktiven Betriebsstrategie.

Abbildung 5.9 stellt die Abhängigkeiten der Optimierungskriterien von den gewählten Parametern der Betriebsstrategie dar. Wie auch schon bei der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie wird der erreichbare Nutzungsgrad direkt vom eingestellten Batteriesollstrom  $I_{\text{rekup}}$  während der Schubphasen beeinflusst. Auch die Batteriebelastung steht mit diesem Strom in einem direkten Zusammenhang, wurde in der Abbildung aber nicht separat aufgeführt.

Zudem ist eine direkte Abhängigkeit des Nutzungsgrads von der eingestellten unteren Grenze des Ladezustands  $SOC_{\text{min}}$  erkennbar. Je niedriger der Wert für  $SOC_{\text{min}}$  angesetzt wird, desto mehr Energie kann auch während des restlichen Zyklus in die Batterie zurückgespeichert werden.

Eine direkte Abhängigkeit zwischen  $SOC_{\text{min}}$  und der Batteriebelastung konnte jedoch nicht festgestellt werden. Die Batteriebelastung wird maßgeblich vom maximal zulässigen Rekuperationsstrom beeinflusst.

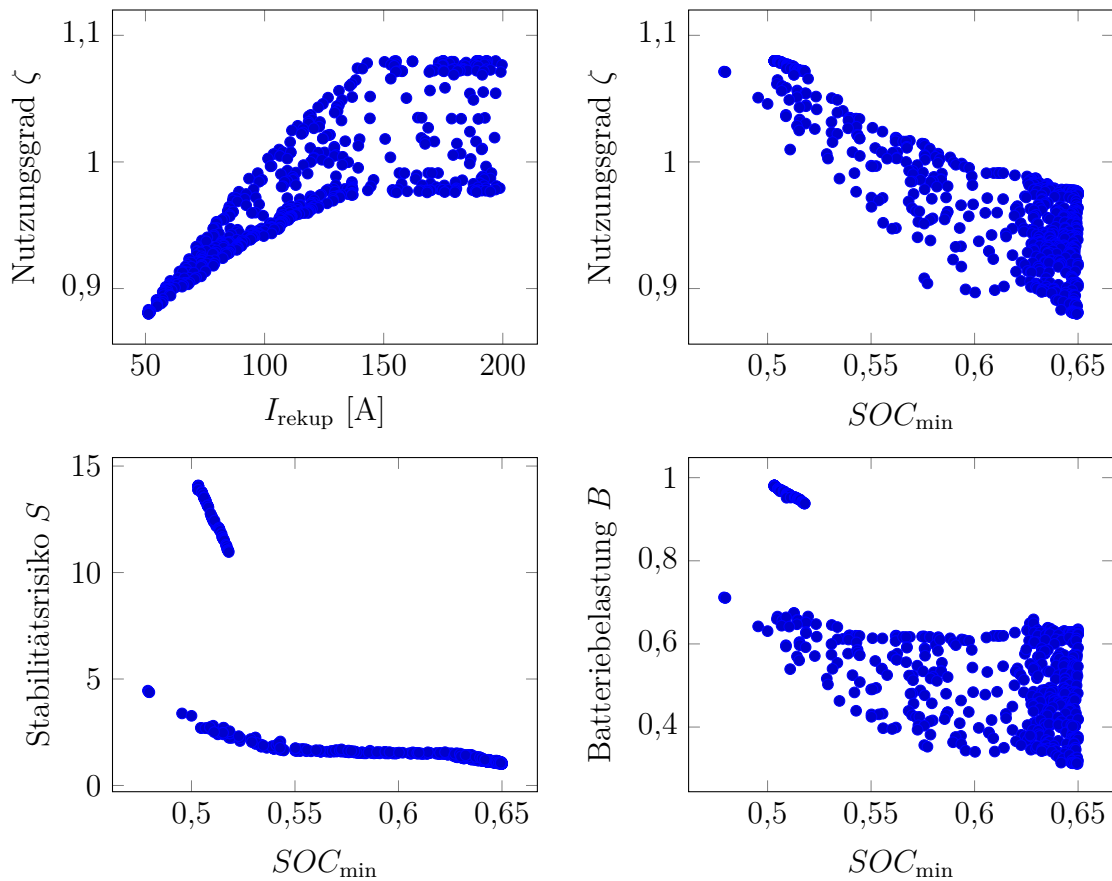


Abbildung 5.9: Abhängigkeiten der Optimierungskriterien Nutzungsgrad, Batteriebelastung und Stabilitätsrisiko von den gewählten Parametern der prädiktiven Betriebsstrategie.

### 5.4.3 Validierung ausgewählter Punkte

Die simulativ ermittelten Ergebnisse sollen nun wiederum validiert werden. Da in diesem Fall eine Lithium-Eisenphosphat-Batterie verwendet wurde und diese nicht als reale Komponente zur Verfügung stand, kann die Validierung der Ergebnisse nur in der Konfiguration mit dem realen Generator und der Batterieemulation durchgeführt werden.

Für die Validierung wurden drei Punkte aus der Ergebnismenge mit den Nutzungsgraden 90 %, 97 %, 105 % ausgewählt. Die Parameter und die Werte der Optimierungskriterien sind in Tabelle 5.4 aufgeführt.

Tabelle 5.4: Parameter der drei zur Validierung der prädiktiven Betriebsstrategie herangezogenen Punkte des Optimierungsergebnisses.

Parameter	Erster Punkt	Zweiter Punkt	Dritter Punkt
$\zeta$	105 %	97 %	90 %
$B$	0,65	0,58	0,36
$S$	1,95	1,35	1,11
$I_{\text{rekup}}$	160 A	120 A	62,4 A
$I_{\text{Entlade,init}}$	38,2 A	41,6 A	48,8 A
$SOC_{\text{min}}$	53,1 %	63,2 %	64,4 %

Der erste Punkt ist zugleich auch der Punkt mit der aggressivsten Betriebsstrategie. Die Kombination aus hohen Rekuperationsströmen und einer tiefen Entladung am Anfang des Zyklus führt zu einem hohen Nutzungsgrad bei gleichzeitig hoher Batteriebelastung und höherem Stabilitätsrisiko. Der dritte Punkt hingegen zeichnet sich durch seine eher moderaten Parameter aus und weist die geringste Batteriebelastung sowie ein niedriges Stabilitätsrisiko auf. Dafür ist die Energieeffizienz der so parametrisierten Betriebsstrategie auch deutlich reduziert. Der zweite Punkt liegt zwischen diesen beiden Punkten.

Die drei Punkte wurden auf dem Bordnetzprüfstand in der Konfiguration mit dem realen Generator und der Batterieemulation validiert. Das Ergebnis dieser Messungen ist in der Paretofront in Abbildung 5.10 dargestellt. Wie auch schon in der vorangegangenen Validierung weisen Batteriebelastung und Nutzungsgrad eine gute Übereinstimmung mit der Simulation auf. Insbesondere der erste und der dritte Punkt sind fast deckungsgleich mit den Werten aus der Referenzsimulation. Nur bei dem mittleren Punkt ergibt sich eine Abweichung im Nutzungsgrad von gut 2 %.

Das Stabilitätsrisiko  $S$  konnte nicht mit derselben Übereinstimmung auf dem Prüfstand nachvollzogen werden. Dieser Effekt könnte unter anderem durch die große Differenz in den Steigungen der Bewertungsfunktion (Gleichung (5.8)) hervorgerufen werden. Diese Differenz führt bei einer negativen Leistungsbilanz zwischen Risikoleistung

und Reserveleistung zu einem sehr schnellen Anstieg des Bewertungskriteriums. Hier müsste in weiterführenden Arbeiten geprüft werden, ob das Bewertungskriterium mit der in dieser Arbeit vorgestellten Bewertungsfunktion wirklich zielführend ist.

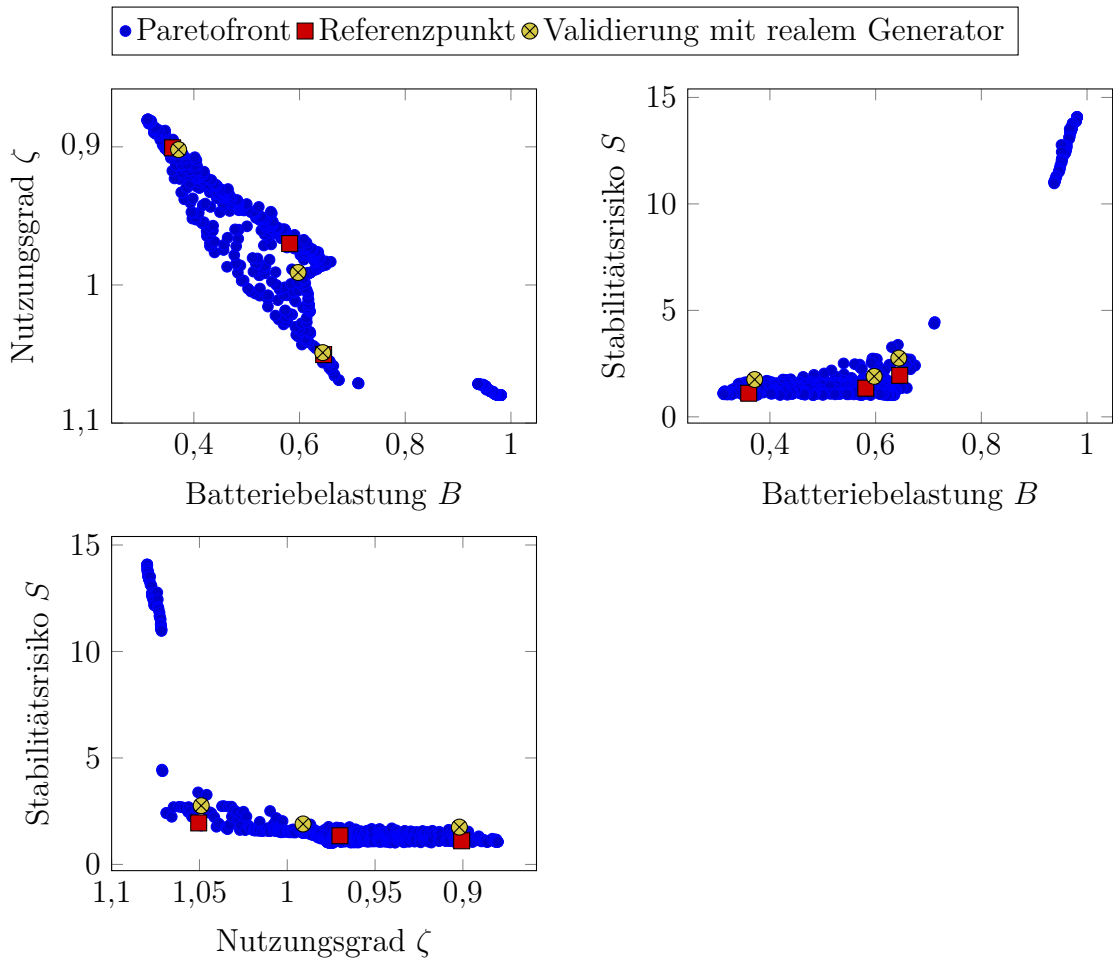


Abbildung 5.10: Paretofront der prädiktiven Betriebsstrategie inkl. der validierten Punkte.

Die Verläufe der Spannungen und Ströme an Generator und Batterie sowie der Verlauf des Ladezustands während der Validierung des ersten Punktes sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Bei diesem Punkt handelt es sich um den Punkt mit der aggressivsten Betriebsstrategie mit einem Sollwert für den Rekuperationsstrom von 160 A und der größten Entladetiefe von 53,1%. Durch die in diesem Szenario eingesetzte Lithium-Eisenphosphat-Batterie können so wesentlich höhere Rekuperationsströme von über 135 A erreicht werden. Auch können diese Ströme über den ganzen Zyklus hinweg, unabhängig vom Ladezustand der Lithium-Eisenphosphat-Batterie, realisiert werden. In dem vorangegangenen Szenario der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie wurde eine Blei-Säure-Batterie eingesetzt. Mit dieser konnten nur maximal 100 A in die Batterie geladen werden, bei höheren Ladezuständen gegen Ende des Zyklus fiel dieser Wert auf



unter 60 A ab, maßgeblich bedingt durch die höheren Ladezustände und die dadurch fehlende Ladeakzeptanz.

Abbildung 5.11 zeigt den Verlauf der Ladezustände für alle drei validierten Punkte sowie den zugehörigen Referenzverlauf aus der Simulationsumgebung. Die mit den Werten des ersten Punktes parametrierte Betriebsstrategie erreicht nach ca. 600 s den Ladezustand  $SOC_{\min}$ , ab welchem in den Nullstrom / Rekuperationsbetrieb gewechselt wird. Die anderen beiden Verläufe erreichen diesen Umkehrpunkt schon im Bereich von ca. 200 s. Jedoch folgen im Anschluss zwei längere Phasen des Motorstillstands, so dass der Ladezustand trotz des Nullstroms / Rekuperationsbetriebs um weitere sechs bis sieben Prozentpunkte abfällt.

Jedoch reicht bei allen drei validierten Punkten alleine die Kombination aus Nullstromregelung und Rekuperationsleistung aus, um die Energiemenge der initialen Entlade-phase wieder in die Batterie einzuspeichern.

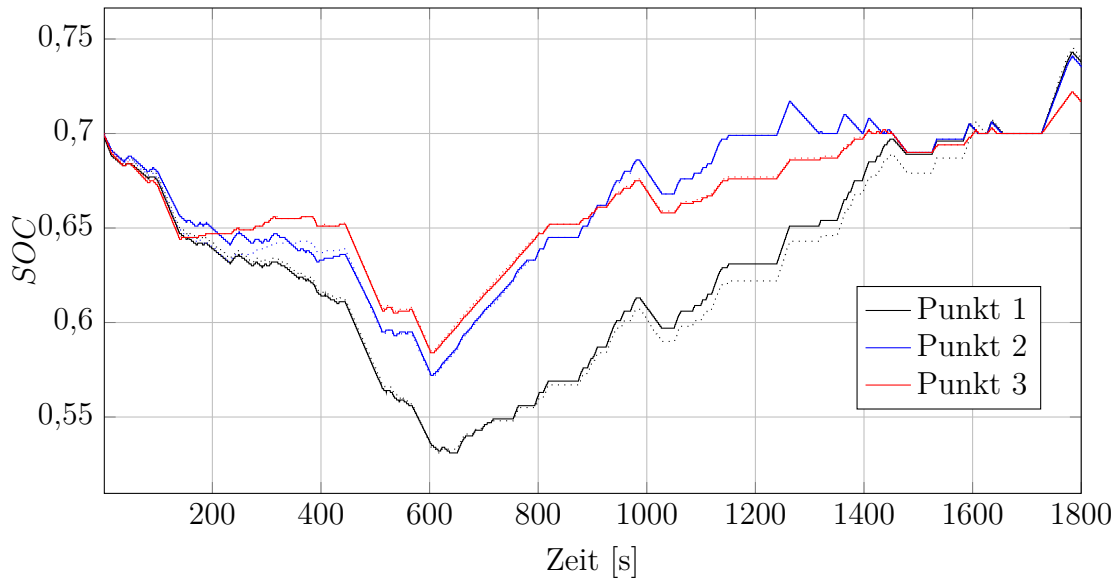


Abbildung 5.11: Verläufe der Ladezustände der drei validierten Punkte: Die gestrichelte Linie stellt den jeweiligen Referenzverlauf aus der Simulationsumgebung dar.

## 5 Optimierung und Validierung der betriebsstrategischen Parameter

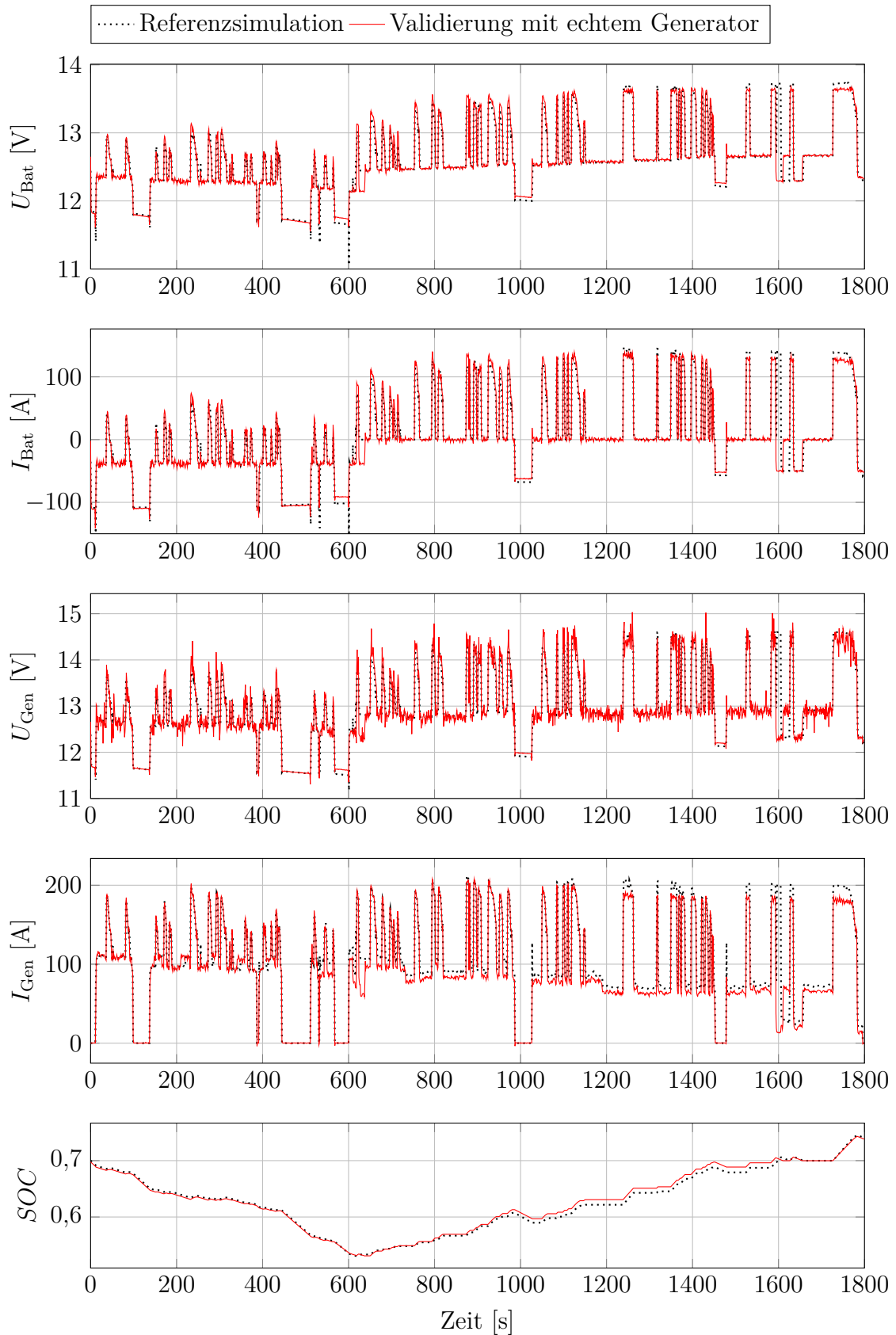


Abbildung 5.12: Verläufe wichtiger Größen von Generator und Batterie während der Validierung der prädiktiven Betriebsstrategie.

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

## 6.1 Ergebnisse dieser Arbeit

In dieser Arbeit wurde eine durchgängige Methode zur simulationsbasierten Optimierung der betriebsstrategischen Parameter eines Energie- und Leistungsmanagements für das Energiebordnetz eines Kraftfahrzeugs mit anschließender prüfstandsgestützter Validierung der Optimierungsergebnisse entwickelt. Ziel der Arbeit war es, die methodische Lücke zwischen simulationsgetriebener Funktionsentwicklung und der erst spät im Entwicklungsprozess möglichen Erprobung in Versuchsträgern zu füllen.

Ausgangspunkt der Arbeit waren eine bestehende Bordnetzsimulation und ein Bordnetzprüfstand. Beide Systeme wurden zur Erforschung von Methoden zur Stabilisierung der Bordnetzspannung in leistungskritischen Fahrzeugzuständen genutzt, wiesen aber keinerlei Kopplung auf.

Vor der Modellbildung wurde zunächst ein einheitliches Schnittstellen- und Strukturierungskonzept definiert. Darauf basierend wurden Simulationsmodelle für einige elektrische Verbraucher, die Bordnetzbatteie und den Generator neu gebildet bzw. bestehende Modelle erweitert. Der Fokus der Modellbildung lag dabei auf energetischen Aspekten, der Schnittstelle zum Energie- und Leistungsmanagement und einer Selbstbeurteilung der Komponenten bezüglich ihrer Möglichkeit zur Bereitstellung von Reserveleistung. Zudem wurde die Bordnetzsimulation um eine vereinfachte Implementierung eines Energie- und Leistungsmanagements erweitert, welche auf den kybernetischen Prinzipien des *Viable System Model* basiert.

Um die Ergebnisse der Simulation auf dem Bordnetzprüfstand validieren zu können, musste dieser umstrukturiert und erweitert werden. Nach einer Bestandsanalyse wurde ein entsprechendes Konzept erarbeitet und umgesetzt. Das neue Konzept basiert auf der Kopplung der Simulationsmodelle der Komponenten aus der Bordnetzsimulation mit entsprechenden leistungselektronischen Aktoren, um diese zu emulieren. Dafür wurden Emulationssysteme für die elektrischen Verbraucher, die Bordnetzbatteie und den Generator entwickelt. Es wurde gezeigt, dass diese Systeme über eine hohe Abbildungsqualität verfügen. Die Abweichung beträgt während der dynamischen Vorgänge weniger als zwei Prozent, im Mittel in einem typischen Einsatzszenario deutlich weniger. Anstelle der Möglichkeit der Emulation können am Bordnetzprüfstand auch reale Komponenten eingesetzt werden. Für diese Arbeit wurden dafür die

beiden Komponenten mit der größten Wirkung auf das Energiebordnetz, der Generator und die Bordnetzatterie, ausgewählt.

Die Bordnetzsimulation wurde mit verschiedenen multikriteriellen, metaheuristischen Optimierungsalgorithmen gekoppelt. Weiterhin wurden Ausdrücke für die Quantifizierung der Optimierungskriterien Energieeffizienz, Batteriebelastung und Spannungsstabilität definiert. Die Optimierungsalgorithmen variieren vom Anwender definierte Parameter und beurteilen das Simulationsergebnis nach den definierten Kriterien. Es wurden einige wenige Parameter der Betriebsstrategie der vereinfachten Implementierung des Energie- und Leistungsmanagements zur Optimierung freigegeben und die gefundenen Lösungen in Form von Paretofronten dargestellt. Erwartungsgemäß zeigte sich, dass die Parametrierung der Betriebsstrategie einen maßgeblichen Einfluss auf das Energiebordnetz hat und sowohl Energieeffizienz, Batteriebelastung als auch Spannungsstabilität von dieser Parametrierung abhängen. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass einige Parameter wie Batteriebelastung und Energieeffizienz schwer gemeinsam optimiert werden können und auch weiterhin multikriteriell betrachtet werden sollten.

Zur Validierung der durch die Optimierungsalgorithmen gefundenen Lösungen wurden einzelne Punkte der Paretofronten auf dem Bordnetzprüfstand nachgefahren. Dabei wurden für diese Punkte die Simulationsergebnisse mit Messungen am Bordnetzprüfstand verglichen. Die Messungen wurden mit echtem Generator und echter Batterie, zunächst jeweils einzeln, dann in Kombination, durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Tendenz und die Größenordnung der Optimierungskriterien auf dem Prüfstand bestätigt werden konnten. Jedoch sind sowohl in den Optimierungskriterien als auch in den Strom- und Spannungsverläufen doch deutliche Unterschiede zwischen Simulation und Prüfstand erkennbar. Diese sind hauptsächlich bedingt durch die Abweichung zwischen Simulationsmodell und realer Komponente und somit auch ein Beleg der Notwendigkeit einer durchgängigen Entwicklungsmethodik von Simulation, Prüfstand und Versuchsträger.

## 6.2 Ausblick

Als nächster logischer Schritt wird die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Optimierung und Validierung des kybernetischen Energie- und Leistungsmanagements genutzt, welches sich derzeit parallel in der Entwicklung befindet. Zudem wird ein Fahr Simulator in den Bordnetzprüfstand integriert. Mit diesem wird die Möglichkeit bestehen, virtuelle Fahrten aufzunehmen und wieder in den Prüfstand einzuspielen.

Sowohl die Bordnetzsimulation als auch der Bordnetzprüfstand sollten zeitnah um eine zweite Spannungsebene von 48 V erweitert werden. Durch den zweiten Energiespeicher in der 48 V-Ebene und den Gleichspannungswandler zwischen beiden Spannungsebenen ergeben sich vielversprechende Möglichkeiten für ein Energie- und Leistungsmanagement.

Zudem bietet es sich an, die vorangegangenen Arbeiten zur Topologie- und Leiterquerschnittsoptimierung mit den in dieser Arbeit vorgestellten Methoden zur Optimierung der Betriebsstrategie zu kombinieren. Dadurch könnten Topologie und Betriebsstrategie gemeinsam, beziehungsweise in einem definierten Prozess auch wechselseitig, optimiert werden, da Änderungen in einem System immer auch Rückwirkungen im anderen verursachen.

Des Weiteren sollte die Möglichkeit der Emulation vielpoliger Widerstandsnetzwerke mit Widerstandswerten im Milliohm-Bereich weiter untersucht werden. Der Wunsch nach einem konfigurierbaren, niederohmigen Vielpol ist sicherlich ambitioniert. Schlussendlich wären mit einem solchen System aber die letzten beiden Komponenten des elektrischen Energiebordnetzes, der Kabelbaum als Hin- und die Karosserie als Rückleiter, emulierbar. Dies würde die notwendigen Freiheitsgrade hinsichtlich der Untersuchung neuer Bordnetztopologien generieren.

Neben der reinen Betrachtung des elektrischen Energiebordnetzes wäre denkbar, die bisherigen Ansätze in einen domänenübergreifenden Ansatz zu überführen und auch thermische sowie mechanische Energieflüsse zu berücksichtigen. Durch die Optimierung der Teilkomponenten in Kombination mit einem domänenübergreifenden Energiemanagement könnte der Nutzungsgrad der gesamten peripheren Energiesysteme im Fahrzeug erhöht werden.

# Publikationsliste

Folgende Beiträge wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit veröffentlicht:

- [V1] Michael Winter, Stephan Fettke, Joachim Froeschl, Julian Taube und Hans-Georg Herzog. „Using the Viable System Model to control a system of distributed DC/DC converters“. In: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 2016.
- [V2] Michael Winter, Sascha Moser, Stefan Schoenewolf, Julian Taube und Hans-Georg Herzog. „Average Model of a Synchronous Half-Bridge DC/DC Converter Considering Losses and Dynamics“. In: *The 11th International Modelica Conference*. Linköping Electronic Conference Proceedings. Linköping University Electronic Press, 2015, S. 479–484. DOI: 10.3384/ecp15118479.
- [V3] Michael Winter, Anton Renner, Julian Taube und Hans-Georg Herzog. „Generatorprüfstand mit gekoppelter Generatoremulation zur Verwendung an einem Bordnetzprüfstand“. In: *Virtuelle Instrumente in der Praxis 2016*. VDE Verlag, 2016.
- [V4] Michael Winter, Stefan Schönewolf und Hans-Georg Herzog. „Emulation of the wiring harness in automotive applications“. In: *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2016.
- [V5] Michael Winter, Julian Taube, Stückl Andreas und Hans-Georg Herzog. „Emulation of batteries and bidirectional components in the automotive power net“. In: *Electric and Electronic Systems in Hybrid and Electrical Vehicles and Electrical Energy Management (EEHE)*. expert verlag, 2016, S. 131–141.
- [V6] Michael Winter, Julian Taube, Joachim Froeschl und Hans-Georg Herzog. „Collaborative simulation of a cybernetic energy management system with an automotive power net model“. In: *29th International Electric Vehicle Symposium (EVS)*. 2016.
- [V7] Michael Winter, Julian Taube, Joachim Froeschl und Hans-Georg Herzog. „From Simulation to Testbench Using the FMI-Standard“. In: *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2015, S. 1–5. DOI: 10.1109/VPPC.2015.7352951.
- [V8] Michael Winter, Julian Taube und Hans-Georg Herzog. „Skalierbare Echtzeitemulation von Bordnetzkomponenten in einem Bordnetzprüfstand mit NI VeriStand“. In: *Virtuelle Instrumente in der Praxis 2015*. VDE Verlag, 2015.

# Liste betreuter Arbeiten

Folgende studentische Arbeiten wurden im Rahmen dieser Forschungsarbeit betreut:

- [S1] Markus Bader. „Auslegung und Entwurf einer Halbleitersicherung für ein Niederspannungsbordnetz“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2014.
- [S2] Maximilian Einberger. „Nachbildung und Ersatz eines Kfz-Generators durch ein steuerbares Netzteil“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2013.
- [S3] Stephan Fettke. „Kybernetisches Management verteilter Gleichspannungswandler zur Kopplung von Energiebordnetzen“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2016.
- [S4] Christoph Götz. „Synergien der Leistungs- und Energieprädiktion mit zusätzlicher Betrachtung der Betriebsstrategie zwischen Energie- und Leistungsmanagement“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2014.
- [S5] Sebastian Groß. „Ausfallsichere Energieversorgung mobiler Systeme“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2014.
- [S6] Andreas Habl. „Entwicklung generischer Modelle für Bordnetzverbraucher“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2013.
- [S7] Martin Huber. „Entwicklung eines Prüfstandes zur Vermessung von Bordnetz-batterien“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2016.
- [S8] Katharina Krusche. „Implementierung und Inbetriebnahme echtzeitfähiger, generischer Verbrauchermodelle in Simulation und Prüfstand“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2014.
- [S9] Sebastian Ludwig. „Entwicklung eines EtherCAT-Slave-Moduls zur Steuerung von elektronischen Lasten“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2014.
- [S10] Sascha Moser. „Entwurf und Realisierung eines Schaltwandlers für die Bordnetzversorgung von eCARus 2.0“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2013.
- [S11] Simeon Nikolov. „Automatisierte Parameterschätzung physikalischer Systeme mit JModelica“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2014.
- [S12] Timur Nuritdinow. „Betriebsstrategien für ein kybernetisches Energiemanagementsystem und deren Optimierung“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2016.

- [S13] Timur Nuritdinow. „Inbetriebnahme einer energetischen Schnittstelle zwischen Echtzeitsimulation und Bordnetzprüfstand“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2013.
- [S14] Timur Nuritdinow. „Metaheuristische Optimierungsverfahren für Optimierungsprobleme am Bordnetz“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2015.
- [S15] Anton Renner. „Adaption eines Generatorprüfstands auf ein Echtzeitsystem mit Erweiterung um eine modellbasierte Generatoremulaton“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2015.
- [S16] Christoph Riebel. „Entwicklung einer zentralen Steuerung für autonome Abschaltmechanismen in einem Bordnetzprüfstand mit LabVIEW“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [S17] Jonas Ruchti. „Entwicklung eines Testsystems zur Untersuchung des Managements verteilter Gleichspannungswandler“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2016.
- [S18] Armin Sarcevic. „Ausfallsichere Energieversorgung in der Fahrzeugtechnik“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2014.
- [S19] Alexander Schlenk. „Visualisierung und Aufbereitung von Geoinformationen am Bordnetzprüfstand mit NI Veristand“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2015.
- [S20] Michael Schmid. „Analyse und Vergleich verschiedener Modellierungen eines Klauenpolgenerators im KFZ-Bordnetz“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2015.
- [S21] Michael Schmid. „Modellierung von degradierbaren Bordnetzverbrauchern mit lokalen Energiemanagementfunktionen“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2016.
- [S22] Stefan Schönewolf. „Entwicklung eines Emulators für elektrische Energiebordnetze im Kraftfahrzeug“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2016.
- [S23] Stefan Schönewolf. „Entwicklung eines nicht-schaltenden Verhaltensmodells eines synchronen Tiefsetzstellers in Modelica“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2015.
- [S24] Thomas Schwarzhuber. „Aufbau eines Model-in-the-Loop-Prüfstands mit anschließendem Entwurf einer Schlupfregelung für Elektro-Rennfahrzeuge“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2015.
- [S25] Andreas Stückl. „Aufbau und Inbetriebnahme eines Batterieemulators“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2015.
- [S26] Julian Taube. „Plattform zur durchgängigen Entwicklung, Optimierung und Validierung von Energiemanagementsystemen im Bordnetz“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2015.



*Liste betreuter Arbeiten*

- [S27] Thomas Zeschg. „Entwurf elektronischer Schaltmodule zur Leitungsabsicherung im Fahrzeugbordnetz“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2014.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Grundprinzip eines <i>Power-Hardware-in-the-Loop</i> -Systems (rechts) im Vergleich zu einem klassischen HiL-System (links). Der Ausgang eines HiL-Simulators wird über einen geeigneten Verstärker auf das zu testende System übertragen. Die Antwort des Systems wird über Sensorik erfasst und in das Modell zurückgeführt (nach [134]). . . . .	12
3.1	In den Basisklassen ist das Schnittstellen- und Strukturierungskonzept der Komponentenmodelle implementiert. Komponentenlogik und -physik sind klar voneinander getrennt, und alle Komponenten innerhalb einer Gruppe weisen dieselben Schnittstellen nach außen auf. Überschreitet eine Komponente energetische Domänengrenzen, wird eine separate Basisklasse angelegt. Basisklasse (a) bedient nur die elektrische Domäne, wohingegen Basisklasse (b) sowohl Verbindungen zur elektrischen als auch zur rotationsmechanischen Domäne aufweist. . . . .	16
3.2	Modell einer Sitzheizung (links): Aus der Verlustleistung wird mit Hilfe eines thermischen Modells die Leitertemperatur und daraus der Wert des elektrischen Widerstands berechnet. Die rechte Abbildung zeigt die Gegenüberstellung des simulierten Stromverlaufs einer Sitzheizung mit der Messung aus einem Fahrzeug. . . . .	19
3.3	Prinzipschaltbild des implementierten Simulationsmodells eines Synchronwandlers: Die beiden Schalter der Halbbrücke wurden durch ein Gleichungssystem ersetzt, das die Übertragungsfunktion und die Verluste in den Halbleitern berücksichtigt. . . . .	21
3.4	Wirkungsgradkennfeld des Modells des implementierten Gleichspannungswandlers in Abhängigkeit von Ausgangsstrom und Tastverhältnis. . . . .	23
3.5	Absolute Abweichung $\Delta\eta$ des Wirkungsgrades zwischen dem implementierten Modell und der <i>SPICE</i> -Simulation. . . . .	24
3.6	Summierter Leistungsverlauf aller Fahrwerksregelsysteme während eines Ausweichmanövers: Die blaue Linie zeigt die für diese Arbeit verwendete einhüllende Risikoleistung $P_{\text{Risiko}}$ . . . . .	25
3.7	Die Möglichkeit zur Verbraucherdegradation kann in den Kontrollebenen der Verbraucher in Tabellenform hinterlegt werden. . . . .	27
3.8	Grundstruktur des erweiterten Generatormodells: Der Generatorregler regelt über den Erregerstrom die Klemmenspannung des Generators. Zur Berechnung des am Riementrieb anliegenden Drehmoments wird ein Wirkungsgradkennfeld verwendet. . . . .	28

3.9	Abhängigkeit des Wirkungsgrades eines 230 A-Klauenpolgenerators von Ausgangsstrom und Drehzahl bei einer konstanten Generatorspannung von 14 V. . . . .	30
3.10	Verwendetes Simulationsmodell zur Abbildung einer Blei-Säure-Batterie in der Bordnetzsimulation: Sämtliche Parameter sind in Tabellenform in Abhängigkeit des Ladezustands hinterlegt und wurden messtechnisch ermittelt. . . . .	32
3.11	Als Fahrprofil wurde der <i>WLTC</i> -Zyklus der Klasse 3 verwendet und mit energetisch relevanten Bordnetzfunktionen überlagert. . . . .	35
3.12	Grundstruktur des implementierten Energie- und Leistungsmanagementsystems: Die Grundstruktur basiert auf dem kybernetischen Ansatz des <i>Viable System Model</i> . . . . .	36
3.13	Hierarchischer Zustandsautomat des implementierten Energie- und Leistungsmanagementsystems. . . . .	39
3.14	Funktion zur Anpassung der Batterieladung an die Motordrehzahl: Bei hohen Drehzahlen wird der Batterie Energie entnommen, bei niedrigen Drehzahlen wird die Batterie wieder geladen. . . . .	41
3.15	Qualitativer Verlauf des Ladezustands für die drehzahlabhängige Betriebsstrategie: Der Ladezustand bewegt sich mit wechselnden Gradienten, zwischen seiner erlaubten Ober- bzw. Untergrenze. . . . .	41
3.16	Qualitativer Verlauf des Ladezustands für die prädiktive Betriebsstrategie nach [114]: Zu Beginn des Zyklus wird die Batterie stark entladen. Nach dem Erreichen der unteren Ladezustandsgrenze wird in den Nullstrom- und Rekuperationsbetrieb gewechselt. . . . .	42
3.17	Prinzipieller Aufbau der Systemsimulation von Bordnetz und Energiemanagementsystem. . . . .	43
4.1	Frequenzgänge der verwendeten leistungselektronischen Aktoren bei einer Sollwertauslenkung von 100 %. Die dynamischsten Systeme sind die elektronischen Lasten, gefolgt von der elektronischen Quelle-Senke und dem Netzgerät. . . . .	54
4.2	Das PXI-System dient als Hauptsteuerrechner zur Berechnung der Sollströme aller Verbrauchermodelle (V), des Energiemanagements (EM) und zur Einspeisung des Zyklus. Zur Skalierung der Rechenleistung ist ein weiterer PC über eine PXImc-Schnittstelle angebunden. . . . .	56
4.3	Schema des Generator- und Generatoremulationprüfstandes: Im Emulationsbetrieb wird das Netzgerät an den Bordnetzprüfstand geschaltet und über ein Simulationsmodell der Generatorstrom vorgegeben. . . . .	58
4.4	Generatorprüfstand und Generatoremulation: Über Leistungsschütze kann entweder der Generator oder das Netzgerät mit dem Bordnetzprüfstand verbunden werden. . . . .	58
4.5	Schema (links) und Aufbau (rechts) eines Batterieemulationssystems bestehend aus einer elektronischen Quelle-Senke und einem Echtzeitrechner in einem fahrbaren Schaltschrank. . . . .	60

4.6	Zur exakten Validierung der Emulationssysteme werden die Messsignale aus den Testszenarien in die Simulationsumgebung rückgeführt und dort abermals simuliert. Aus der Differenz kann der Fehler zwischen Simulation und Emulation bestimmt werden. . . . .	62
4.7	Spannungs- und Stromverläufe der Emulation einer Sitzheizung verglichen mit dem Referenzverlauf aus der Simulationsumgebung. . . . .	63
4.8	Spannungs- und Stromverläufe der Emulation eines Kfz-Generators verglichen mit dem Referenzverlauf aus der Simulationsumgebung. . . . .	64
4.9	Spannungs- und Stromverläufe der Emulation einer Bordnetzatterie verglichen mit dem Referenzverlauf aus der Simulationsumgebung. . . . .	65
4.10	Schema des Bordnetzprüfstandes: Der kombinierte Generator- und Generatoremulationsprüfstand befindet sich im Motorbereich, der Batterieemulator am Heck. Das Haupt-PXI steuert 15 elektronische Lasten und berechnet das Energiemanagement. . . . .	69
4.11	Bordnetzprüfstand auf Basis einer Fahrzeugkarosserie inkl. Kabelbaum. Die Verbraucher werden über 15 elektronische Lasten dargestellt. Im Motorbereich ist der kombinierte Generator / Generatoremulationsprüfstand, im Heckbereich das Batterieemulationssystem zu sehen. . . . .	70
5.1	Flussdiagramm der Zielfunktion. Die Optimierung ist in <i>MATLAB</i> implementiert, die Zielfunktion selbst kann mehrfach parallel ausgeführt werden. . . . .	77
5.2	Paralleler Einsatz mehrerer Optimierungsverfahren: Nachdem jeder Optimierungsalgorithmus selbstständig konvergiert ist, wird aus den einzelnen Paretomengen eine gemeinsame Paretofront ermittelt. . . . .	78
5.3	Paretofront der beiden Optimierungskriterien Batteriebelastung und Nutzungsgrad als Ergebnis der durchgeführten Optimierung der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie. . . . .	80
5.4	Abhängigkeiten der Optimierungskriterien Nutzungsgrad und Batteriebelastung von den gewählten Parametern der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie. . . . .	81
5.5	Paretofront der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie inkl. der validierten Punkte mit verschiedenen Kombinationen an realen Komponenten. . . . .	83
5.6	Verläufe wichtiger Größen von Generator und Batterie während der Validierung der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie. . . . .	84
5.7	Vergleich der Generator- und Batterieströme während einer Phase mit relativ niedrigen Motordrehzahlen. . . . .	85
5.8	Paretofront der drei Optimierungskriterien Batteriebelastung, Nutzungsgrad und Stabilitätsrisiko als Ergebnis der durchgeführten Optimierung der prädiktiven Betriebsstrategie. . . . .	87
5.9	Abhängigkeiten der Optimierungskriterien Nutzungsgrad, Batteriebelastung und Stabilitätsrisiko von den gewählten Parametern der prädiktiven Betriebsstrategie. . . . .	88
5.10	Paretofront der prädiktiven Betriebsstrategie inkl. der validierten Punkte. . . . .	90

## *Abbildungsverzeichnis*

5.11	Verläufe der Ladezustände der drei validierten Punkte: Die gestrichelte Linie stellt den jeweiligen Referenzverlauf aus der Simulationsumgebung dar. . . . .	91
5.12	Verläufe wichtiger Größen von Generator und Batterie während der Validierung der prädiktiven Betriebsstrategie. . . . .	92

# Tabellenverzeichnis

4.1	Bewertung der einzelnen Entwicklungsschritte im Entwicklungsprozess eines elektrischen Energie- und Leistungsmanagementsystems für ein Energiebordnetz hinsichtlich der Erfüllung verschiedener Kriterien. . . .	45
4.2	Übersicht über die kleinsten Zeitkonstanten der verwendeten Simulationsmodelle der Bordnetzkomponenten und der daraus resultierenden minimalen Ausführungsfrequenzen. . . . .	51
4.3	Übersicht über die maximalen Stromgradienten und Amplituden der Bordnetzkomponenten, basierend auf Messungen in einem Versuchsträger.	53
4.4	Übersicht über die aus den Datenblattangaben und Gleichung 4.1 berechneten Eckfrequenzen der leistungselektronischen Aktoren. . . . .	53
4.5	Übersicht über die gemessenen Eckfrequenzen für die Auslegungskriterien einer maximalen Amplitudenverstärkung von $-1,5$ dB bzw. einer maximalen Phasenverschiebung von $-45^\circ$ . Die jeweilige Limitierung ist rot markiert. . . . .	55
4.6	Übersicht der Möglichkeiten der Komponentenemulation und des Einsatzes realer Komponenten am Bordnetzprüfstand . . . . .	68
5.1	Übersicht über die zur Optimierung freigegebenen Parameter der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie und der zugelassenen Wertebereiche. .	79
5.2	Parameter der zwei zur Validierung der drehzahlabhängigen Betriebsstrategie herangezogenen Punkte des Optimierungsergebnisses. . . . .	82
5.3	Übersicht über die zur Optimierung freigegebenen Parameter der prädiktiven Betriebsstrategie und der zugelassenen Wertebereiche. . . . .	86
5.4	Parameter der drei zur Validierung der prädiktiven Betriebsstrategie herangezogenen Punkte des Optimierungsergebnisses. . . . .	89

# Literaturverzeichnis

- [1] Daniel Adam, Joachim Froeschl, Uwe Baumgarten, Andreas Herkersdorf und Hans-Georg Herzog. „Cyber Organic System-Modell – Ein neuer Ansatz für automotives Systemdesign“. In: *EEHE - Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement*. Hrsg. von Haus der Technik e.V. 2015.
- [2] Joern Albers, Eberhard Meissner und Sepehr Shirazi. „Lead-acid batteries in micro-hybrid vehicles“. In: *Journal of Power Sources* Vol. 196. No. 8 (2011), S. 3993–4002. ISSN: 03787753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2010.11.094.
- [3] Michael Andrus, Harsha Ravindra, John Hauer, Michael Steurer, Matthew Bosworth und Raturaj Soman. „PHIL implementation of a MVDC fault management test bed for ship power systems based on megawatt-scale modular multilevel converters“. In: *2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*. Piscataway, NJ und Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 337–342. ISBN: 978-1-4799-1857-7. DOI: 10.1109/ESTS.2015.7157915.
- [4] Audi AG. *Vielseitig und effizient: Mild-Hybrid-Technologie*. URL: <https://www.audi-mediacentre.com/de/techday-combustion-engine-technology-8738/vielseitig-und-effizient-mild-hybrid-technologie-8761> (besucht am 11.11.2017).
- [5] Saffet Ayasun, Sean Vallieu, Robert Fischl und Tom Chmielewski. „Electric machinery diagnostic/testing system and power hardware-in-the-loop studies“. In: *SDEMPED 2003*. IEEE, 2003, S. 361–366. ISBN: 0-7803-7838-5. DOI: 10.1109/DEMPED.2003.1234602.
- [6] Kai-Uwe Balszuweit. „Das Bordnetz des neuen BMW 7er“. In: *Internationaler Fachkongress: Bordnetze im Automobil*. Hrsg. von Elektronik automotive. 2016.
- [7] Uwe Bau, Daniel Neitzke, Franz Lanzerath und André Bardow. „Multi-objective optimization of dynamic systems combining genetic algorithms and Modelica : Application to adsorption air-conditioning systems“. In: *Linköping Electronic Conference Proceedings*. Linköping University Electronic Press, 2015.
- [8] Thorsten Baumhofer, Wladislaw Waag und Dirk Uwe Sauer. „Specialized battery emulator for automotive electrical systems“. In: *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, S. 1–4. DOI: 10.1109/VPPC.2010.5729112.

- [9] Bayerische Forschungsstiftung. *Energie-Backbone*. 2013. URL: <https://forschungsstiftung.de/index.php/Projekte/Details/Energie-Backbone.html> (besucht am 11. 11. 2017).
- [10] Slim Bechikh, Rituparna Datta und Abhishek Gupta. *Recent Advances in Evolutionary Multi-objective Optimization*. Bd. 20. Adaptation, Learning, and Optimization. Cham: Springer International Publishing und Imprint: Springer, 2017. ISBN: 3319429779.
- [11] Stafford Beer. *Brain of the firm*; Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 1972. ISBN: 978-0-471-27687-6.
- [12] Stafford Beer. *Kybernetik und Management*; Frankfurt am Main: Fischer Verlag, 1962. ISBN: 978-3-10-106801-8.
- [13] Stafford Beer. *Kybernetische Führungslehre*. Freiburg im Breisgau: Herder, 1973. ISBN: 978-3-585-32000-8.
- [14] Klaus Bengler, Klaus Dietmayer, Berthold Farber, Markus Maurer, Christoph Stiller und Hermann Winner. „Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives“. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* Vol. 6. No. 4 (2014), S. 6–22. ISSN: 1939-1390. DOI: 10.1109/MITS.2014.2336271.
- [15] Dmytro Bilyi, Volodymyr Bilyi und Dieter Gerling. „FEM based model development and co-simulation of automotive multi-phase claw-pole alternator and rectifier“. In: *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. IEEE, 2016, S. 1–5. ISBN: 978-1-5090-0403-4. DOI: 10.1109/ITEC.2016.7520306.
- [16] Dmytro Bilyi und Dieter Gerling. „Modeling and simulation of vehicle power network in Simulink/MATLAB“. In: *2016 the 4th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*. Hrsg. von Hossam A. Gabbar. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016, S. 196–202. ISBN: 978-1-5090-5111-3. DOI: 10.1109/SEGE.2016.7589525.
- [17] Dmytro Bilyi und Dieter Gerling. „Standstill frequency response test for obtaining parameters of six phase double delta salient-pole synchronous machine on example of claw-pole alternator“. In: *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. Piscataway, NJ und Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 47–54. ISBN: 978-1-5090-2067-6. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525860.
- [18] Andreas Binder. *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten*. Berlin: Springer, 2012. ISBN: 3540718494.
- [19] Christoph Birkl und David Howey. „Model identification and parameter estimation for LiFePO4 batteries“. In: *Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013), IET*. [Stevenage, UK]: Institution of Engineering and Technology, 2013, S. 2.1–2.1. ISBN: 978-1-84919-776-2. DOI: 10.1049/cp.2013.1889.



- [20] Hartmut Bossel. *Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme*. Wiesbaden: Vieweg+teubner Verlag, 1992. ISBN: 9783528052423. DOI: 10.1007/978-3-322-83658-8.
- [21] Lisa Braun, Michael Armbruster und Frank Gauterin. „Trends in Vehicle Electric System Design: State-of-the Art Summary“. In: *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 1–6. ISBN: 978-1-4673-7637-2. DOI: 10.1109/VPPC.2015.7353035.
- [22] Lisa Braun, Michael Armbruster und Eric Sax. „Stakeholder issues concerning the automotive E/E-architecture“. In: *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. IEEE, 2016, S. 1–6. ISBN: 978-1-5090-0814-8. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841340.
- [23] Lisa Braun, Frank Gauterin und Eric Sax. *Experteninterview zur Anforderungsanalyse heutiger und zukünftiger E/E Architekturen im Kraftfahrzeug. Abschlussbericht, 27. April 2016*. 2016. DOI: 10.5445/IR/1000054216.
- [24] Stefan Büchner. *Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen*. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier, 2008. ISBN: 3867278032.
- [25] Stephan Buller. *Impedance based simulation models for energy storage devices in advanced automotive power systems*. Bd. Bd. 31. Aachener Beiträge des ISEA. Aachen: Shaker, 2003. ISBN: 9783832212254.
- [26] David Bustard, Roy Sterritt, A. Taleb-bendiab, Andrew Laws, Martin Randles und Frank Keenan. *Towards a Systemic Approach to Autonomic Systems Engineering*. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.353.1154>.
- [27] Stéphane Butterbach, Bodgan Vulturescu, Christophe Forgez, Gerard Coquery und Guy Friedrich. „Lead-acid battery model for hybrid energy storage“. In: *2011 IEEE vehicle power and propulsion conference (VPPC 2011)*. Piscataway NJ: IEEE, 2011, S. 1–5. ISBN: 978-1-61284-248-6. DOI: 10.1109/VPPC.2011.6043091.
- [28] Su Chen, Chunjian Kang, Zhang Zhang und Hailong Zhu. „A method for SOC estimation for lead-acid battery based on multi-model adaptive Extended Kalman Filtering estimation“. In: *IECON 2016*. [Piscataway]: Institute of Electrical and Electronics Engineers und = IEEE, op. 2016, S. 18–24. ISBN: 978-1-5090-3474-1. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793555.
- [29] Gurakuq Dajaku, Bastian Lehner, Xhecat Dajaku, Andreas Pretzer und Dieter Gerling. „Hybrid excited claw pole rotor for high power density automotive alternators“. In: *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE, 2016, S. 2536–2543. ISBN: 978-1-5090-2538-1. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732878.

- [30] Nikolaos Daniil und David Drury. „Investigation and validation of methods to implement a two-quadrant battery emulator for power Hardware-in-the-Loop Simulation“. In: *IECON 2016*. [Piscataway]: Institute of Electrical and Electronics Engineers und = IEEE, op. 2016, S. 2070–2075. ISBN: 978-1-5090-3474-1. DOI: 10.1109/IECON.2016.7794013.
- [31] Dassault Systèmes. *CATIA Systems Engineering – Dymola: Multi-Engineering Modeling and Simulation*. 2017. URL: <http://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola/> (besucht am 12.01.2017).
- [32] *DC-to-DC Design Guide*. 10.10.2002. URL: <http://www.vishay.com/docs/71917/71917.pdf> (besucht am 01.03.2017).
- [33] Maja Diebig. „Entwicklung einer Methodik zur simulationsbasierten Dimensionierung von Kfz-Bordnetzen“. Dissertation. Technische Universität Dortmund, 2016.
- [34] Werner Dück. *Optimierung unter mehreren Zielen*. Reihe Wissenschaft. Wiesbaden: Vieweg+teubner Verlag, 1979. ISBN: 9783528068424. DOI: 10.1007/978-3-322-86015-6.
- [35] Hilding Elmqvist, Sven Erik Mattsson und Martin Otter. „Modelica - A language for physical system modeling, visualization and interaction“. In: *1999 IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design*. 1999, S. 630–639. DOI: 10.1109/CACSD.1999.808720.
- [36] Robert W. Erickson und Dragan Maksimović. *Fundamentals of power electronics*. 2nd ed. Norwell, Mass.: Kluwer Academic, 2001. ISBN: 0-306-48048-4.
- [37] Radomir Michal Fabis. „Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen“. Dissertation. Technische Universität Berlin, 2006.
- [38] Tara Feizi, Monika Kwiecien und Dirk Uwe Sauer. „Analysis of characteristics for the identification of lead-acid battery technologies used in micro-hybrid vehicles“. In: *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. IEEE, 2016, S. 1–5. ISBN: 978-1-5090-2320-2. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555656.
- [39] David Freitas, Marcos Ketzer, Marcos Morais und Antonio Lima. „Lifetime estimation technique for lead-acid batteries“. In: *IECON 2016*. [Piscataway]: Institute of Electrical and Electronics Engineers und = IEEE, op. 2016, S. 2076–2081. ISBN: 978-1-5090-3474-1. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793314.
- [40] Joachim Fröschl, Veneta Dobрева, Christian Pichler und Hans-Georg Herzog. „Investigation of the stability of a State Triggered Energy Management System“. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement*. Hrsg. von Ottmar Sirch. Haus der Technik Fachbuch. Renningen: Expert Verlag, 2015, S. 147–160. ISBN: 978-3-8169-3311-3.

- [41] Joachim Fröschl, Alexander Epplein, René Wendler, Ergun Yavuz und Hans-Georg Herzog. „ConnectedPowerManagement Monitor as a view into a cybernetic energy and power management: An isomorphic tool design concept“. In: *EEHE - Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement*. Hrsg. von Haus der Technik e.V. 2016.
- [42] Joachim Fröschl, Stefan Kurtz, Michael Winter, Julian Taube, Timur Nuridinow und Hans-Georg Herzog. „Concept of a decision system for an operating strategy in a cybernetic energy and power management“. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement VII*. Hrsg. von Ottmar Sirch. Haus der Technik Fachbuch. Renningen: Expert Verlag, 2016, S. 472–482. ISBN: 978-3-8169-3346-5.
- [43] *Functional Mockup Interface for Model Exchange and Co-Simulation, Version 2.0*. 2016-06-25. URL: [www.fmi-standard.org](http://www.fmi-standard.org) (besucht am 28.12.2016).
- [44] Rainer Gehring. „Beitrag zur Untersuchung und Erhöhung der Spannungsstabilität des elektrischen Energiebordnetzes im Kraftfahrzeug“. Dissertation. München: Technische Universität München, 2012.
- [45] Tom P. Giovanazzi. „Prädiktives Leistungsmanagement in Fahrzeugbordnetzen“. Dissertation. München: Technische Universität München, 2014.
- [46] Tom P. Giovanazzi, Andreas W. Ebentheuer, Andreas Thanheiser, Dominik Buecherl, Hans-Georg Herzog und Joachim Froeschl. „Development of an intelligent cybernetic load control for power distribution management in vehicular power nets“. In: *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2011, S. 1–6. DOI: 10.1109/VPPC.2011.6043048.
- [47] Tom P. Giovanazzi, Georg A. Kiener, Joachim Froeschl, Andreas Thanheiser, Dominik Buecherl und Hans-Georg Herzog. „Voltage Stabilization in Vehicle Power Nets by Power Distribution Management“. In: *International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS26)*. 2012.
- [48] Tom P. Giovanazzi, Thomas Wagner, Andreas Thanheiser, Christiane Bertram, Dominik Buecherl, Hans-Georg Herzog und Joachim Froeschl. „Experimental investigation on voltage stability in vehicle power nets for power distribution management“. In: *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2010, S. 1–6. DOI: 10.1109/VPPC.2010.5729168.
- [49] Tom P. Giovanazzi, Andreas Wank, Andreas Thanheiser, Joachim Froeschl und Hans-Georg Herzog. „Experimental Investigations on Voltage Stability in Multilevel Power Nets“. In: *International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS26)*. 2012.
- [50] Tom P. Giovanazzi, Niklas Willems, Joachim Froeschl, Andreas Thanheiser, Dominik Buecherl und Hans-Georg Herzog. „Voltage Stability and System Behavior of Cybernetic Loads in Vehicular Power Nets“. In: *International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS26)*. 2012.

- [51] Dardo Oscar Guaraglia und Jorge Lorenzo Pousa. *Introduction to Modern Instrumentation: For Hydraulics and Environmental Sciences*. De Gruyter, 2014. ISBN: 9783110427370. URL: <https://books.google.de/books?id=rZ4oCQAAQBAJ>.
- [52] Cristina Guzman, Alben Cardenas und Kodjo Agbossou. „Evaluation of meta-heuristic optimization methods for home energy management applications“. In: *Proceedings, 2017 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. Piscataway, NJ und Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 1501–1506. ISBN: 978-1-5090-1412-5. DOI: 10.1109/ISIE.2017.8001468.
- [53] Torsten Hauck und Anton Kolbeck. „Bond wire design for eXtreme Switch devices“. In: *11th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical, and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE 2010*. [Piscataway, N.J.]: IEEE, 2010, S. 1–4. ISBN: 978-1-4244-7026-6. DOI: 10.1109/ESIME.2010.5464545.
- [54] Charles Herring und Simon Kaplan. „The viable system architecture“. In: *Hawaii International Conference on System Sciences. HICSS-34*. 3-6 Jan. 2001, S. 10. DOI: 10.1109/HICSS.2001.927249.
- [55] Marc Hohmann. „Spannungsstabilisierende Maßnahmen in Kfz-Bordnetzen“. In: *ATZelektronik* Vol. 4. No. 1 (2009), S. 24–27. ISSN: 1862-1791. DOI: 10.1007/BF03223943.
- [56] Francisco Huerta, Jorn K. Gruber, Milan Prodanovic und Pablo Matatagui. „Power-hardware-in-the-loop test beds: Evaluation tools for grid integration of distributed energy resources“. In: *IEEE Industry Applications Magazine* Vol. 22. No. 2 (2016), S. 18–26. ISSN: 1077-2618. DOI: 10.1109/MIAS.2015.2459091.
- [57] Kuo Ing Hwu und Yu Chia-Sung. „A fast response voltage control circuit for automotive alternator system“. In: *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. IEEE, 2016, S. 798–803. ISBN: 978-1-5090-1272-5. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2016.7513057.
- [58] Infineon Technologies. *TLE8880: Alternator Regulator with LIN Interface*. 2013. URL: [http://www.infineon.com/dgdl/TLE8880\\_PB.pdf](http://www.infineon.com/dgdl/TLE8880_PB.pdf) (besucht am 10.03.2017).
- [59] Rolf Isermann. *Fahrdynamik-Regelung*. [New York]: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (GWV), 2006. ISBN: 3834890499.
- [60] ISO 17987. *Road Vehicles - Local interconnect network (LIN)*. [www.iso.org](http://www.iso.org). URL: [www.iso.org](http://www.iso.org) (besucht am 10.03.2017).
- [61] Tobolar Jakub, Otter Martin und Bünthe Tilman. „Modelling of Vehicle Powertrains with the Modelica PowerTrain Library“. In: *Dynamisches Gesamtsystemverhalten von Fahrzeugantrieben*. Hrsg. von Haus der Technik e.V. 2007.

- [62] Lijie Jia und Qingxiang Zhu. „The research on electromagnetic launch system based on VSM“. In: *2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*. 2012, S. 487–490. DOI: 10.1109/ICSAI.2012.6223042.
- [63] Susan Jane Jones, Antonio Rodriguez-Diaz, Lynne Hall, Manuel Castanon-Puga, Dora L. Flores-Gutierrez und Carelia Gaxiola-Pacheco. „A cybernetic approach to multi-agent system simulation in Tijuana-San Diego using the Viable Systems Model“. In: *2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, S. 1648–1652. DOI: 10.1109/ICSMC.2007.4413698.
- [64] Hubertus Th. Jongen, Klaus Meer und Eberhard Triesch. *Optimization theory*. Boston, Mass. und London: Kluwer Academic, 2004. ISBN: 1402080999.
- [65] Andreas Jossen und Wolfgang Weydanz. *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen: 36 Tabellen*. Neusäß: Ubooks-Verl., 2006. ISBN: 9783939359111.
- [66] Chetan Kapoor und Sarah Schlonsky. „Using PXImc for creating high - performance multicomputer test and control systems“. In: *2010 IEEE AUTOTEST-CON*. 2010, S. 1–3. DOI: 10.1109/AUTEST.2010.5613569.
- [67] Ali Kaveh. *Advances in Metaheuristic Algorithms for Optimal Design of Structures*. 2. ed. 2017. Cham: Springer International Publishing und Imprint: Springer, 2017. ISBN: 3319461737.
- [68] Marian Kazimierczuk. *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. Chichester, U.K.: Wiley, 2008. ISBN: 978-0-470-77301-7.
- [69] Peter Keil und Andreas Jossen. „Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen“. In: *DESIGN&ELEKTRONIK-Entwicklerforum Batterien & Ladekonzepte*. Hrsg. von DESIGN&ELEKTRONIK. 2012.
- [70] Ross Kerley, Ji Hoon Hyun und Dong Sam Ha. „Automotive lead-acid battery state-of-health monitoring system“. In: *IECON 2015 - Yokohama*. Hrsg. von Kiyoshi Ohishi und Hideki Hashimoto. Piscataway, NJ und Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 003934–003938. ISBN: 978-1-4799-1762-4. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392714.
- [71] John Kessels. „Energy management for vehicle power net with flexible electric load demand“. In: *Control Applications, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on*. IEEE, 2005, S. 1504–1509. ISBN: 0-7803-9354-6. DOI: 10.1109/CCA.2005.1507345.
- [72] J. Kim, J. Hong, J. Lee und S. Park. „Performance improvement of an automotive alternator by heat treatment“. In: *2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG)*. [S.l.]: IEEE, 2015, S. 1. ISBN: 978-1-4799-7322-4. DOI: 10.1109/INTMAG.2015.7156830.

- [73] Tae-Hoon Kim und Byoung-Kuk Lee. „HILS-based analysis of characteristics and performance of internal combustion engine vehicles with varying battery types“. In: *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. IEEE, 2016, S. 326–331. ISBN: 978-1-5090-1272-5. DOI: 10.1109/ITEC-AP.2016.7512972.
- [74] Johannes Klötzl. „Stabilität automobiler Leistungsbordnetze“. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, 2012.
- [75] Michiel Koot, John Kessels, Maurice Heemels, Paul van den Bosch und Maarten Steinbuch. „Energy Management Strategies for Vehicular Electric Power Systems“. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* Vol. 54. No. 3 (2005), S. 771–782. ISSN: 0018-9545. DOI: 10.1109/TVT.2005.847211.
- [76] Bohdan T. Kulakowski, John F. Gardner und J. Lowen Shearer. *Dynamic modeling and control of engineering systems*. 3rd ed. Cambridge und New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN: 0521864356.
- [77] Alonku Kuperman und Mosheav Averbukh. „Novel equivalent lead-acid battery circuits development with separated simulation of chemical and electrical domains“. In: *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*. IEEE, 2016, S. 1–6. ISBN: 978-9-0758-1524-5. DOI: 10.1109/EPE.2016.7695258.
- [78] Karl Küpfmüller, Wolfgang Mathis und Albrecht Reibiger. *Theoretische Elektrotechnik: Eine Einführung*. 19., aktual. Aufl. 2013. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 3642379400.
- [79] Stefan Kurtz und Hans-Georg Herzog. *Extension of a Powernet Testbench: With a vehicle simulation including environment for a integrated development*. München, 2016. URL: [https://ipg-automotive.com/fileadmin/user\\_upload/content/Download/Media/Presentation/Apply\\_Innovate\\_2016\\_BMW\\_Kurtz.pdf](https://ipg-automotive.com/fileadmin/user_upload/content/Download/Media/Presentation/Apply_Innovate_2016_BMW_Kurtz.pdf) (besucht am 28.12.2016).
- [80] Michel Lemaire, Gernot Pammer und Ben Black. „Smarter drives need smarter development“. In: *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. IEEE, 2016, S. 1–63. ISBN: 978-1-5090-0403-4. DOI: 10.1109/ITEC.2016.7520313.
- [81] LEONI Bordnetz-Systeme GmbH. *Optimierung*. URL: <https://www.leoni-wiring-systems.com/de/maerkte-loesungen/optimierung/> (besucht am 11.11.2017).
- [82] Johannes Liebl. „BMW EfficientDynamics: Wir haben die Segel richtig gesetzt“. In: *Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug V*. Fachbuch / Haus der Technik. Renningen: expert-Verl., 2010, 2010. ISBN: 3816930263.
- [83] Johannes Liebl. „Die Automobilindustrie im Spannungsfeld von Gesetzgebung und Kundenerwartung“. In: *KLIMASCHUTZ und ENERGIEVERSORGUNG*. Hrsg. von Martin Keilhacker. 2006, S. 41–55.

- [84] Johannes Liebl, Matthias Lederer, Klaus Rohde-Brandenburger, Jan-Welm Biermann, Martin Roth und Heinz Schäfer. *Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile*. Atz/Mtz-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 9782658044510.
- [85] Huai-Cong Liu, Geochul Jeong, Sang-hwan Ham und Ju Lee. „Optimal rotor structure design of claw-pole alternator for performance improving using static 3D FEM coupled-circuit model“. In: *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*. IEEE, 2016, S. 1. ISBN: 978-1-5090-1032-5. DOI: 10.1109/CEFC.2016.7816402.
- [86] Jihen Loukil, Ferdaous Masmoudi und Nabil Derbel. „Modeling of internal parameters of a lead acid battery with experimental validation“. In: *13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*. Piscataway, NJ und Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 478–483. ISBN: 978-1-5090-1291-6. DOI: 10.1109/SSD.2016.7473738.
- [87] André Lüdecke. „Simulationsgestützte Verfahren für den Top-Down-Entwurf heterogener Systeme“. Dissertation. Duisburg\–Essen: Universität Duisburg\–Essen, 2003.
- [88] Marco Lunanova. *Optimierung von Nebenaggregaten: Maßnahmen zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emission von Kraftfahrzeugen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009. ISBN: 9783834807304. DOI: 10.1007/978-3-8348-9603-2. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9603-2>.
- [89] Oliver Maiwald und Bernhard Klein. „Neue Potenziale zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung durch Energiemanagement in Mikro- und Mildhybriden“. In: *ATZ* Vol. 11 (2016), S. 54–58.
- [90] Kristin Majetta, Sandra Böhme, Christoph Clauß und Peter Schneider. „MSL Electrical Spice3 - Status and Further Development“. In: *The 8th International Modelica Conference, Technical University, Dresden, Germany*. Linköping Electronic Conference Proceedings. Linköping University Electronic Press, 2011.
- [91] Dan Mihai. „Fuzzy control for temperature of the driver seat in a car“. In: *2012 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*. Hrsg. von Maria Brojboiu. Piscataway, NJ: IEEE, 2012, S. 1–8. ISBN: 978-1-4673-1810-5. DOI: 10.1109/ICATE.2012.6403436.
- [92] Rim Missaoui, Ghaith Warkozek, Seddik Bacha und Stéphane Ploix. „Real time validation of an optimization Building Energy Management strategy based on Power-Hardware-in-the-loop tool“. In: *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*. Piscataway: IEEE, op. 2012, S. 1–7. ISBN: 978-1-4673-2597-4. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465791.
- [93] Maria Rosaria Morena, Robert Krahl und Bernhard Kurz. „Nutzerempfinden des Klimakomforts von Fahrzeugsitzen“. In: *ATZ* Vol. 6 (2012), S. 478–485.

- [94] Laurence William Nagel und Donald O. Pederson. *SPICE: Simulation program with integrated circuit emphasis*. Electronics Research Laboratory, College of Engineering, University of California, 1973.
- [95] National Instruments. *Creating a Distributed System With NI VeriStand*. 2013. URL: <http://www.ni.com/white-paper/11060/en/> (besucht am 28. 12. 2016).
- [96] National Instruments. *Introduction to PXI<sub>mc</sub> - Technology for High Performance Test, Measurement & Control Applications - National Instruments*. 2013. URL: <http://www.ni.com/white-paper/12523/en/> (besucht am 28. 12. 2016).
- [97] National Instruments. *Verwenden der Umgebungsvariablen in LabVIEW*. 2016. URL: <http://www.ni.com/white-paper/4679/de/#toc5> (besucht am 21. 04. 2017).
- [98] NXP Semiconductor. *Alternator regulator with LIN*. 2016. URL: <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/TC80310.pdf> (besucht am 10. 03. 2017).
- [99] Rody Oldenhuis. *GODLIKE - A robust single- & multi-objective optimizer*. 2017-04-13. URL: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24838-godlike-a-robust-single---multi-objective-optimizer> (besucht am 11. 05. 2017).
- [100] On Semiconductor. *Alternator Voltage Regulator FET Driver*. 2015. URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/CS3361-D.PDF> (besucht am 13. 03. 2017).
- [101] Cosimo Palma und Marco Ramononi. „FMI Add-on for NI VeriStand for HiL Simulation“. In: *9th International MODELICA Conference, Munich, Germany*. Linköping Electronic Conference Proceedings. Linköping University Electronic Press, 2012, S. 963–970. DOI: 10.3384/ecp12076963.
- [102] *PCI eXtensions for Instrumentation (PXI)*. 18.10.2012. URL: <http://www.pxisa.org> (besucht am 28. 12. 2016).
- [103] David J. Perreault und Vahe Caliskan. „Automotive Power Generation and Control“. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* Vol. 19. No. 3 (2004), S. 618–630. ISSN: 0885-8993. DOI: 10.1109/TPEL.2004.826432.
- [104] Wolfgang Pester. *Daimler und Renault: Erste 48-Volt-Mildhybride: 48-Volt-Bordnetz*. 2016. URL: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/daimler-und-renault-erste-48-volt-mildhybride-a-560217/> (besucht am 11. 11. 2017).
- [105] Christophe Pillot. „Micro hybrid, HEV, P-HEV and EV market 2012–2025 impact on the battery business“. In: *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, S. 1–6. ISBN: 978-1-4799-3832-2. DOI: 10.1109/EVS.2013.6914818.



- [106] Dieter Polenov, Hartmut Probstle, Andreas Brosse, Gottfried Domorazek und Josef Lutz. „Integration of supercapacitors as transient energy buffer in automotive power nets“. In: *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. IEEE, 2007, S. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2007.4417625.
- [107] Katalin Popovici und Pieter J. Mosterman. *Real-time simulation technologies: Principles, methodologies, and applications / editors, Katalin Popovici and Pieter J. Mosterman*. Computational analysis, synthesis, and design of dynamic systems series. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013. ISBN: 1439847231.
- [108] Katalina Popovici und Pieter J. Mosterman. *Real-Time Simulation Technologies: Principles, Methodologies, and Applications*. CRC Press, 2017. ISBN: 9781439847237. URL: <https://books.google.de/books?id=Gv1zMPbuZqAC>.
- [109] Matthias Rauscher. „Bewertung und Vergleich von Abgaswärmenutzungstechnologien in Kraftfahrzeugen unter Berücksichtigung realer Anwendungsbedingungen“. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, 2015.
- [110] Konrad Reif. *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. 5., überarbeitete Auflage. ATZ-MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 3658050489.
- [111] Konrad Reif, Hrsg. *Batterien, Bordnetze und Vernetzung*. 1. Aufl. Bosch - Fachinformation Automobil. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. ISBN: 3834897132.
- [112] Konrad Reif, Karl-Ernst Noreikat und Kai Borgeest. *Kraftfahrzeug - Hybridantriebe*. Atz/Mtz-Fachbuch. [s.l.]: Vieweg+teubner Verlag, 2013. ISBN: 3834807222.
- [113] Wolfgang Reimann und Ralf Männel. „Verbrauchseinfluss der elektrischen Energie im Fahrzeug“. In: *ATZelektronik* Vol. 3. No. 1 (2008), S. 6–11. ISSN: 1862-1791. DOI: 10.1007/BF03223885.
- [114] Daniel Renner. „Optimierte Betriebsstrategien zur Steigerung von Energieeffizienz und Sicherheit durch kombinierte Systembetrachtung von Bordnetz und Batterie“. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement 4*. Hrsg. von Carsten Hoff und Ottmar Sirch. expert-Verlag, 2015.
- [115] Daniel Renner, Florian Achhammer, Patrick Jansen, David Vergossen, Werner John und Stephan Frei. „Optimization of a 12V dual-battery system for micro-hybrid vehicles“. In: *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*. Institution of Engineering and Technology, 2016, S. 6. ISBN: 978-1-78561-188-9. DOI: 10.1049/cp.2016.0141.
- [116] Daniel Renner, Marcel Dietz, John Werner, Stephan Frei, Patrick Jansen und David Vergossen. „Predictive Power Estimation of Dual Battery Systems in Mild-Hybrid Vehicles“. In: *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, 2016, S. 1–6. ISBN: 978-1-5090-3528-1. DOI: 10.1109/VPPC.2016.7791753.

- [117] Nassim Rizoug, Tedjani Mesbahi, Gilles Feld und Omar Bouhali. „Micro-hybrid vehicle supplied by a multi-source storage system (battery and supercapacitors): optimal power management“. In: *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 7th IET International Conference on*. [Stevenage, Hertfordshire, U.K.]: IET, 2014?, S. 3.2.05–3.2.05. ISBN: 978-1-84919-815-8. DOI: 10.1049/cp.2014.0399.
- [118] Robert Bosch GmbH. *Starter Motors and Generators: Heavy Duty generators – the generator for individual solutions*. Hrsg. von Robert Bosch GmbH. 2014. URL: [http://products.bosch-mobility-solutions.com/media/ubk\\_europe/db\\_application/downloads/pdf/antrieb/en\\_3/Heavy\\_Duty\\_Generator\\_en\\_low.pdf](http://products.bosch-mobility-solutions.com/media/ubk_europe/db_application/downloads/pdf/antrieb/en_3/Heavy_Duty_Generator_en_low.pdf) (besucht am 10.03.2017).
- [119] Florian Ruf. „Auslegung und Topologieoptimierung von spannungsstabilen Energiebordnetzen“. Dissertation. München: Technische Universität München, 2015.
- [120] Florian Ruf, Andreas Barthels, Gregor Walla, Michael Winter, Tom P. Giovanni, Hans-Ulrich Michel, Joachim Froeschl und Hans-Georg Herzog. „Autonomous load shutdown mechanism as a voltage stabilization method in automotive power nets“. In: *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2012, S. 1261–1265. DOI: 10.1109/VPPC.2012.6422712.
- [121] Florian Ruf, Michael Winter, Hans-Ulrich Michel, Joachim Froeschl und Hans-Georg Herzog. „Experimental Investigations on an Autonomous Load Shutdown Mechanism in Respect to Voltage Stability in Automotive Power Nets“. In: *2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2013, S. 1–4. DOI: 10.1109/VPPC.2013.6671733.
- [122] George B. Rutkowski. *Operational Amplifiers: Integrated and Hybrid Circuits*. Wiley, 1993. ISBN: 9780471577188. URL: <https://books.google.de/books?id=uskYzanGfjsC>.
- [123] Dimitrios Sarafianos, Danilo X. Llano, Bo Wen, Timothy J. Flack, Richard A. McMahan und Stephen Pickering. „Control and efficiency analysis for a Lundell-alternator/active-rectifier system in automotive applications“. In: *2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*. IEEE, 2016, S. 1–6. ISBN: 978-1-5090-1546-7. DOI: 10.1109/SPEC.2016.7846089.
- [124] Dimitrios Sarafianos, Richard A. McMahan, Timothy J. Flack und Stephen Pickering. „Characterisation and modelling of automotive Lundell alternators“. In: *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 928–933. ISBN: 978-1-4799-4402-6. DOI: 10.1109/PEDS.2015.7203470.
- [125] Moritz Julian Schindler. „Mehr-Batterie-System für Mikro-Hybrid-Fahrzeuge auf Basis von Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Technologie“. Dissertation. RWTH Aachen, 2014.

- [126] Martin Schloms und Sebastian Martens. *Schienen statt Kabel: Energy Backbone für die Stromverteilung*. [www.elektroniknet.de](http://www.elektroniknet.de), 2015. URL: <http://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/sonstiges/schienen-statt-kabel-124162.html> (besucht am 11. 11. 2017).
- [127] A. Schmitt. *Hochdynamische Power Hardware-in-the-Loop Emulation hoch ausgenutzter Synchronmaschinen mit einem Modularen-Multiphasen-Multilevel Umrichter*. Karlsruher Institut für Technologie, 2017. ISBN: 9783731506348. URL: <https://books.google.de/books?id=XZLUDgAAQBAJ>.
- [128] Dierk Schröder. *Elektrische Antriebe*. 3. überarb. u. erw. Aufl. Springer - Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer, 2012. ISBN: 3642301045.
- [129] Dierk Schröder. *Leistungselektronische Schaltungen: Funktion, Auslegung und Anwendung*. 3., überarb. und erw. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer Berlin, 2012. ISBN: 3642301037.
- [130] Hans Schuster und Housseem Abdellatif. „Modellbasierter Emulator von Traktionsbatterien“. In: *HANSER automotive* Vol. 5-6. No. 5 (2014), S. 52–54.
- [131] Dong-Hyun Shin, Hoon Heo, Tae-Hoon Kim, Hyun-Sik Song, Byoung-Hoon Kim, Jin-Beom Jeong und Baek-Haeng Lee. „Verification of battery system model for environmentally friendly vehicles using a battery hardware-in-the-loop simulation“. In: *IET Power Electronics* Vol. 6. No. 2 (2013), S. 417–424. ISSN: 1755-4535. DOI: 10.1049/iet-pe1.2012.0293.
- [132] Kandler A. Smith, Christopher D. Rahn und Chao-Yang Wang. „Control oriented 1D electrochemical model of lithium ion battery“. In: *Energy Conversion and Management* Vol. 48. No. 9 (2007), S. 2565–2578. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2007.03.015.
- [133] Samantha S. Stephen, Zahi M. Omer, Abbas A. Fardoun und Ala A. Hussein. „Parameter estimation of valve regulated lead acid batteries using meta-heuristic evolutionary algorithm“. In: *2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE, 2016, S. 1–4. ISBN: 978-1-5090-0916-9. DOI: 10.1109/MWSCAS.2016.7870122.
- [134] M. Steurer, C. S. Edrington, M. Sloderbeck, Wei Ren und J. Langston. „A Megawatt-Scale Power Hardware-in-the-Loop Simulation Setup for Motor Drives“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 57. No. 4 (2010), S. 1254–1260. ISSN: 0278-0046. DOI: 10.1109/TIE.2009.2036639.
- [135] Franz Stueckler, Gerhard Noebauer und Kevni Bueyuektas. *Introduction to Infineon's Simulation Models Power MOSFETs*. 2013-09-16. URL: <http://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/power-mosfet-simulation-models/> (besucht am 02. 03. 2017).

- [136] Monica Tutuiianu, Alessandro Marotta, Steven Heinz, Eva Ericsson, Takahiro Haniu, Noriyuki Ichikawa und Hajime Ishii. *Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC)*. 2013. URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp29grpe/GRPE-68-03e.pdf> (besucht am 15.11.2017).
- [137] Moritz Vaillant. „Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0072-506189>.
- [138] Jesus Valenciano, Melchor Fernández, Francisco Trinidad und Leticia Sanz. „Lead-acid batteries for micro- and mild-hybrid applications“. In: *Journal of Power Sources* Vol. 187. No. 2 (2009), S. 599–604. ISSN: 03787753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.11.089.
- [139] Karsten Weicker. *Evolutionäre Algorithmen*. 3., überarb. u. erw. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden und Imprint: Springer Vieweg, 2015. ISBN: 3658099585.
- [140] Bo Wen, Dimitrios Sarafianos, Richard A. McMahon und Stephen Pickering. „Understanding Automotive Electrical Network Voltage Transients“. In: *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*. Institution of Engineering and Technology, 2016, S. 6. ISBN: 978-1-78561-188-9. DOI: 10.1049/cp.2016.0197.
- [141] Norbert Wiener. *Kybernetik - Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und Maschine*. 2. Auflage. Reinbek: Rororo Wissen, 1968.
- [142] Rami Yamin und Ahmed Rachid. „Modeling and Simulation of a Lead-Acid Battery Packs in MATLAB/Simulink: Parameters Identification Using Extended Kalman Filter Algorithm“. In: *2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim)*. Hrsg. von David Al-Dabass. Piscataway, NJ: IEEE, 2014, S. 363–368. ISBN: 978-1-4799-4922-9. DOI: 10.1109/UKSim.2014.68.
- [143] Xin She Yang. *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*. Wiley, 2010. ISBN: 9780470640418. URL: <https://books.google.de/books?id=kTi6ul2g9VYC>.