

Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen

An der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs eingereichte Dissertation

von

Dipl.-Ing.
Stefan Büchner

geboren am 02.03.1977 in Dresden

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss, Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Bernard Bäker, Technische Universität Dresden

Dr.-Ing. E.h. Johannes Liebl, BMW Group München

Tag der Einreichung: 06.05.2008

Tag der Verteidigung: 10.07.2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2008

Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2008

978-3-86727-803-4

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2008

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2008

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-803-4

Vorwort

Während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugmechatronik am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrzeuge der TU Dresden beschäftigte ich mich von 2003 bis Mitte 2006 im Rahmen eines Industrieprojektes mit unterschiedlichen Fragestellungen zum elektrischen Energiemanagement im Kraftfahrzeug. Bereits mit neuen beruflichen Aufgaben befasst, erfolgte während des letzten Jahres eine schriftliche Zusammenfassung der Ergebnisse in der hier vorliegenden Form.

Bedanken möchte ich mich zuerst bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss, welcher mir die Möglichkeit zu dieser interessanten Tätigkeit gegeben und mir in seiner herzlichen Art auch nach seinem Ortswechsel Vertrauen entgegengebracht und mich weiterhin unterstützt hat.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernard Bäker, dem jetzigen Leiter des Lehrstuhls. Seine Offenheit gegenüber meinen Vorstellungen und seine eigenen Erfahrungen auf dem Themengebiet ermöglichten mir die Fortführung und den Abschluss der begonnenen Arbeiten am Institut.

Für das unermüdliche Engagement für die TU Dresden, welche die finanzielle Förderung dieses Projektes durch die BMW AG ermöglichte, möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr.-Ing. E.h. Johannes Liebl bedanken. Sein fachliches Interesse und seine vielfältigen Anregungen bei den Treffen in München und Dresden gaben immer wieder Impulse für neue Forschungsaufgaben.

Meinen ehemaligen Kollegen am Institut, insbesondere den Herren Lutz Morawietz, Stefan Kutter, Dr. Gerhard Hübner, Andreas Zäper, Silvio Risse und Carsten Berger danke ich für die Zusammenarbeit und ihre fachliche Unterstützung, die wesentlich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. Für die gute Zusammenarbeit und zahlreichen Anregungen möchte ich mich ebenfalls bei den Mitarbeitern von BMW, den Herren Dr. Thomas Christ und Sönke Richter, bedanken.

Ein spezieller Dank gilt den Jungingenieuren, welche mich mit ihren studentischen Arbeiten entscheidend unterstützt haben, insbesondere den Herren Stephan Köhler, Matthias Bischoff, Aliaksei Uspenski, Knut Winde und Alexander Salzberg. An dieser Stelle möchte ich mich ebenfalls bei den Mitarbeitern der Institutswerkstatt und Herrn Tomas Ramrath bedanken, welche bei dem Aufbau des Bordnetzprüfstands mitwirkten.

Dank sagen möchte ich auch meinen Eltern, Schwiegereltern und allen Freunden für ihre Unterstützung und ihr Verständnis. Die fachlichen Gespräche mit meinem Vater haben mir immer wieder neuen Antrieb für die Arbeit gegeben. Ein besonders liebes Dankeschön gilt meiner Frau Uta für ihr Verständnis, ihre Ausdauer und Kraft welche sie mir zum Anfertigen dieser Arbeit geschenkt hat.

Dresden, im Mai 2008

Stefan Büchner

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	VIII
Kurzfassung	XI
1 Einführung	1
2 Elektrisches Energiemanagement im Kraftfahrzeug	4
2.1 Eigenschaften des elektrischen Energiebordnetzes	4
2.2 Die Bedeutung elektrischer Energie für den Betrieb von Kraftfahrzeugen	5
2.2.1 Energiebedarf	6
2.2.2 Zukünftige Bordnetzlasten	9
2.2.3 Anforderungen an die Energieversorgung	10
2.3 Energiebordnetzarchitekturen	11
2.3.1 Erzeugertechnologien	12
2.3.2 Speichertechnologien	14
2.3.3 Aufbau moderner Bordnetzarchitekturen	17
2.4 Ansätze für ein Energiemanagementsystem	19
2.4.1 Betriebsstrategie des Gesamtfahrzeugs	19
2.4.2 Freiheitsgrade im Energiesystem	21
2.4.3 Schnittstellen zu den Bordnetzkomponenten	21
2.4.4 Erweiterung der Funktionsstruktur	26
3 Zuverlässige Bereitstellung elektrischer Energie	28
3.1 Übersicht der Strategien	28
3.2 Strategien zur Vermeidung von stationären Leistungsdefiziten	29
3.2.1 Anpassung der Generatorleistung	30
3.2.2 Anpassung der Verbraucherleistung	31
3.3 Intelligente Steuerung von Lastwechseln	32
3.3.1 Eingriffe bei der Energieversorgung	34
3.3.2 Eingriffe durch eine Verbraucheransteuerung	38
4 Effiziente Bereitstellung elektrischer Energie	39
4.1 Übersicht der Strategien	39
4.1.1 Energiewandlungskette im Kraftfahrzeug	40
4.1.2 Strategien zur effizienten Bereitstellung elektrischer Energie	41
4.1.3 Energiewandlungskette zur Erzeugung elektrischer Energie	42

4.2	Analytische Betrachtungen der Wandlungskette	43
4.2.1	Wirkungsgrade am Verbrennungsmotor.....	43
4.2.2	Wirkungsgrade am riemengetriebenen Klauenpolgenerator	48
4.2.3	Aussagen zum Gesamterzeugersystem.....	51
4.3	Simulationsgestützte Optimierung der Wandlungskette.....	53
4.3.1	Evolutionäre Optimierungsalgorithmen	56
4.3.2	Simulationsmodell des elektrischen Energiesystems	58
4.3.3	Optimierung der elektrischen Energieerzeugung	59
4.4	Dynamische Betriebsstrategien.....	65
5	Anwendung ökonomischer Modelle für ein Energiemanagement	68
5.1	Problemstellung wirtschaftswissenschaftlicher Theorien	68
5.2	Neoklassische Markttheorie	70
5.2.1	Spezialisierungen.....	70
5.2.2	Marktwirtschaftliches Konkurrenzgleichgewicht.....	71
5.3	Energiemanagement als Marktmodell	71
5.3.1	Preis-Leistungs-Funktionen der Bordnetzkomponenten	72
5.3.2	Marktgleichgewicht	77
5.3.3	Integration in ein elektrisches Energiemanagement	80
5.4	Auktionstheorie	83
5.4.1	Spezialisierungen.....	83
5.4.2	Strategisches Gleichgewicht.....	85
5.5	Energiemanagement als einseitiges Auktionsmodell.....	86
5.5.1	Gestaltung der Versteigerung	86
5.5.2	Integration in ein elektrisches Energiemanagement	87
5.6	Vergleich der Modelle	89
6	Experimentelle Untersuchungen am Bordnetzprüfstand	91
6.1	Hardware-in-the-Loop-Bordnetzprüfstand als Testumgebung	91
6.1.1	Übersicht zur Struktur und zum Aufbau.....	92
6.1.2	Nachbildung des Kfz-Bordnetzes	94
6.1.3	Bedienung und Steuerung.....	97
6.2	Untersuchungen zu dynamischen Lastwechseln.....	98
6.2.1	Aufbau und Durchführung der Experimente	98
6.2.2	Ergebnisse und Auswertung	101
6.3	Integration eines elektrischen Energiemanagements	103
6.3.1	Funktionen zur Energieversorgung.....	104
6.3.2	Funktionen zur Energieverteilung	105
6.3.3	Erprobung und Bewertung.....	106

7 Zusammenfassung und Ausblick	111
A Anhang	114
A.1 Symbole der Leistungsflussdiagramme nach Bouscayrol.....	115
A.2 Kennlinien des 14 V Compact-Klauenpolgenerators.....	116
A.3 Wirkungsgrade zur Erzeugung elektrischer Energie.....	118
A.4 Linearisierung der Willans-Kennlinie.....	120
A.5 Angaben zur Optimierung mit genetischen Algorithmen.....	121
A.6 Anhang zur Anwendung ökonomischer Modelle.....	130
A.7 Kenndaten und Modelle des Bordnetzprüfstands.....	134
A.8 Messergebnisse zu dynamischen Lastwechseln.....	139
Literaturverzeichnis	144

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Physikalische Größen

Symbol	Einheit	Beschreibung
B	g/s, m ³ /s	Kraftstoffverbrauch
C	As/V	elektrische Kapazität
H_{ks}	J/g, J/m ³	spezifischer Heizwert
I	A	elektrische Stromstärke
J	gm ²	Trägheitsmoment
M	Nm	Drehmoment
n	1/s	Drehzahl
P	W	Leistung
Q	As	Nennkapazität einer Batterie (vgl. [Hen90])
t	s	Zeit
T	s	Zeitkonstante
\mathbf{u}	-	Abschnitt 4.3: Schaltvektor
U	V	elektrische Spannung
\ddot{u}	-	Übersetzungsverhältnis
α_{DK}	°	Drosselklappenwinkel
$\Delta\eta$	-	Delta-Wirkungsgrad
Φ	Vs	magnetischer Fluss
ϑ	°C	Temperatur
ϕ_z	°	Zündwinkel
η	-	Wirkungsgrad
η_{ges}	-	Wirkungsgrad zur elektrischen Energieerzeugung als zusätzliche Energiewandlung „sekundärer“ Endenergie
λ	-	Wichtungsfaktor
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit

Wirtschaftswissenschaftliche und monetäre Größen

Symbol	Einheit	Beschreibung
b	€	Budget
E	€	Erlös
G	€	Gewinn
K	€	Kosten
p	€	Warenpreis (Stückpreis)
u	-	Nutzen
W	-	Wohlfahrtsfunktion
x	-	Nachfragemenge
y	-	Angebotsmenge
σ	-	Aggregierte Nachfragemenge

Indizes

Index	Beschreibung
Bat	Batterie
el	elektrisch
err	Erregung
Fzg	Fahrzeug
G	Getriebe
Gen	Generator
ges	Gesamterzeugersystem (siehe η_{ges})
ks	Kraftstoff
$Last$	Last, Verbraucher
max	maximal
min	minimal
NA	Nebenaggregate (ohne Generator)
$Netz$	Bordnetz (bezogen auf Batterieklemmen)
$Nutz$	nutzbar
R	Riementrieb
$SCAP$	SuperCap-Modul
$soll$	Sollwert
V	Verlust
VM	Verbrennungsmotor
zu	zugeführt

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AC	Alternating Current, Wechselstrom
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub
AGM	Absorbed Glass Mat, verschlossener Bleibatterietyp (Vliesbatterie)
AP	Arbeitspunkt
BNC	Bayonet Neill Concelman (koaxialer Steckverbinder)
BSD	Bitserieller Datenbus
CAN	Controller Area Network (serielles Bussystem)
CO ₂	Kohlendioxid
CVT	Continuous Variable Transmission (stufenloses Getriebe)
DC	Direct Current, Gleichstrom
DF	Dynamo-Feld: Klemmenbezeichnung der Erregerspule am Generatorregler, auch Bezeichnung für die Reglerstellgröße
DME	Digitale Motorelektronik
DMS	Dehnmessstreifen
EEM	Elektrisches Energiemanagement
FES	Frühes Einlassschließen, Steuerart des vollvariablen Ventiltriebs
HiL	Hardware-in-the-Loop (Entwicklungs-Testsystem)
HV	Hochvolt, Bezeichnung im Kfz-Bereich für Spannungen ab 60 V
IBS	Intelligenter Batteriesensor
LIN	Local Interconnect Network (serielles Bussystem)
LL	Motorleerlauf
LRC	Load Response Control, Parameter zur Anstiegsbegrenzung der Stellgröße im Generatorregler
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
PWM	Pulsweitenmodulation
SOC	State of Charge, Ladezustand eines Energiespeichers
SOF	State of Function, Leistungsvermögen eines Energiespeichers
SuperCap	Super-Capacitor (elektrochemischer Doppelschichtkondensator)
VM	Verbrennungsmotor
VRLA	Valve-Regulated Lead Acid (verschlossene Bleibatterien)
VVT	Vollvariabler Ventiltrieb

Kurzfassung

Die elektrische Energieform gewinnt im Kraftfahrzeug wegen ihrer Nutzungsvielfalt und sehr guten Steuerbarkeit für die Realisierung neuartiger Funktionen zunehmend an Bedeutung. Voraussetzung für ihren Einsatz ist eine zuverlässige und effiziente Bereitstellung durch das Kfz-Energiebordnetz. Dafür ist ein intelligentes Energiemanagement erforderlich, welches mit geeigneten Strategien die Leistungsflüsse im Energiesystem koordiniert.

In dieser Arbeit werden die beiden Entwurfsziele der Zuverlässigkeit und der Effizienz bei der Entwicklung von elektrischen Energiemanagement-Strategien systematisch betrachtet. Es erfolgt eine Beschreibung und Zuordnung der einzelnen Ziele und Maßnahmen anhand der Energieflüsse und Wirkungsketten. Ein Schwerpunkt bildet dabei die Beherrschung von Lastwechseln im Bordnetz. Für Aussagen hinsichtlich einer effizienten Erzeugung elektrischer Energie erfolgt eine Untersuchung der Energiewandlungskette anhand analytischer Methoden und mit Hilfe einer simulationsgestützten Optimierung. Ein weiterer Fokus der Arbeit liegt in der Betrachtung zur Anwendung ökonomischer Modelle für eine Energiekoordination. Es werden die theoretischen Grundlagen der Mikroökonomie zusammengestellt und mögliche Funktionsstrukturen eines einseitigen und zweiseitigen Allokationsmechanismus verglichen und bewertet. Abschließend zeigen experimentelle Untersuchungen an einem Bordnetzprüfstand zum Lastwechselverhalten und die Integration eines Energiemanagement-Systems den praktischen Bezug zum realen System.

1 Einführung

Der massive Zuwachs des individuellen Mobilitätsbedarfs von Personen und Gütern und der Siegeszug der Elektronik in technischen Systemen führten in den letzten Jahrzehnten zu einer fortdauernden Weiterentwicklung des Kraftfahrzeugs. Die Entwicklung innovativer Funktionen wird dabei vor allem durch die gesetzlichen Richtlinien für Sicherheit, Emissionen und Kraftstoffverbrauch vorangetrieben. Andererseits wird den zusätzlichen Kundenwünschen nach gesteigertem Komfort und hoher Fahrdynamik nachgegangen.

Ein wesentlicher Aspekt der Funktionsentwicklung stellt die Frage nach einer optimalen Form der Energiebereitstellung zur Erfüllung der gewünschten Funktionen dar. Da die Energieerzeugung im Kraftfahrzeug gegenwärtig fast ausschließlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger erfolgt, wird Kohlendioxid (CO₂) freigesetzt. Mit den aktuellen Veröffentlichungen der Klimaforschung [Ipcc07] ist die Diskussion um eine Reduzierung der CO₂-Emissionen wieder stärker in den Vordergrund gerückt. Vor dem zusätzlichen Hintergrund der endlichen Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe werden daher in Politik und Gesellschaft vermehrt neue umwelt- und ressourcenschonende Technologien unter anderem im Bereich der Kraftfahrzeugtechnik gefordert. Die gesetzliche Zielvorgabe zur weiteren Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von zugelassenen Neuwagen in der EU bis zum Jahr 2012 durch die Europäische Kommission löste eine kontrovers geführte Debatte um die Möglichkeiten und Grenzen der fahrzeugtechnischen Maßnahmen aus [Acea07], [Got07], [Bund07]. Auf eine detaillierte Darlegung der Argumentation wird an dieser Stelle verzichtet. Es ist jedoch offensichtlich, dass eine umweltgerechte Mobilität nur durch weitere zusätzliche Elemente erreicht werden kann, welche in Bild 1.1 zusammengefasst sind.

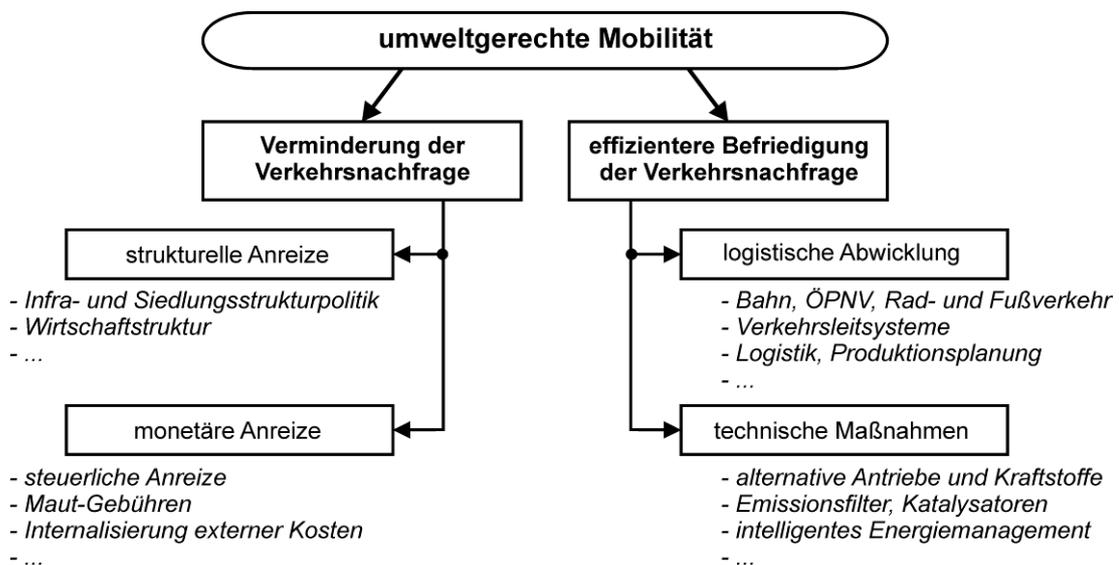


Bild 1.1: Elemente umweltgerechter Mobilität nach [Bmu07]

Es ist festzustellen, dass die Sensibilisierung der Kunden für energieeffizientere Fahrzeuge stärker in den Vordergrund rückt. Dies zeigt sich beispielsweise in der speziellen Kennzeichnung von Fahrzeugen oder durch Bewertung ihrer Umweltfreundlichkeit in den Medien bzw. in Vergleichslisten unabhängiger Institutionen [Dat07].

Im Hinblick auf technische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Kraftfahrzeugen wird neben den so genannten Biokraftstoffen der elektrischen Energie eine wesentliche Schlüsselrolle zugerechnet [Ble05]. Grund dafür ist neben ihrer Nutzungsvielfalt und sehr guten Steuerbarkeit die Möglichkeit, sie mit umweltfreundlichen sowie zukunftsweisenden Technologien bereitzustellen [Cra04]. Die Funktionsentwicklung im Kfz konzentriert sich aktuell auf hybride Antriebskonzepte mit elektrischen Maschinen sowie die Nutzung elektrischer Energie zum Betrieb von Neben- bzw. Zusatzaggregaten. Ziel ist dabei häufig die Entkopplung von Funktionen vom Betrieb des Verbrennungsmotors.

Voraussetzung für den Einsatz elektrischer Energie im Kraftfahrzeug ist eine zuverlässige und effiziente Bereitstellung durch das Kfz-Energiebordnetz. Dies stellt bei vielen neuartigen Funktionen mit hoher Stelldynamik eine Herausforderung dar, da diese häufig neben einem zusätzlichen Energiebedarf kurzfristig enorme Spitzenleistungen benötigen. Dafür sind geeignete Strategien zu entwickeln, welche mit einem elektrischen Energiemanagement (EEM) zur Koordination der Leistungsflüsse im Energiesystem realisiert werden [Chr04], [Büc05a].

Bei der Entwicklung von Energiemanagement-Strategien sind eine Vielzahl von Randbedingungen vorgegeben (Bild 1.2), welche einen Zielkonflikt darstellen. Einige Einflussfaktoren sind im Voraus bekannt und können im Designentwurf und während der Fahrzeugentwicklung berücksichtigt werden. Andere Faktoren werden jedoch erst im Fahrbetrieb wirksam und sind dadurch im Funktionsentwurf mit Unsicherheiten behaftet. Die ingenieurtechnische Aufgabe besteht in der Konzeption geeigneter Bordnetzarchitekturen im Zusammenspiel mit intelligenten EEM-Funktionen zur Steuerung der Energieflüsse, um die Zielvorgaben möglichst optimal zu erfüllen.

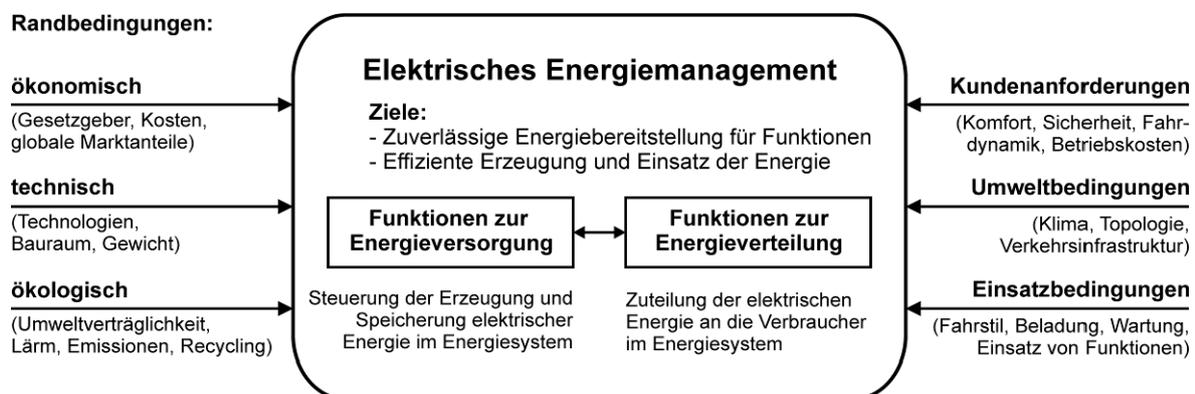


Bild 1.2: Ziele und Randbedingungen eines elektrischen Energiemanagements

Zielstellung und Aufbau der Arbeit

In dieser Arbeit werden die beiden Entwurfsziele der Zuverlässigkeit und der Effizienz bei der Entwicklung von Energiemanagement-Strategien untersucht. Ziel ist eine systematische Zusammenstellung und Einordnung der einzelnen Maßnahmen. Inhaltliche Schwerpunkte bilden dabei die Beherrschung von Lastwechseln im Bordnetz und die Wirkungsgradoptimierung der Energiewandlungskette durch eine Lastpunktverlagerung. An einem Bordnetzprüfstand erfolgen experimentelle Untersuchungen für einige Strategien sowie die Erprobung eines einfachen elektrischen Energiemanagements. Ein weiterer Fokus der Arbeit ist die Betrachtung ökonomischer Modelle für die Verwendung in einem Energiemanagement. Mit der Darstellung von wirtschaftswissenschaftlichen Theorien werden die Gemeinsamkeiten des Allokationsproblems in der Mikroökonomie und im Energiemanagement aufgezeigt. Dabei wird auf die Umsetzung eines einseitigen und eines zweiseitigen Allokationsmechanismus eingegangen und deren Vor- und Nachteile diskutiert.

Zu Beginn wird in Kapitel 2 eine Übersicht über aktuelle und zukünftige elektrische Energiebordnetzarchitekturen im Kfz gegeben. Es erfolgt eine Einordnung des elektrischen Energiemanagements in die Betriebsstrategie des Gesamtfahrzeugs mit möglichen Freiheitsgraden und zugehörigen Schnittstellen zum elektrischen Energiebordnetz.

Kapitel 3 betrachtet Aspekte zur zuverlässigen Bereitstellung elektrischer Energie und systematisiert die einzelnen Lösungsansätze. Es erfolgt eine Beschreibung und Zuordnung der einzelnen Ziele und Maßnahmen anhand der Energieflüsse und Wirkungsketten.

Anschließend wird in Kapitel 4 die Effizienz der Energiewandlungskette zur Bereitstellung elektrischer Energie im Kfz mit Hilfe analytischer Methoden und dem Einsatz einer simulationsgestützten Optimierung näher untersucht. Dabei wird das Kraftstoffeinsparpotential einer Lastpunktverlagerung durch zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Nutzung elektrischer Energie analysiert.

Kapitel 5 gibt einen Exkurs in die Mikroökonomie und zeigt interessante Perspektiven für den Entwurf eines elektrischen Energiemanagements auf Grundlage ökonomischer Modelle. Es werden die theoretischen Grundlagen zusammengestellt und mögliche Funktionsstrukturen eines einseitigen und zweiseitigen Allokationsmechanismus in der Anwendung eines Energiemanagements verglichen und bewertet.

Den praktischen Bezug zum realen System stellen die experimentellen Untersuchungen am Bordnetzprüfstand in Kapitel 6 dar. Neben Messungen zum Systemverhalten bei Lastwechseln im Bordnetz wird die Integration eines elektrischen Energiemanagements beschrieben und bewertet.

Kapitel 7 fasst die Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick für zukünftige Forschungsarbeiten auf dem Gebiet. Im Anhang werden detaillierte Modellbeschreibungen und Mess- bzw. Simulationsergebnisse gezeigt. Zudem sind weiterführende Exkurse zu ausgewählten Themen aufgeführt, welche sonst die Übersichtlichkeit der einzelnen Kapitel einschränken würden.

2 Elektrisches Energiemanagement im Kraftfahrzeug

Ausgehend von den Vorzügen der elektrischen Energieform zur Umsetzung von Fahrzeugfunktionen wird in diesem Kapitel der aktuelle und zukünftige elektrische Energiebedarf in Kraftfahrzeugen aufgezeigt. Danach werden wesentliche Erzeuger- und Speicherkomponenten sowie Topologievarianten für moderne Energiebordnetzarchitekturen vorgestellt. Daraufhin werden die Anforderungen und Freiheitsgrade eines elektrischen Energiemanagements im Zusammenhang mit Betriebsstrategien für das Gesamtfahrzeug präzisiert. Notwendige Schnittstellen zu den Bordnetzkomponenten werden erläutert. Abschließend wird vorgeschlagen, wie durch eine einheitliche Schnittstelle die bestehende Funktionsstruktur um ein elektrisches Energiemanagement (EEM) erweitert werden kann.

2.1 Eigenschaften des elektrischen Energiebordnetzes

Die wesentlichen Komponenten des heute üblichen elektrischen Energiebordnetzes im Kfz werden in Bild 2.1 gezeigt. Es handelt sich um ein lokales Energiesystem, welches folgende allgemeine Eigenschaften aufweist (vgl. [Hab04]):

- Es ist (zumeist) nur ein Energieerzeuger im System vorhanden. Seine Erzeugungsmenge ist vom Betrieb des Verbrennungsmotors abhängig und schwer prognostizierbar. Er wird überwiegend in Teillast betrieben.
- Ein leistungsfähiger Energiespeicher ist zwingend zur Zwischenspeicherung notwendig, um Lastspitzen auszugleichen und die Versorgung zu übernehmen, wenn der Erzeuger nur ungenügend oder keine Leistung bereitstellen kann.
- Das Zu- bzw. Abschalten einzelner Verbraucher hat großen Einfluss auf die Leistungsbilanz. Es treten große relative Änderungsgeschwindigkeiten im Lastgang auf, die Anzahl an Schalt- und Regelvorgängen ist verhältnismäßig hoch. Ein hoher stochastischer Anteil im Lastbedarf erschwert eine Prognose.

Eine hohe Versorgungssicherheit im Energiesystem ist deshalb nur mit hohem technischem Aufwand erreichbar. Zum einen ist es möglich, die Versorgungskomponenten mit genügend Leistungsreserve auszulegen. Auf Grund technischer Randbedingungen ist dieser Ansatz jedoch nur begrenzt anwendbar. Deshalb ist der Einsatz eines elektrischen Energiemanagements erforderlich. Dieses kann durch intelligente Steuerung der Leistungsflüsse zusätzlich zur Verbesserung der Versorgungssicherheit beitragen.

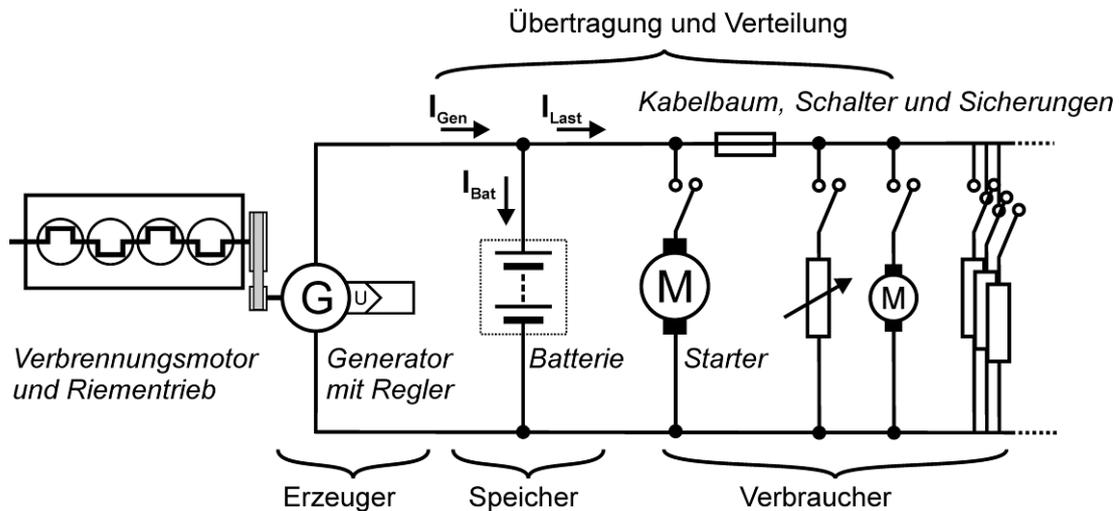


Bild 2.1: Schematischer Aufbau des elektrischen Energiebordnetzes im Kfz

2.2 Die Bedeutung elektrischer Energie für den Betrieb von Kraftfahrzeugen

Zu den ursprünglichen Verbrauchern des elektrischen Energiebordnetzes gehörten Zündung, Starter und Lichtanlage. Vor diesem historischen Hintergrund lassen sich die umgangssprachlichen Bezeichnungen Lichtmaschine und Starterbatterie für Generator und Fahrzeugbatterie ableiten. Schon sehr bald kamen immer neue Komponenten hinzu, welche neben der Effizienz des Verbrennungsmotors auch die Fahrsicherheit und den Fahrkomfort deutlich verbesserten. Mit der rasanten Entwicklung der Elektronik erfolgte der große Durchbruch zu mechatronischen Lösungen. Sie ergänzen oder ersetzen zunehmend rein mechanische Systeme, da mit ihnen ein präziseres und flexibleres Stellen möglich ist. Auf diese Weise kann die Funktionalität bei gleichzeitiger Wirkungsgradsteigerung erweitert bzw. verbessert werden. Dabei spielt die elektrische Energie nicht nur zur Versorgung von Sensoren und informationsverarbeitenden Komponenten eine entscheidende Rolle, sondern wird auch bevorzugt als Endenergie für die Aktorik eingesetzt (Bild 2.2). Die Vorteile der elektrischen Energieform ergeben sich aus ihren Eigenschaften:

- Gute Verteilbarkeit: schnell, zuverlässig, sauber, verlustarm
- Sehr gute Steuerbarkeit: schnell und präzise messbar, steuerbar, regelbar
- Sehr gute Nutzbarkeit: lässt sich in alle Nutzenergieformen umwandeln
- Gute Speicherfähigkeit: je nach Technologie mit unterschiedlicher Energie- und Leistungsdichte

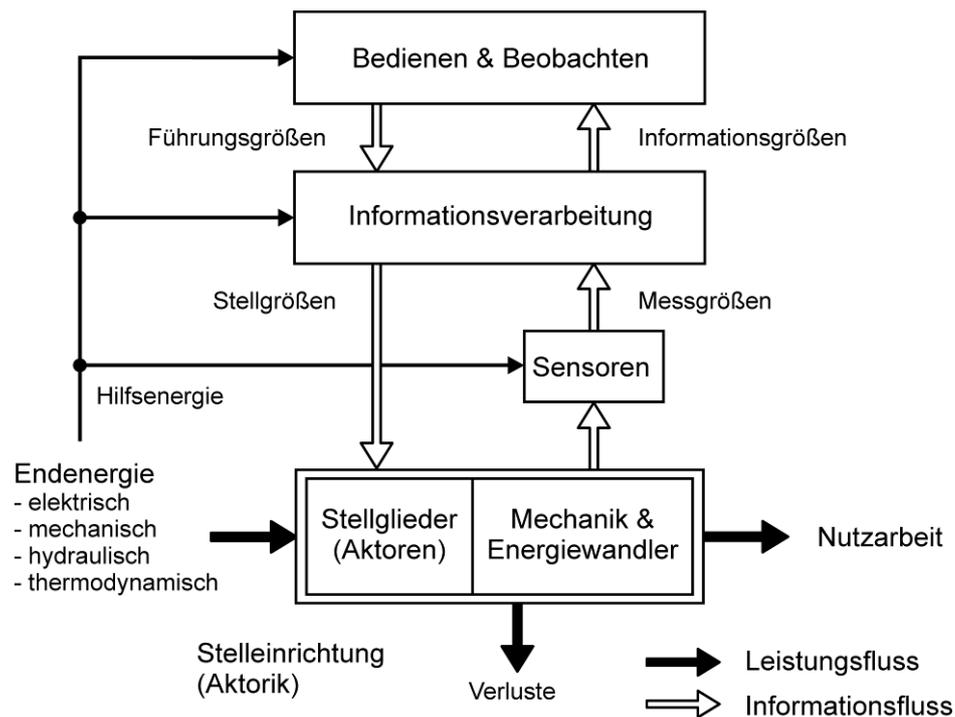


Bild 2.2: Leistungs- und Informationsfluss in geregelten mechatronischen Systemen

Ein gutes Beispiel für den erfolgreichen Einsatz mechatronischer Systeme ist die Entwicklung in der Motorsteuerung. Die Komponenten, welche für das Betreiben des Verbrennungsmotors notwendig sind, wurden nach und nach durch elektrische Sensorik und Aktorik sowie eine immer komplexer werdende Steuerung und Regelung ergänzt. Mit Hilfe dieser Elektronik ist es möglich, den Motor im aktuellen Arbeitspunkt in Bezug auf Leistungsabgabe, Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen zu optimieren. Dass die Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist, zeigen z. B. die aktuellen Forschungen am elektromechanischen Ventiltrieb [Pis07].

Die Anzahl von Sicherheits-, Komfort- und Informationssystemen ist schon heute je nach Fahrzeugkategorie und -ausstattung beträchtlich. Es ist dabei zu beobachten, dass zunehmend mehr Komponenten dieser Art zur Serienausstattung von Fahrzeugen gehören. Auf diesem Gebiet ist ein sehr großes Wachstumspotential an elektrischen Verbrauchern zu sehen, als Stichworte seien z. B. x-by-wire (elektrisches Lenken und Bremsen), aktive Fahrwerksregelung, Fahrerassistenzsysteme und Infotainment genannt.

2.2.1 Energiebedarf

Die Energiedienstleistungen bzw. Nutzprozesse (vgl. Bild 4.2), welche im Fahrzeug benötigt werden, erfüllen prinzipiell zwei Hauptaufgaben:

- Dienstleistungen zur Transportaufgabe des Fahrzeugs (Antreiben, Bremsen, Lenken, Fahrsicherheit)
- Dienstleistungen zur Unterstützung der Sicherheit und des Komforts der Insassen (u. a. Insassenschutz, Sitzpositionsverstellung, Klimatisierung, Telematiksysteme)

Der elektrische Energiebedarf richtet sich nach der technischen Realisierung der einzelnen Funktionen. Wie bereits ausgeführt, ist er in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen. Dies spiegelt sich in der installierten Generatorleistung und Batteriekapazität wieder, wie in Bild 2.3 für Beispielfahrzeuge aus zwei unterschiedlichen Fahrzeugklassen gezeigt wird. Dabei ist auffällig, dass bei dem Mittelklassefahrzeug je nach Motorisierung und Ausstattungsgrad die Leistungsfähigkeit der Energieversorgungs-komponenten stärker variiert. Bei Fahrzeugen der Oberklasse kamen schon sehr zeitig Generatoren mit hohen Leistungen zum Einsatz. Hier stellt die zur Verfügung stehende Technologie die Leistungsgrenze dar. Die wachsende Batteriegröße lässt darauf schließen, dass hier in stärkerem Maße Energieengpässe auftreten, welche durch den Speicher abgedeckt werden müssen¹.

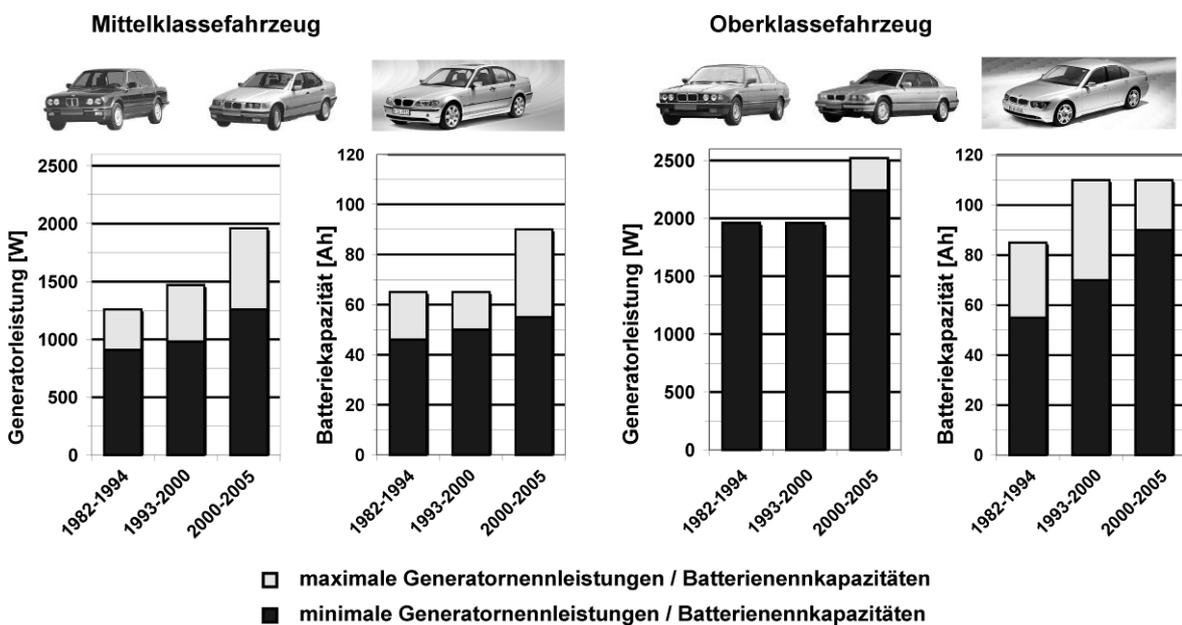


Bild 2.3: Entwicklung der Leistungsfähigkeit von Generator und Batterie am Beispiel eines Mittelklassefahrzeugs und eines Oberklassefahrzeugs, Werte nach [Bmw05]

In Tabelle 2.1 sind die wesentlichen elektrischen Verbraucher im Fahrzeug aufgelistet. Die angegebene Leistungsaufnahme und Betriebsdauer dienen dabei als Ausgangspunkt zur Bestimmung des elektrischen Energiebedarfs [Bos07]. Der Grundlastbedarf beträgt je nach Motorart und -größe zwischen 300 W und 500 W. Zur Abschätzung des maximalen Gesamtleistungsbedarfs ist es notwendig, die gleichzeitig aktiven Verbraucher in Abhängigkeit des Betriebsszenarios zu ermitteln. Dabei ist zu beachten, dass durch den hohen Vernetzungsgrad moderner Fahrzeuge das Ausführen einer Funktion sehr häufig die gleichzeitige Aktivierung einer Vielzahl von elektrischen Verbrauchern zur Folge hat.

¹ Ein weiterer Grund sind die größeren Motorhubräume, wodurch höhere Startleistungen notwendig sind.

Tabelle 2.1: Leistungsbedarf und Einschaltdauer herkömmlicher Bordnetzverbraucher, Werte aus [Bos07] und [Büc06a]

Verbraucher nach Funktionalität		mittlerer Leistungsbedarf	Einschaltdauer
<i>Motormanagement und Antriebsstrang</i>			
	Steuergeräte / Motorsteuerung	175 – 200 W	Dauerbetrieb
	Elektrische Kraftstoffpumpe	50 – 100 W	Dauerbetrieb
	Kraftstoffeinspritzung	50 – 70 W	Dauerbetrieb
	Zündanlage (Ottomotor)	20 W	Dauerbetrieb
	Elektrisches Kühlergebläse	200 – 800 W	Langzeitbetrieb
	Sekundärlufteinblasung	400 – 600 W	Kurzzeitbetrieb
	Startanlage	800 – 3000 W	Kurzzeitbetrieb
<i>Beleuchtung</i>			
	Abblendlicht	100 – 120 W	Langzeitbetrieb
	Fernlicht	120 – 140 W	Langzeitbetrieb
	Nebelschlussleuchte / Nebelscheinwerfer	je 35 – 55 W	Langzeitbetrieb
	Rückfahrcheinwerfer	je 20 W	Kurzzeitbetrieb
	Brems- und Blinkleuchten	je 20 W	Kurzzeitbetrieb
	Innenraumbelichtungen	10 – 20 W	Kurzzeitbetrieb
<i>Sicherheitssysteme (Insassensicherheit, Fahrsicherheit)</i>			
	Scheibenwischer Frontscheibe	80 – 150 W	Langzeitbetrieb
	Heckscheibenwischer	30 – 65 W	Kurzzeitbetrieb
	Scheibenwaschanlage	50 – 100 W	Kurzzeitbetrieb
	Heckscheibenheizung	200 W	Kurzzeitbetrieb
	Fanfare	60 – 80 W	Kurzzeitbetrieb
<i>Komfortsysteme / Informationssysteme</i>			
	Innenraumgebläse	100 – 400 W	Dauerbetrieb
	Sitzheizung	je 100 – 200 W	Kurzzeitbetrieb
	Lenkradheizung	50 – 80 W	Kurzzeitbetrieb
	Elektrische Zusatzheizung	300 – 2000 W	Kurzzeitbetrieb
	Elektrische Sitzverstellung	je 100 – 150 W	Kurzzeitbetrieb
	Elektrische Spiegelverstellung	je 20 W	Kurzzeitbetrieb
	Elektrische Lenksäulenverstellung	25 – 50 W	Kurzzeitbetrieb
	Elektrischer Fensterheber	je 150 W	Kurzzeitbetrieb
	Elektrisches Schiebedach	150 – 200 W	Kurzzeitbetrieb
	Elektrischer Türöffner	je 30 W	Kurzzeitbetrieb
	Elektrischer Heckklappenöffner	100 W	Kurzzeitbetrieb
	Autoradio	15 – 500 W	Langzeitbetrieb
	Navigations- und Kommunikationssysteme	15 – 20 W	Langzeitbetrieb

Das Betriebszenario wird durch Umweltbedingungen und Fahrerwünsche stark beeinflusst, deshalb wird bei der Bordnetzdimensionierung beispielsweise zwischen einem Winter- und Sommerszenario unterschieden [Bäk98], [Fab06]. Die individuellen Einflussmöglichkeiten der Fahrzeuginsassen ergeben sich vor allem aus den im Fahrzeug vorhandenen Komfort- und Informationssystemen. Da viele Verbraucher nur für kurze Zeit betrieben werden, unterliegt der Leistungsbedarf großen Schwankungen.

Für die Realisierung eines stabilen Energiebordnetzes müssen weitere spezielle Charakteristika der Verbraucher in Bezug auf die Leistungsaufnahme beachtet werden:

- Schaltverhalten:
Dynamik, Einschaltleistungen, Lastabwurfverhalten, Maximalleistungen
- Art der Ansteuerung / Betriebsweise:
kontinuierlich oder getaktet, geregelt oder ungeregelt
- externe Störeinflüsse:
z. B. Temperatur, Lastmomente bei Stellmotoren (z. B. veränderliche Reibung oder sich ändernde Gewichte bewegter Massen)

Der Energiebedarf ist während der Fahrt nicht konstant. In den ersten Minuten der Fahrzeugnutzung ist die Anzahl der aktiven Lasten besonders hoch. Dies resultiert zum einen aus Maßnahmen des Motormanagements in der Warmlaufphase des Verbrennungsmotors, zum anderen werden in diesem Zeitraum durch die Fahrzeuginsassen vermehrt elektrische Funktionen genutzt, beispielsweise zur Anpassung der Sitzpositionen oder zur Klimatisierung des Fahrgastraumes. Da die Fahrzeugbatterie nach dem Motorstart verstärkt geladen wird, ergibt sich ein zusätzlicher Energiebedarf. Eine besondere Rolle wird den Phasen des Motorstillstands zugerechnet, da hier die Versorgung aus der Fahrzeugbatterie erfolgen muss. Der Energiebedarf während der Vorlaufphase, Nachlaufphase und im Ruhezustand hängt stark vom Ausstattungsgrad und der Motorisierung ab [LS06].

2.2.2 Zukünftige Bordnetzlasten

Die meisten Systeme stellten bisher nur geringe Anforderungen bezüglich ihrer transienten Energieaufnahme. Wegen der hohen Dynamik vieler mechatronischer Systemlösungen werden in Zukunft jedoch diesbezüglich sehr hohe Anforderungen an die Energieversorgung gestellt werden, wie in Bild 2.4 symbolisch dargestellt ist. Des Weiteren hat die verstärkte Ausrichtung auf alternative Antriebskonzepte mit Elektromotoren einen sprunghaften Bedarfsanstieg zur Folge, wie Tabelle 2.2 zeigt.

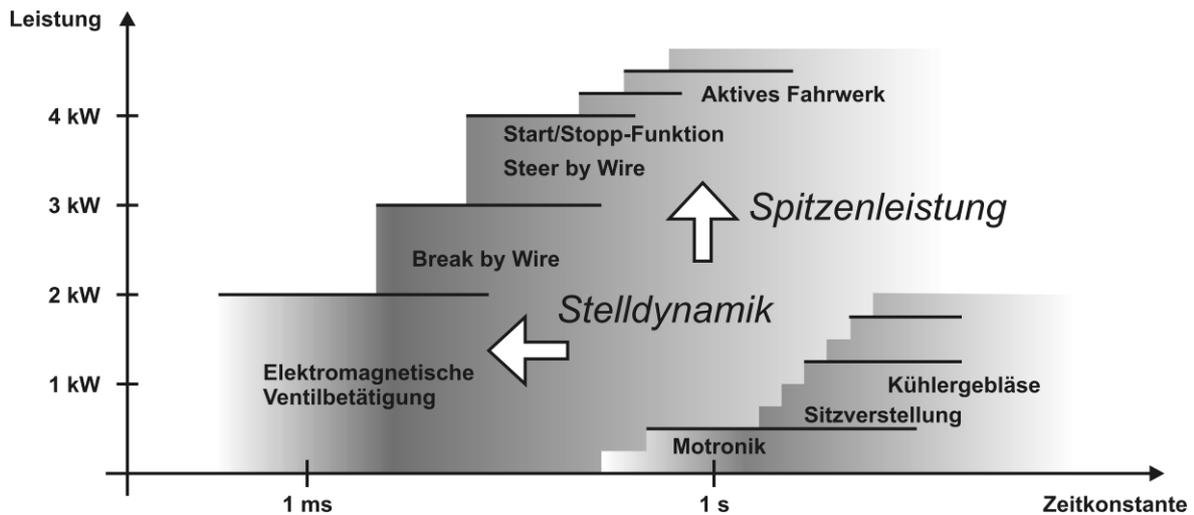


Bild 2.4: Entwicklungstendenzen in der Leistungsdynamik elektrischer Systeme [Jun04]

Tabelle 2.2: Klassifikation von Hybridantrieben nach Leistung und Funktionen

Bezeichnung	Elektrische Maschine		Funktionen im Antriebsstrang			
	Leistung	Spannung	Start/Stopp	Rekuperatives Bremsen	Motorunterstützung	Elektrisches Fahren
Micro Hybrid	bis 5 kW	14 V	ja	minimal	minimal	nein
Mild / Medium Hybrid	bis 20 kW	42-144 V	ja	ja	begrenzt	nein
Full Hybrid	ca. 50 kW	> 200 V	ja	ja	ja	ja
Power Hybrid	bis 200 kW	> 200 V	ja	ja	ja	ja

2.2.3 Anforderungen an die Energieversorgung

Da keine Anbindung zu anderen elektrischen Netzen existiert (mit Ausnahme der Starthilfe), erfordert dies eine ausgewogene Leistungsbilanz zwischen Generator, Batterie und Verbrauchern im Energiebordnetz. Es gilt nach Bild 2.1:

$$P_{el,Gen} = P_{el,Bat} + P_{el,Last} \quad (2.1)$$

Die Energieversorgung ist so auszulegen, dass Funktion und Betriebssicherheit des Fahrzeugs jederzeit gegeben sind. Die wichtigsten Aspekte sind [Hen90]:

- Der Verbrennungsmotor muss innerhalb vorgegebener Grenzen gestartet werden können (ausreichende Leistungsfähigkeit der Batterie und begrenzter Ruhestrom).
- Im Fahrbetrieb ist für eine ausreichende Versorgung der Verbraucher und das Nachladen der Batterie durch den Generator zu sorgen (positive Ladebilanz).
- Bei Motorstillstand sollen elektrische Standverbraucher noch eine angemessene Zeit mit Energie aus der Batterie betrieben werden können.
- Die von den Lasten geforderte Spannungsqualität muss eingehalten werden.

- Defekte Lasten sind sicher und schnell vom Bordnetz zu trennen, ohne den Betrieb weiterer Systeme zu beeinträchtigen.

Die Spannungsanforderungen im 14V-Bordnetz² sind prinzipiell mit den in Bild 2.5 dargestellten Eckwerten vorgegeben. Durch die schwache Netzcharakteristik treten häufig Spannungsschwankungen auf, welche zur Beeinträchtigung von Funktionen führen können. Zahlreiche Lasten sind aus Kostengründen direkt am Versorgungsnetz angeschlossen, deshalb sind die resultierenden Leistungsschwankungen teilweise durch den Fahrer wahrnehmbar und werden als Komforteinbuße betrachtet.

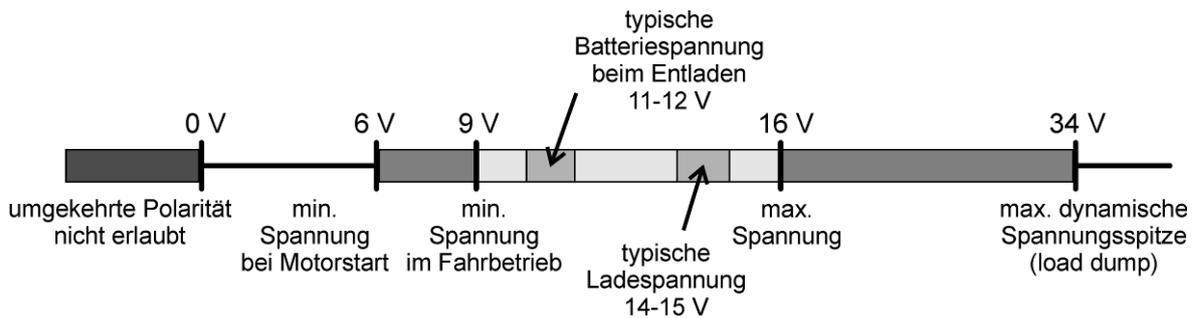


Bild 2.5: Spannungseckwerte im 14V-Bordnetz nach [Bmw05]

2.3 Energiebordnetzarchitekturen

Die Energiebordnetzarchitekturen setzen sich aus den eingesetzten Versorgungskomponenten und der Topologie bzw. Verteilungsstruktur zusammen. Obwohl sich die Architektur aus Bild 2.1 in den letzten Jahrzehnten auf Grund ihrer Einfachheit bewährt hat, bedingen die neuen Anforderungen den Einsatz neuer Technologien und Erweiterungen. Die Einführung neuer Bordnetzarchitekturen wird durch folgende Entwicklungsziele vorangetrieben:

- Beherrschung höherer Leistungen,
- Verbesserung der Energieeffizienz,
- Erhöhung der Bordnetzstabilität,
- Gewährleistung der Systemsicherheit zur Einführung sicherheitskritischer Funktionen sowie
- Konzepte zur Rückgewinnung von Bremsenergie.

Im Folgenden werden aktuelle und zukunftsweisende Technologien zur Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie im Kfz kurz vorgestellt. Im Anschluss daran wird gezeigt, welche Ansätze für moderne Bordnetzarchitekturen existieren.

² Im Folgenden werden die Bordnetze nach den Generatorennennspannungen bezeichnet. Für das 14V-Bordnetz existiert auch die geläufige Bezeichnung „12V-Bordnetz“. Dies entspricht der Nennspannung der (Blei-Säure) Batterie.

2.3.1 Erzeugertechnologien

Die Erzeugung elektrischer Energie erfolgt mit Generatoren, welche einen Teil der mechanischen Energie an der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors in elektrische Energie umwandeln. Alternative Erzeugertechnologien wie z. B. die Brennstoffzelle befinden sich noch im Erprobungsstadium.

Klauenpolgeneratoren

Im Pkw eingesetzte Generatoren sind heute Synchronmaschinen in Klauenpolbauart. Die aktuellen luftgekühlten Compact-Generatoren mit Nennleistungen bis zu 3,2 kW sind das Ergebnis einer langjährigen, kontinuierlichen Entwicklung. Diese Maschinenart ermöglicht eine robuste, kompakte und zugleich kostengünstige Bauweise. Um bereits bei geringen Motordrehzahlen hohe Leistungen zu erzielen, werden sehr hohe Drehzahlen³ und typischerweise 6 oder 8 Polpaare verwendet. Zur weiteren Erhöhung der Leistungsdichte wurden insbesondere die Wicklungstechnologie, der magnetische Kreis und die Kühlung optimiert. Die Gleichrichtung erfolgt über eine Sechspulsbrücke mit Leistungszenerdioden zur Unterdrückung von kurzzeitigen Überspannungen.

Um trotz der auftretenden Störungen (Antriebsdrehzahl, Bordnetzlast, Temperatur) eine konstante Ausgangsspannung zu gewährleisten, wird der Erregerstrom in einem Regelkreis gestellt. Moderne Generatorregler besitzen neben dem diskreten Regelalgorithmus weitere Funktionsmodule zur Umschaltung zwischen verschiedenen Betriebsarten, Stellgrößenbegrenzung, Diagnose und Busankopplung [Hen90], [Bos07] (Bild 2.6).

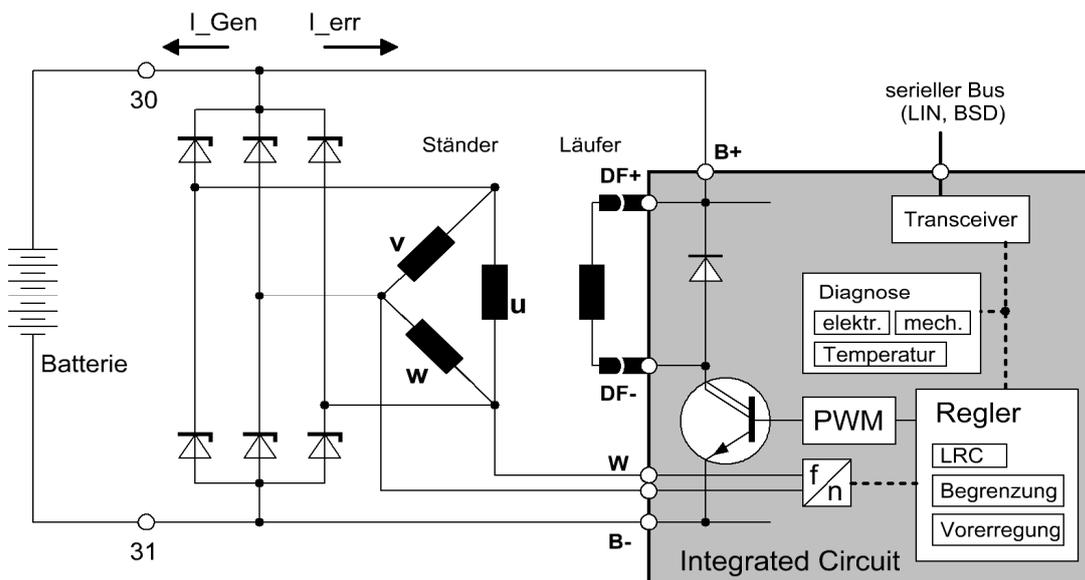


Bild 2.6: Funktioneller Schaltplan eines Drehstromgenerators mit Regler

³ Die Generatordrehzahl ergibt sich aus dem Übersetzungsverhältnis im Riementrieb, typischerweise zwischen 2.5:1 bis 3:1. Die Nenndrehzahl ist mit 6000 min^{-1} festgelegt, die Maximaldrehzahl moderner Generatoren beträgt ca. 20000 min^{-1} .

Als größte Problematik bei der Gestaltung von Kfz-Generatoren erweist sich die Forderung nach einer hohen Leistungsabgabe im gesamten Arbeitsbereich bei einer Spreizung der Antriebsdrehzahl bis zu 1:12. Folgende Möglichkeiten zur Leistungsoptimierung werden in der Literatur vorgestellt:

- Verwendung variabler Polradspannungen: Zur Anpassung der Ausgangsspannung sind hierfür entweder eine aktive Brückenschaltung oder DC-Chopper-Beschaltungen notwendig [Per04]. Durch die Gewinnung des neuen Freiheitsgrades kann die Polradspannung in Abhängigkeit von der Antriebsdrehzahl kontinuierlich an die maximal mögliche Generatorleistung angepasst werden.
- Wicklungsumschaltung zwischen der Serien-/Parallelschaltung von zwei gleichen Statorwicklungssystemen: Ansätze für eine stoßarme Umschaltung werden in [Hof01] vorgestellt. Durch die Umschaltung kann bei höheren Drehzahlen die Ausgangsleistung verdoppelt werden, ohne die Einsatzdrehzahl⁴ zu beeinflussen. Ein ähnliches Ergebnis kann mit einem Zwischenabgriff im Statorwicklungssystem erreicht werden [Lia99]. Die Umschaltung bewirkt in beiden Fällen eine deutliche Verringerung der Eisenverluste bei hohen Drehzahlen durch die Reduzierung der stromführenden Windungen.
- Einsatz von stufenlosen oder mehrstufigen Getrieben oder die Verwendung von Kupplungen mit drehzahlabhängigem Schlupf: Die starre Drehzahlkopplung zum Verbrennungsmotor wird aufgehoben [Bäk98]. Dabei ist es wichtig, die möglichen Vorteile mit den entstehenden Verlusten im Übertragungselement genau abzuwägen.

Elektrische Maschinen in Hybridantrieben

In Hybridantrieben werden die elektrischen Maschinen sowohl im motorischen Betrieb zum Fahrzeugantrieb als auch im generatorischen Betrieb eingesetzt, um die elektrische Energieversorgung sicherzustellen und kinetische Energie beim Bremsen zu rekuperieren⁵. Je nach Antriebskonzept werden sie dabei in einer oder beiden Leistungsrichtungen betrieben [Fre06]. Auf Grund der Anforderungen an Antriebsstrangintegration⁶, Wirkungsgrad und Steuerbarkeit kommen bevorzugt permanenterregte Synchronmaschinen aber auch Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufer und bürstenlose Gleichstrommotoren in Frage. Die Auslegung, Bemessung und Optimierung von Maschinenkonstruktionen mit den zugehörigen leistungselektronischen Stellgliedern für die vielfältigen Aufgaben im Antriebsstrang ist Gegenstand aktueller Forschungen [Kub06], [Sat06]. Die Synchronmaschine besitzt dabei die höhere Leistungsdichte und den höheren Wirkungsgrad, während die Asynchronmaschine sich durch geringere Fertigungskosten und bessere thermische Stabilität auszeichnet [Fre06].

⁴ Drehzahl, ab der die Generatorspannung die angeschlossene Gleichspannung der Batterie übersteigt und der Generator Strom an das Bordnetz abgeben kann [Hof01].

⁵ Mit Rekuperation (lat. zurückgewinnen) ist im Folgenden die Bremsenergieerückgewinnung gemeint.

⁶ Wichtige Kriterien sind Bauraum, Masse-Leistungsverhältnis, thermische und mechanische Stabilität.

Mit der Integration leistungsstarker Maschinen in den Antriebsstrang kann eine komfortable Start/Stop-Funktionalität realisiert werden [Mer06], [Jon07]. Im Bild 2.7 sind unterschiedliche Anordnungen von Starter-Generatoren als mögliche Varianten im parallelen Hybridantrieb dargestellt⁷. Ziel ist dabei, auf die herkömmliche Startanlage zu verzichten.

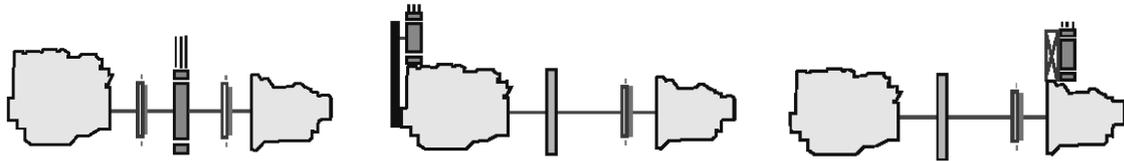


Bild 2.7: Beispiele unterschiedlicher Anordnungen von Starter-Generatoren [Bis99]: koaxial (Kurbelwellen-Starter-Generator), achsparallel (riemengetriebener Starter-Generator) und Anbindung über Getriebe

Brennstoffzellen

Wasserstoff kann in Zukunft eine interessante Alternative für Kraftstoffe darstellen, weil er aus verschiedensten Primärenergieträgern hergestellt werden kann (vgl. Bild 4.2) und im Vergleich zu elektrochemischen Speichern wesentlich höhere spezifische Energiedichten besitzt. Zudem ermöglichen Brennstoffzellen auf Basis von Wasserstoff eine emissionsfreie Erzeugung elektrischer Energie. Bei Verwendung eines Reformers können ebenfalls herkömmliche Kraftstoffe eingesetzt werden. Obwohl schon über längere Jahre auf dem Gebiet intensiv geforscht wird, ist bisher ein Serieneinsatz aus technologischen, infrastrukturellen und wirtschaftlichen Gründen noch nicht abzusehen. Jedoch stellt die vom Verbrennungsmotor unabhängige Erzeugung elektrischer Energie aus Kraftstoffen auch für herkömmliche Antriebssysteme eine interessante Variante dar [Wal06], [Gar02].

2.3.2 Speichertechnologien

Seit nahezu einhundert Jahren werden als Energiespeicher im Bordnetz Bleibatterien⁸ eingesetzt. Trotz der begrenzten Lebensdauer und mäßigen Gebrauchseigenschaften hinsichtlich masse- und volumenbezogener Leistungs- und Energiedichten kann sie sich gegenüber anderen Technologien aufgrund ihrer hohen Wirtschaftlichkeit behaupten. Dies liegt vor allem an den niedrigen Material- und Fertigungskosten, aber auch an den etablierten Recyclingprozessen, in denen über 95% der gebrauchten Batterien wieder verwendet werden [Wal06].

Eine Schlüsselrolle für die Einführung neuer elektrischer Funktionen im Kraftfahrzeug wird der Energiespeicher haben. In Bild 2.8 sind verschiedene elektrochemische Energiespeicher anhand ihrer spezifischen Energie- und Leistungsdichte klassifiziert. Es ist zu erkennen, dass die Bleibatterie gegenüber anderen Batterietechnologien in Bezug auf das

⁷ Häufig werden bereits Starter-Generatoren *ohne* Antriebsunterstützung als „Micro-Hybride“ bezeichnet, z. B. der riemengetriebene Klauenpolgenerator mit Start/Stop-Funktion (ohne Motorkaltstart).

⁸ Es handelt sich um sekundäre Batterien (Akkumulatoren), da die Speicherreaktionen reversibel sind.

Speicher- und Leistungsvermögen Nachteile aufweist. Eine weitere Einsatzgrenze für Bleibatterien stellen ihre geringe Zyklenfestigkeit und schlechte Verträglichkeit von niedrigen Ladezuständen dar. Für einige Anwendungen, speziell im Traktionsbordnetz von Hybridantrieben, zählen deshalb NiMH-Batterien, Li-Ionen-Batterien und Doppelschichtkondensatoren zu den erfolgversprechenden Alternativen.

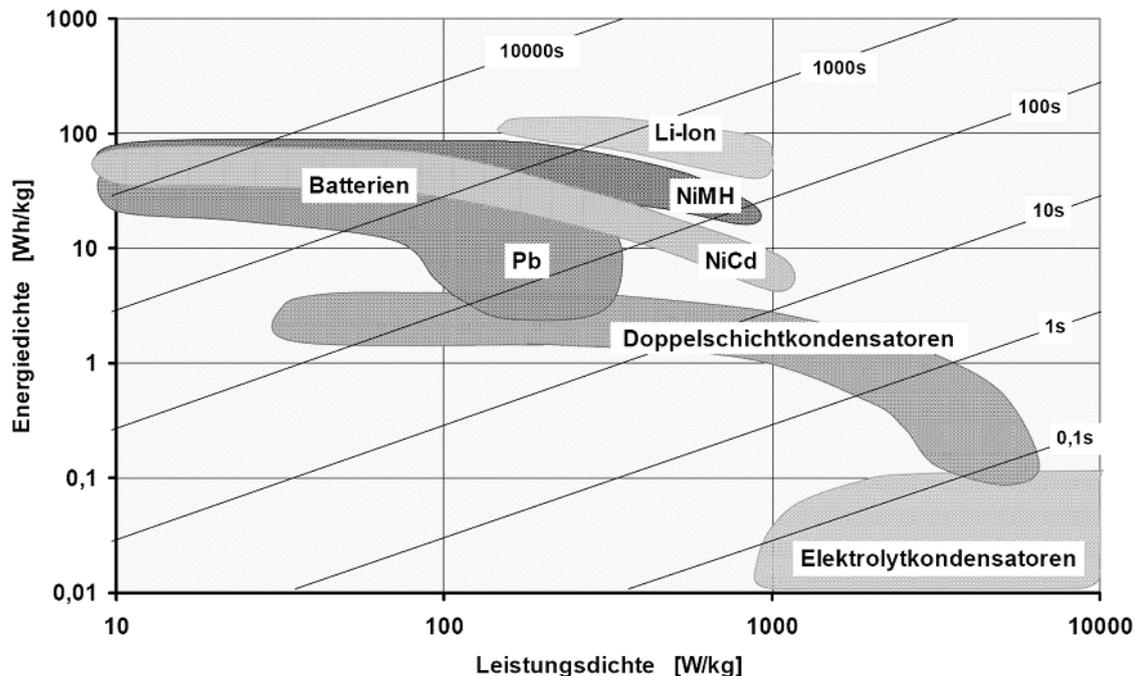


Bild 2.8: Klassifikation elektrischer Energiespeicher im Ragone-Diagramm [Wai04]

Ein Vergleich mit der spezifischen Energiedichte chemischer Speichermedien verdeutlicht jedoch die Notwendigkeit des hybriden Antriebsstrangs als Zwischenlösung vor der Einführung rein elektrischer Fahrzeugantriebe: In Kraftstoffen lässt sich bei gleicher Masse etwa 1000-mal mehr Energie speichern als in elektrochemischen Speichern [Win03].

Die meisten neuartigen Batterietechnologien erfordern aus Sicherheitsgründen ein Batteriemangement mit Temperatur- und Spannungsüberwachung der einzelnen Zellen. Gerade bei der Bildung von seriellen Zellmodulen für höhere Nennspannung sind Maßnahmen für eine gleichmäßige elektrische und thermische Belastung der einzelnen Zellen erforderlich, um eine optimale Leistungsfähigkeit und hohe Lebensdauer zu ermöglichen sowie einen sicheren Betrieb zu gewährleisten [Hei07].

Verschlossene Bleibatterien

Als VRLA-Batterien (Valve-Regulated Lead Acid) werden verschlossene wartungsfreie Bleibatterien bezeichnet. Sie weisen gegenüber der klassischen Bleibatterie mit flüssigem Elektrolyten deutliche Verbesserungen in Bezug auf Zyklenfestigkeit, Tiefentladefähigkeit und dynamischem Ladeakzeptanzverhalten auf. Durch die Festlegung des Elektrolyten entweder in Glasfaservlies (AGM – Absorbed Glass Mat) oder als Gel mit Hilfe von Kieselsäure wird ein geschlossener Sauerstoffkreislauf zwischen den Elektroden und damit

eine nahezu vollständige Rekombination zu Wasser ermöglicht. Dadurch wird im Normalbetrieb kein Wasser verbraucht und es tritt nur eine geringe Gasung auf [Wag02]. Die Gel-Technologie kommt insbesondere bei hohen Anforderungen an die Lebensdauer und bei starken zyklischen Anforderungen zum Einsatz, nachteilig ist ihr etwas höherer Innenwiderstand. Demgegenüber besitzt die AGM-Technologie hervorragende Eigenschaften in Bezug auf das Leistungsabgabe- und Aufnahmevermögen. Deshalb wird sie trotz höherer Kosten bereits in einigen Fahrzeugen in Serie eingesetzt, unter anderem auch für die Micro-Hybridfunktionen Start/Stop und rekuperatives Bremsen [Lie06], [Neu07].

NiMH-Batterien, Li-Ionen-Batterien

Als Traktionsbatterie sind seit einigen Jahren in Hybridfahrzeugen Nickel-Metall-Hybrid-Batterien (NiMH) erfolgreich im Einsatz. Sie zeichnen sich gegenüber AGM-Batterien durch deutlich höhere Zyklisierbarkeit und höhere Energiedichten aus. Nachteilig sind ihr schlechtes Verhalten bei extremen Temperaturen und eine hohe Selbstentladerate. Die Verwendung preisintensiver Rohstoffe lässt ihr Kosteneinsparungspotential schrumpfen.

Hingegen werden für Li-Ionen-Batterien langfristig höhere Chancen für eine kostengünstigere Massenfertigung eingeräumt. Die fortschreitende Materialentwicklung bietet ein hohes Potential zur Verbesserung von Energieinhalt, Leistung, Lebensdauer und Sicherheit. Wegen der überlegenen Speichereigenschaften wird ihr Einsatz in Hybridfahrzeugen stark vorangetrieben [Kar07], [Wal06].

Doppelschichtkondensatoren

Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren, auch als Ultrakondensatoren oder SuperCaps bezeichnet, sind Kondensatoren, welche sich durch extrem hohe Kapazitätswerte auszeichnen. Die Energiespeicherung erfolgt in der Grenzfläche zwischen den Elektroden und den im Elektrolyt gelösten Ionen, welche sich als Dipole an den hochporösen Elektrodenwänden anlagern. Die Kombination aus großen Oberflächen und sehr geringen Dicken des Dielektrikums ergibt die enormen Kapazitätswerte. An den beiden Elektroden entsteht jeweils eine Doppelschicht mit entgegengesetzter Polarität, an denen ein Teil der Gesamtspannung des SuperCaps abfällt. Zwischen den beiden Elektroden befindet sich eine Membran (Separator), welche die Ionen durchlässt, aber elektrisch isoliert [Köt02]. Auf Grund der elektrostatischen Energiespeicherung und geringer Innenwiderstände ergibt sich im Vergleich zu Batterien ein wesentlich besseres Leistungsaufnahme- und Abgabeverhalten mit hohen Wirkungsgraden, welches sich bei tiefen Temperaturen nur leicht verringert. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist ihre hohe zyklische Lebensdauer. Sie sind daher für den Einsatz als kurzzeitiger Energiepuffer prädestiniert. Da sich die Lebensdauer bei überhöhten Betriebstemperaturen und -spannungen deutlich verringert, sind bei SuperCap-Modulen eine Zellüberwachung und entsprechende Beschaltung zur Zellsymmetrierung⁹

⁹ Mit Maßnahmen zur Zellsymmetrierung wird eine gleichmäßige Verteilung der Modulspannung auf die in Reihe geschalteten Einzelzellen erreicht. Überspannungen an den Einzelzellen werden verhindert, die sich sonst auf Grund von Fertigungstoleranzen, unterschiedlicher Alterung und Betriebstemperaturen der einzelnen Zellen im Modul ergeben.

erforderlich [Lin03]. Bei der Integration in Energiebordnetze ist zu beachten, dass eine Energiespeicherung bzw. -entnahme mit einer Änderung der Klemmenspannung verbunden ist. In [Büc03] werden prinzipielle Anbindungsvarianten vorgestellt.

In den letzten Jahren erschienen zahlreiche Veröffentlichungen zum prototypischen Einsatz von SuperCaps in Kraftfahrzeugen, beispielsweise als Leistungsstütze in Elektrofahrzeugen im Verbund mit einer Batterie [Hei07] oder Brennstoffzelle [Gar02] bzw. in Hybridantrieben mit einem Starter-Generator [Kno03]. Die Verwendung von SuperCaps zur Speicherung von Bremsenergie werden in [Chr06] unter Nutzung verschiedener Bordnetztopologien als vorteilhaft bewertet. Für den Serieneinsatz von SuperCaps im Kraftfahrzeug ist allerdings eine deutliche Kostenreduktion bei der Herstellung erforderlich. Außerdem existieren Bedenken hinsichtlich der Sicherheit, da der heute bevorzugte Elektrolyt Acetonitril toxische Eigenschaften aufweist [Kar07].

2.3.3 Aufbau moderner Bordnetzarchitekturen

Obwohl schon vor einiger Zeit die Einführung höherer Nennspannungen von 42 V im Gesamtbordnetz proklamiert wurde [Har00], [Gra01], findet bis heute das 14V-Bordnetz eine breite Verwendung. Es zeichnet sich durch sein hervorragendes Kosten/Nutzen-Verhältnis aus, da zahlreiche technologisch ausgereifte Komponenten existieren. Leistungsstarke, wirkungsgradoptimierte Klauenpolgeneratoren und die VRLA-Batterietechnologien zeigen, dass zusammen mit einem elektrischen Energiemanagement und kleineren Architekturweiterungen viele Anwendungen mit dem 14V-Bordnetz am wirtschaftlichsten gestaltet werden können. Weiterhin ist von großem Vorteil, dass wegen der kleinen Spannungen keine besonderen Schutzeinrichtungen sowie Maßnahmen zur Vermeidung von Spannungsüberschlägen erforderlich sind.

Die Erhöhung der Systemzuverlässigkeit ist mit der Erweiterung um einen zweiten Energiespeicher möglich, wie es bereits in einigen Fahrzeugen der Oberklasse realisiert ist. Damit ist die Startfähigkeit des Verbrennungsmotors trotz Fehlfunktionen oder Überforderung durch Bordnetzlasten gewährleistet. Beide Speicher können für ihre jeweilige Aufgabe besser abgestimmt werden, so ist beispielsweise der Einsatz eines SuperCaps anstelle der Startbatterie denkbar. Die Anbindung leistungsintensiver Verbraucher in einer 42V-Ebene kann über einen Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler) erfolgen, wie in Bild 2.9 gezeigt. Integriert man einen zusätzlichen leistungsfähigen Energiespeicher zur kurzzeitigen Energiepufferung, so kann die Maximalleistung des Wandlers begrenzt werden. Für eine hohe Funktionssicherheit ist der Einsatz eines redundanten DC/DC-Wandlers erforderlich. Für spannungsempfindliche Verbraucher im 14V-Bordnetz werden bereits heute separate Spannungsregler eingesetzt, deren Bedeutung z. B. für zukünftige Start/Stop-Anwendungen zunehmend wichtiger wird [Prö08], [Weg07], [Gae05].

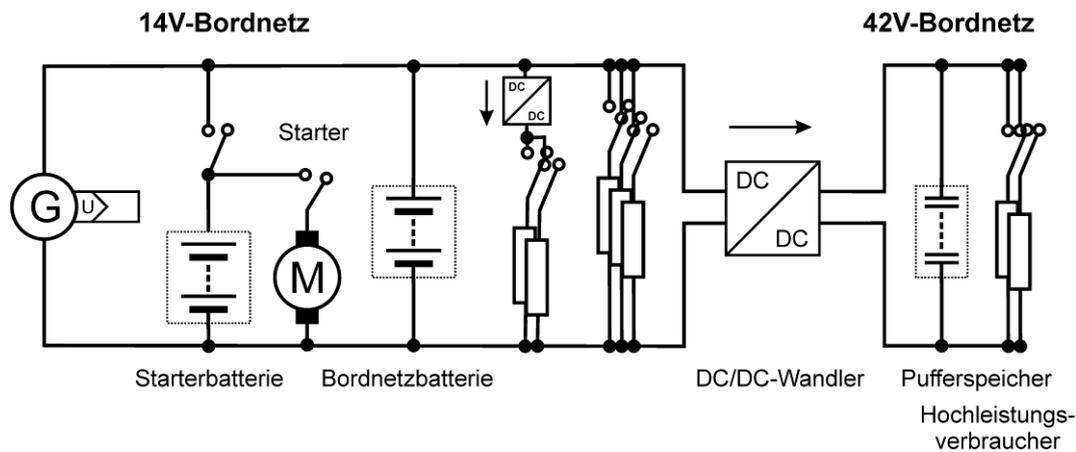


Bild 2.9: Erweitertes 14V-Bordnetz mit separater Startbatterie und integrierten 42V-Hochleistungsverbrauchern

Starter-Generatoren mit höheren Leistungen, wie sie in Mild-Hybridantrieben eingesetzt werden, erfordern höhere Betriebsspannungen. Es werden Nennspannungen von 42 V bevorzugt, da bei dieser Spannung sich zum einen bereits wesentliche Vorteile für die Eigenschaften der Leistungshalbleiter ergeben [Gra01] und zum zweiten noch keine aufwendigen Schutzmaßnahmen gegen direktes und indirektes Berühren erforderlich sind. Die Anbindung herkömmlicher Verbraucher des 14V-Bordnetzes ist über einen DC/DC-Wandler gewährleistet, wie in Bild 2.10 dargestellt. Ist dieser bidirektional ausgeführt, kann der Speicher im 42V-Bordnetz für einen Motorstart von der Bordnetzbatteie geladen werden. Als Speichertechnologien kommen Batterien oder duale Speichereinheiten mit zusätzlichem SuperCap-Modul in Frage [Kno03]. Spannungstolerante Hochleistungs-verbraucher können direkt im 42V-„Leistungs“-Bordnetz eingebunden werden, dadurch wird die Spannungsqualität im 14V-„Energie“-Bordnetz verbessert.

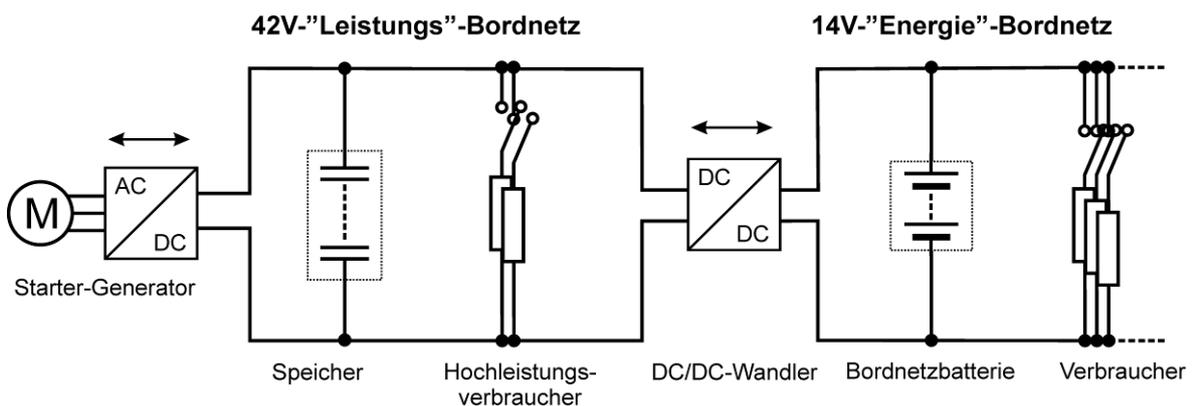


Bild 2.10: Duales Bordnetz 42V/14V mit Starter-Generator

Die jüngste Markteinführung von Full-Hybrid-Fahrzeugen erforderte den Serieneinsatz von Hochvolt-Systemen¹⁰ (HV-Systemen) mit Batterienennspannungen bis ca. 300 V. Hier müssen zusätzliche Schutzmaßnahmen und spezielle Netzformen eingesetzt werden [Büc06c]. Die Ankopplung der anderen Spannungsebenen erfolgt über DC/DC-Wandler.

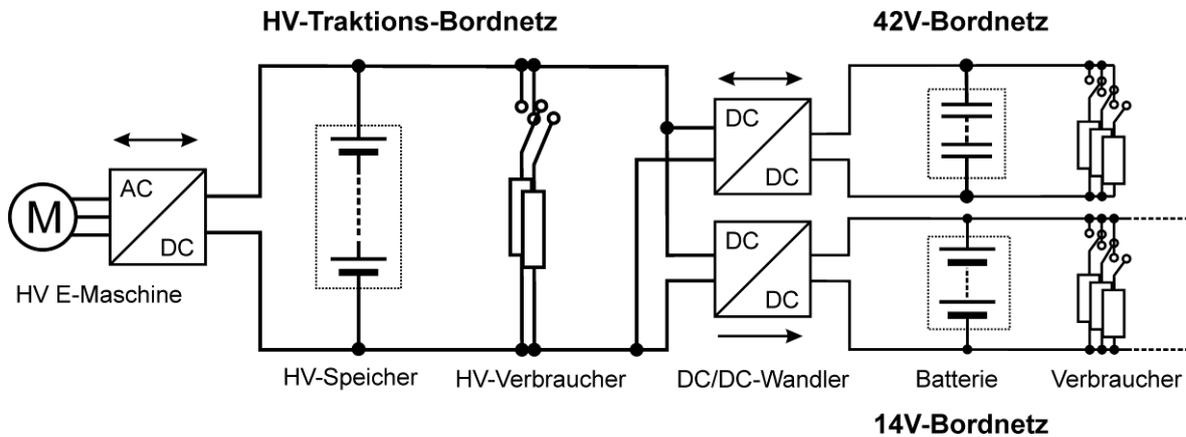


Bild 2.11: Mehrspannungsbordnetz eines Hybridantriebs (HV – Hochvolt)

2.4 Ansätze für ein Energiemanagementsystem

Die vielseitigen Anforderungen der Nutzer an das Kraftfahrzeug erfordern eine Vielzahl von Funktionen, welche an unterschiedliche Teilsysteme gebunden sind. Zur Ausführung der Funktionen muss eine geeignete Energieform bereitgestellt werden. Bislang wurden häufig die einzelnen Teilsysteme für sich betrachtet. Über Zustandserkennungen der betroffenen Komponenten und mit weiteren externen Informationen wurde versucht, eine in sich geschlossene optimale Steuer-/Regelstrategie zu finden. Da die Teilsysteme untereinander gekoppelt sind, kann es jedoch bei Überschneidungen von Funktionsmengen und Energiemengen zu Zielkonflikten im Gesamtsystem kommen. Deshalb steht heute der Ansatz eines Funktions- und Energiemanagements für das Gesamtsystem Kraftfahrzeug immer mehr im Vordergrund. Die übergeordnete Koordination sämtlicher Funktionen und Teilsysteme zu einem möglichst optimalen Betrieb des Gesamtfahrzeugs unter den gegebenen Randbedingungen und Anforderungen wird dabei oftmals als Betriebsstrategie¹¹, bezeichnet. Auf Grund des steigenden Anteils elektrischer Funktionen stellt das elektrische Energiemanagement (EEM) einen wesentlichen Bestandteil der Betriebsstrategie dar.

2.4.1 Betriebsstrategie des Gesamtfahrzeugs

In Bild 2.12 ist die Einordnung des EEM in die Betriebsstrategie des Gesamtfahrzeugs dargestellt. Die Betriebsstrategie ist in die beiden Komponenten eines Funktions- und

¹⁰ In Kraftfahrzeugen werden Spannungssysteme über 60 V Gleichspannung als Hochvolt-Systeme bezeichnet. Dies entspricht der Spannungsklasse B nach DIN EN 1987-3.

¹¹ Dieser Begriff wird als Kurzform für die präzisere Bezeichnung „Betriebsführungsstrategie“ verwendet.

Energiemanagements untergliedert, wie nachfolgend erläutert wird. Auf Grund der Anforderungen des Fahrers bzw. der Insassen werden die betreffenden Funktionen koordiniert und zugehörige Energieformen vom Energiesystem angefordert. Dabei müssen zahlreiche Bedingungen zum sicheren und effizienten Betrieb unter Berücksichtigung externer Restriktionen eingehalten werden.

Aus *energetischer* Sicht sind der Systemzustand des Energiesystems sowie die Restriktionen, welche vom System gegeben sind, von entscheidender Bedeutung. Diese müssen entweder aus entsprechenden Sensordaten oder aus a priori Informationen und geeigneten Beobachtern gewonnen werden. Die Systemrestriktionen ergeben sich aus der Architektur und den aktuellen Betriebsgrenzen der Aktorik. Dabei kann zwischen konstanten sowie zeit- und prozessabhängigen Begrenzungen unterschieden werden [Kut06]. Darunter zählen beispielsweise Maximaldrehzahlen, Dauerdrehmomente, Überlastfähigkeit und Maximaltemperaturen von elektrischen Maschinen oder Nennkapazität, Kälteprüfstrom, Elektrolyttemperatur und Ladezustand einer Batterie. Die entsprechende Aktorik verwendet zur Funktionserfüllung einen Teil der im Fahrzeug gespeicherten Sekundärenergie zur Erfüllung der Energiedienstleistung (vgl. Bild 4.2). Diese Nutzprozesse sind immer verlustbehaftet.

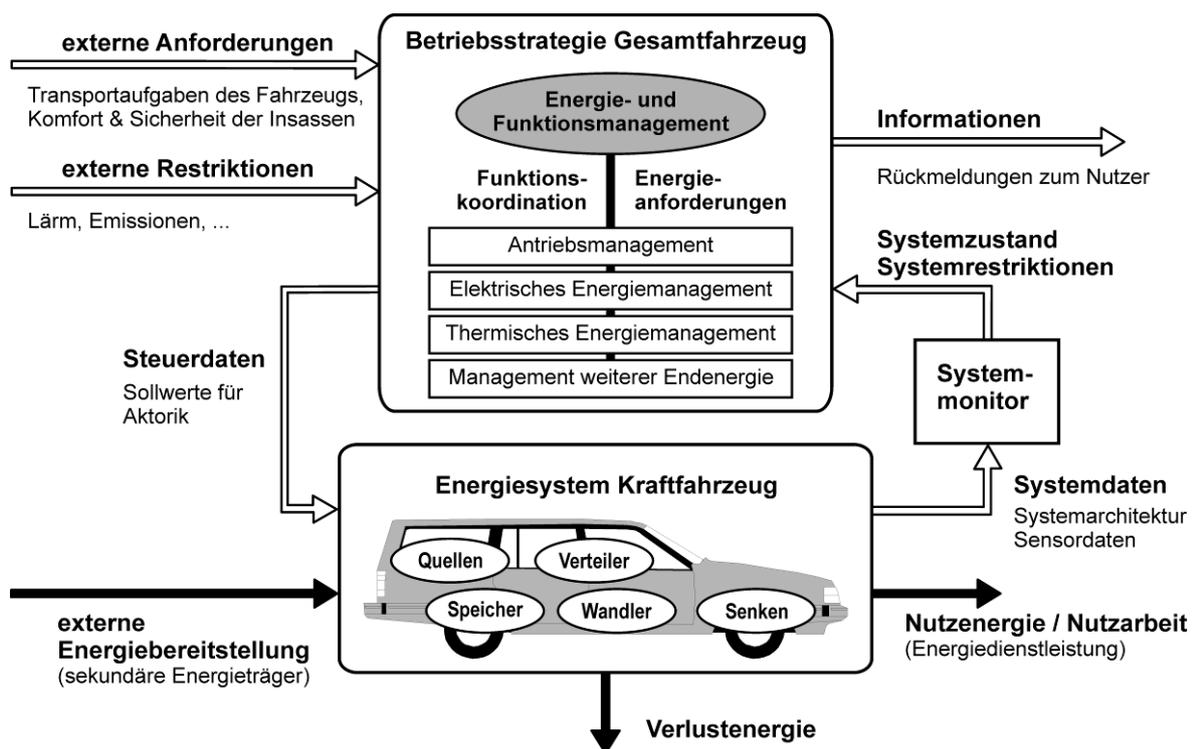


Bild 2.12 Einordnung des elektrischen Energiemanagements in die Betriebsstrategie des Gesamtfahrzeugs

Weiterhin müssen *funktionale* Aspekte beachtet werden. Darunter fallen die Priorität bzw. Systemrelevanz (Sicherheit, Notlauf, Komfort, ...), die Wahrnehmbarkeit durch den Nutzer, Interaktionen und Abhängigkeiten zwischen den Funktionen, funktionale Restriktionen zur Funktionsausführung und notwendige Freigaben von Ressourcen zur Informationsver-

arbeitung. Da der Nutzer keinen direkten Einfluss auf die Ausführung der Funktion hat, muss in geeigneter Weise eine Rückmeldung über den Funktionsstatus zur Verfügung stehen.

Betriebsstrategien können bei sich ändernden Systemeigenschaften und externen Anforderungen während des Fahrzeugbetriebs angepasst werden. Anhand der Anpassungszeitdauer kann zwischen zeitlich statischen, adaptiven und dynamischen bzw. onlineoptimalen Betriebsstrategien unterschieden werden. Bei einer statischen Betriebsstrategie sind die Reaktionen bei identischen Anforderungen und Bedingungen (Systemdaten, Restriktionen) über den gesamten Fahrzeugbetrieb gleich. Die Betriebsführung erfolgt mit festen Schwellen und fester Regel-/Steuerungsstruktur. Änderungen im Systemverhalten durch Alterung der Komponenten oder starke Abweichungen der Betriebsführung (z. B. Fahrerverhalten) werden nicht berücksichtigt. Dies ist bei adaptiven Betriebsstrategien möglich, bei welchen durch geeignete Beobachtungsmethoden des System- und Anforderungsverhaltens eine langsame Anpassung der Betriebsführung erfolgen kann. Für die Energieeinsatzoptimierung ist eine dynamische Betriebsstrategie vorteilhaft, welche in kurzen Zeitschritten eine jeweils optimale Trajektorie der Steuerdaten für den Optimierungshorizont ermittelt. Dabei können historische und prognostizierte Daten einbezogen werden [Büc06b], [Kut06]. Eine nähere Betrachtung zu dynamischen Betriebsstrategien folgt in Abschnitt 4.4.

2.4.2 Freiheitsgrade im Energiesystem

Die Freiheitsgrade eines EEM ergeben sich zum einen aus der Bordnetzarchitektur und den darin enthaltenen Stellgliedern von Quellen (Erzeugern), Speichern, Wandlern, Verteilern und Senken (Lasten). Dabei sind Abhängigkeiten der einzelnen Stellgrößen und die sich aus den Restriktionen ergebenden Stellgrößenbeschränkungen zu berücksichtigen. Zum anderen resultieren die Freiheitsgrade aus den elektrischen Funktionen selbst. Hier ist für jede Funktion im Einzelnen zu prüfen, inwieweit eine Leistungsvariation der zugehörigen Lasten oder eine variable Verteilung auf unterschiedliche Lasten möglich ist, ohne die funktional gestellten Anforderungen und Restriktionen zu verletzen. Zumeist kommen dafür nur Komfort-Funktionen in Betracht.

Um die Aufgaben des EEM zu erfüllen und eine Koordination von Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Nutzung der elektrischen Energie zu ermöglichen, bedarf es der Erweiterung um Hardware und Software zur Erkennung von Systemzuständen im Bordnetz, der Kommunikation zwischen den Regeleinheiten und den Komponenten, sowie Stellgliedern zur Beeinflussung des Leistungsflusses.

2.4.3 Schnittstellen zu den Bordnetzkomponenten

EEM-Funktionen benötigen die in Bild 2.12 dargestellten Schnittstellen zu den Bordnetzkomponenten. Im Folgenden werden Methoden zur Zustandserkennung und Eingriffsmöglichkeiten für Generator, Batterie und Verbraucher im 14V-Bordnetz kurz vorgestellt.

Schnittstellen zum Generator

Die Abgabeleistung des Generators kann mit dem Regler als Stellglied beeinflusst werden (vgl. Bild 2.6). Tabelle 2.3 zeigt die Steuer- und Messgrößen, welche bei aktuellen Generatorreglern zur Verfügung stehen. Wie in Bild 2.13 dargestellt, werden im Systemmonitor aus den Systemdaten mit Hilfe eines Modells weitere Systemgrößen berechnet, welche für das EEM relevant sind. Die Kopplung des Generators an den Verbrennungsmotor bedingt, dass eine Schnittstelle zur Motorsteuerung notwendig ist.

Tabelle 2.3: Steuer- und Messgrößen eines Generatorreglers [Bmw05]

Beschreibung	Bezeichnung	Wertebereich	Auflösung
<i>Steuergrößen</i>			
Generatorsollspannung	$U_{Gen,soll}$	10,7 ... 16 V	0,1 V
dynamische Erregerstrombegrenzung (Load Response Control)	LRC	0 ... 15 s	0,2 s / 3 s
statische Erregerstrombegrenzung	$I_{err,soll,max}$	0 ... 7,5 A	0,125 A
<i>Sensor- und Kennungsdaten</i>			
DF-Monitor (Tastverhältnis / Stellgröße)	DF	0 ... 100 %	3,125 %
Erregerstrom	I_{err}	0 ... 7,5 A	0,125 A
Reglerchip-Temperatur	ϑ_{Gen}	-32 ... 152 °C	8 °C
Diagnose-Status: Mechanischer Fehler	Drehzahlüberwachung		
Diagnose-Status: Elektrischer Fehler	Spannungsüberwachung		
Diagnose-Status: Übertemperatur	Temperaturüberwachung		
Kennungsdaten	Lieferant, Generator-Typ, Reglertyp, Nennspannung, Chip-Version		

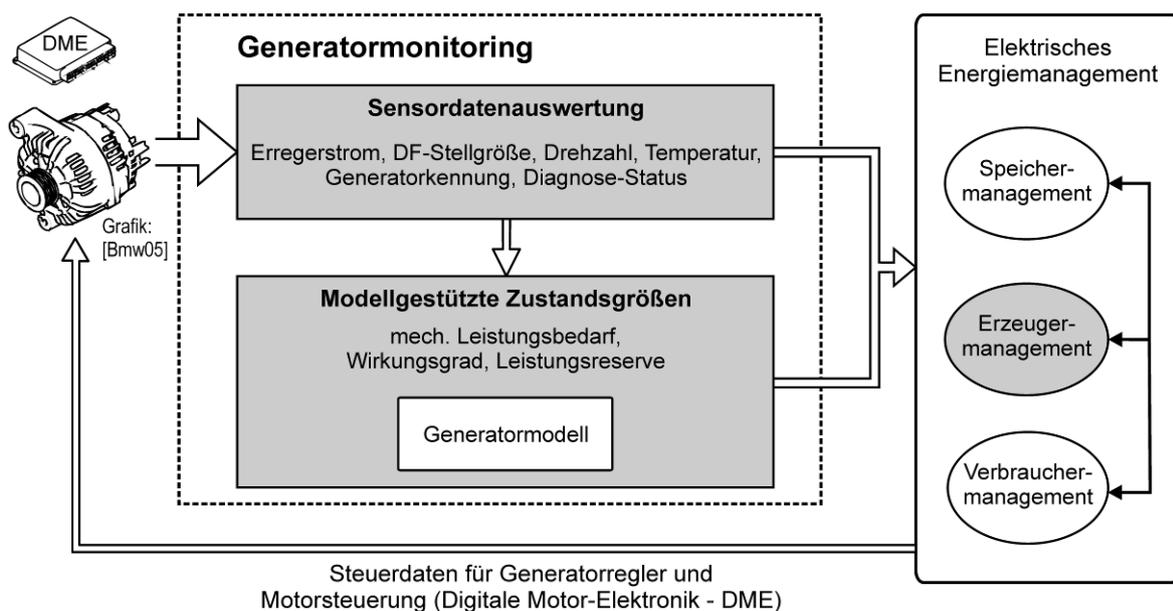


Bild 2.13 Zustandserfassung und Ansteuerung des Generators

Batteriezustandserkennung

Da die Batterie eine wichtige Rolle bei der Energieversorgung besitzt, hat der Batteriezustand einen großen Einfluss auf Funktionen des EEM. Die Voraussetzung für eine Batteriezustandserkennung ist eine zeitsynchrone und präzise Erfassung und Auswertung von Spannung, Strom und Temperatur mit teilweise sehr hohen Abtastraten. Der seit kurzem verfügbare intelligente Batteriesensor (IBS) genügt diesen Anforderungen [Hei05], [Ros05]. Der Sensor, welcher außen auf dem Minuspol der Batterie angebracht ist, stellt einen sehr guten Kompromiss zwischen Messgenauigkeit, Integrationsflexibilität und Kosten dar. Kernstück bildet ein eigens dafür entwickelter Halbleiter-Baustein, welcher neben einer präzisen analogen Datenerfassung eine Mikrorechnereinheit mit Peripherie zur Datenverarbeitung enthält (Bild 2.14). Dies ermöglicht ein autonomes Ausführen von Berechnungs- und Überwachungsfunktionen für ein Batteriemonitoring [Brö07].

Tabelle 2.4: Direkte Messgrößen des intelligenten Batteriesensors [Ros05]

Beschreibung	Bezeichnung	Wertebereich	Auflösung
Ruhestrom (Shuntmessung)	I_{Bat}	-1 ... 1 A	1 mA
Betriebsstrom (Shuntmessung)	I_{Bat}	-200 ... 200 A	10 mA
Startstrom (Shuntmessung)	I_{Bat}	-1500 ... 0 A	50 mA
Batterie-Klemmenspannung	U_{Bat}	6 ... 18 V	0,5 mV
Temperatur der Polklemme	ϑ_{Bat}	-40 ... 105 °C	0,5 °C

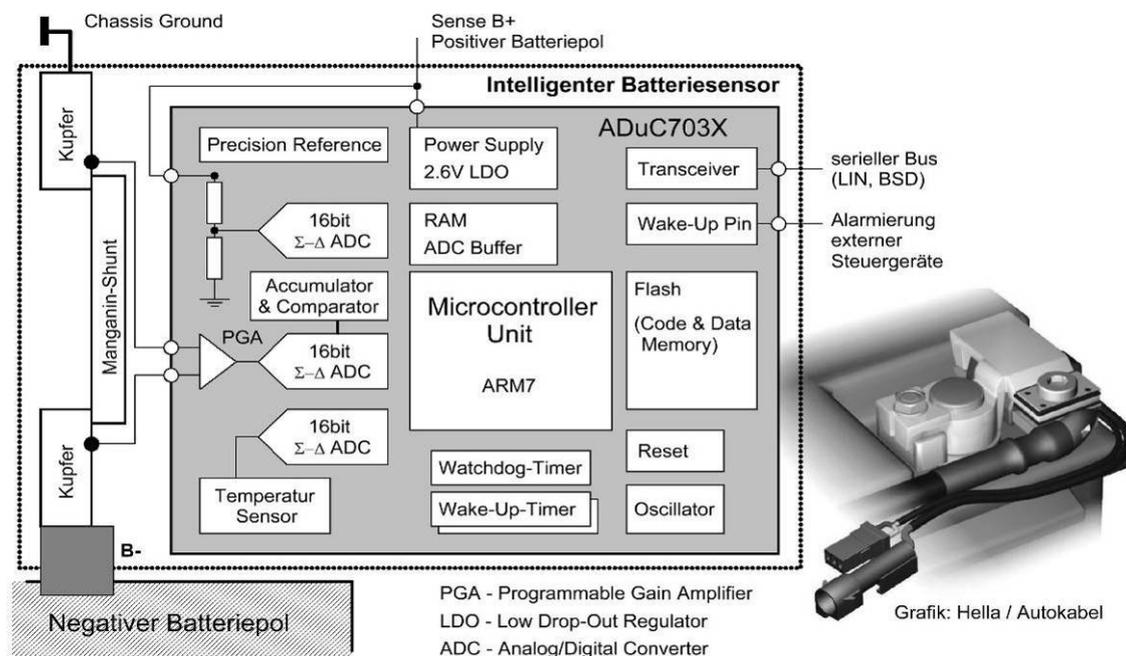


Bild 2.14: Schematischer Aufbau des intelligenten Batteriesensors; wichtige Funktionsblöcke der Halbleiter-Bausteinfamilie ADuC703X nach [Ad06]

Abgesehen von der Bestimmung direkter Messgrößen sind vor allem Aussagen zur Energiereserve bzw. Ladezustand, dem Leistungsvermögen und dem Alterungszustand der Batterie für das EEM von essentieller Bedeutung (Bild 2.15). Die Batteriediagnostik stützt sich dabei auf verschiedene Verfahren, welche sich auf stark vereinfachte physikalisch-chemische oder auch heuristische Modelle beziehen [Hei07]. Zu den Verfahren zählen die kontinuierliche Stromintegration (Ah-Zähler) und die Auswertung der Ruhespannung oder der Spannungseinbrüche bei Leistungsanforderungen (Innenwiderstand- bzw. Impedanzbestimmung). Häufig wird eine Kombination einzelner Verfahren verwendet, um Unterschiede in Stabilität und Genauigkeit während verschiedener Betriebsbereiche auszugleichen. Die Zustandsbestimmung ist insbesondere bei der Bleibatterie wegen ihrer zahlreichen Alterungsmechanismen¹², der starken Abhängigkeit der Kapazität von Temperatur und Stromstärke sowie ausgeprägter Relaxationsprozesse und Ungleichgewichte (Säureschichtung) mit Fehlern behaftet. Bei der Ladezustandsbestimmung kommt hinzu, dass bei der Betriebsladung im Fahrzeug nie eine wirklich vollständige Ladung erfolgt und damit eine definierte Bezugsgröße fehlt. Im realen Fahrzeugeinsatz sind deshalb Genauigkeiten unter 10 % Fehler nicht erreichbar [Sau07]. Der Einsatz des Batteriesensors für verschiedene Batterietypen sowie deren Fertigungstoleranzen¹³ erfordern eine kontinuierliche Adaption der verwendeten Modellparameter durch einen Vergleich zwischen prognostiziertem und gemessenem Verhalten. Auf diese Weise ist es möglich, Fehler wegen unzureichender Systeminformationen oder ungenauer Modellierung zu minimieren.

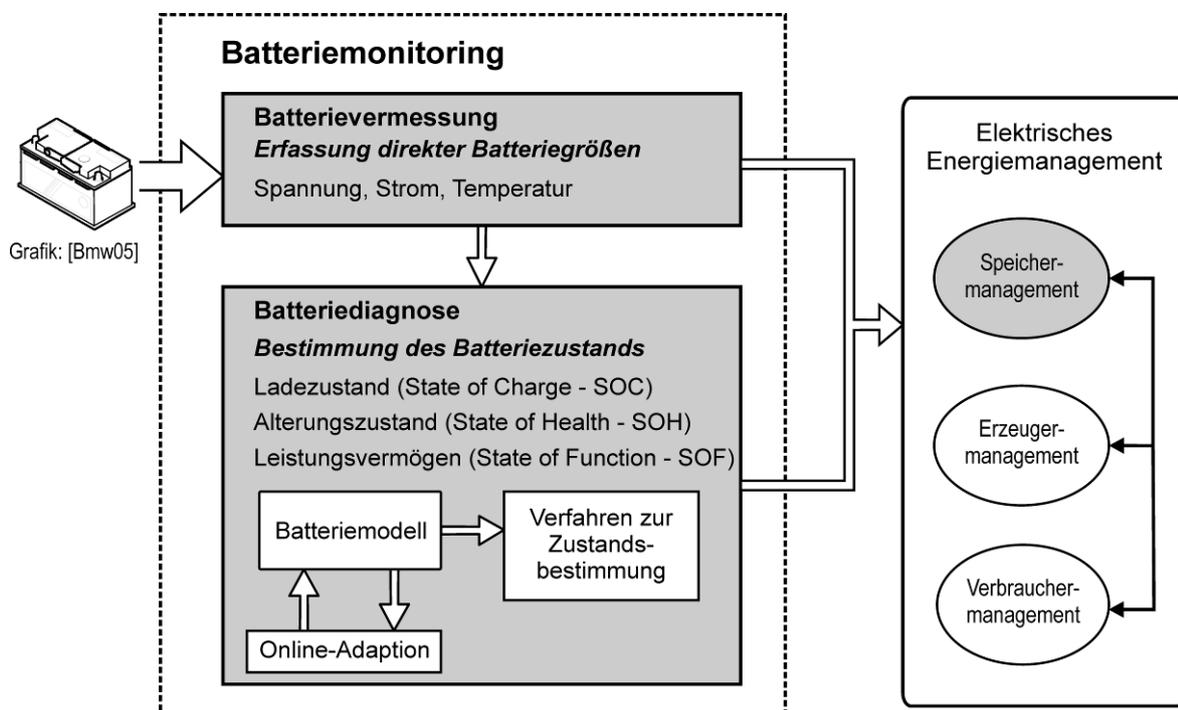


Bild 2.15: Vereinfachte Struktur der Zustandserfassung einer Batterie

¹² Darunter zählen Sulfatierung, Gasung, Abschlämzung und Korrosion. Da einige Alterungseffekte z. B. durch intensive Ladung reversibel sind, wird die Bestimmung des aktuellen Zustands zusätzlich erschwert.

¹³ Zu Beachten sind ebenfalls die unbekanntenen Konditionen während Transport und Lagerung.

Schnittstellen zu den Verbrauchern

Die Energieversorgung der einzelnen Verbraucher ist in heutigen Bordnetzarchitekturen über eine Vielzahl von dezentralen Steuergeräten¹⁴ beeinflusst, welche über serielle Bussysteme miteinander vernetzt sind. Zum Ansteuern der Verbraucher stehen entsprechende Schaltmodule zur Verfügung, welche häufig im Steuergerät integriert sind. Das Ausführen von Schaltvorgängen wird über Software-Funktionen bewirkt, welche vom Nutzer über ein Bediengerät (z. B. Schaltkonsole, Bordcomputer) oder von anderen Funktionen (z. B. Motorsteuerung, Sicherheitsfunktionen) ausgelöst werden. Je nach Verbraucherart existieren unterschiedliche Ansteuerarten (Bild 2.16), welche mit leistungselektronischen Stellgliedern oder Relais umgesetzt und teilweise in unterlagerten Regelkreisen nach Bild 2.2 eingebunden sind.

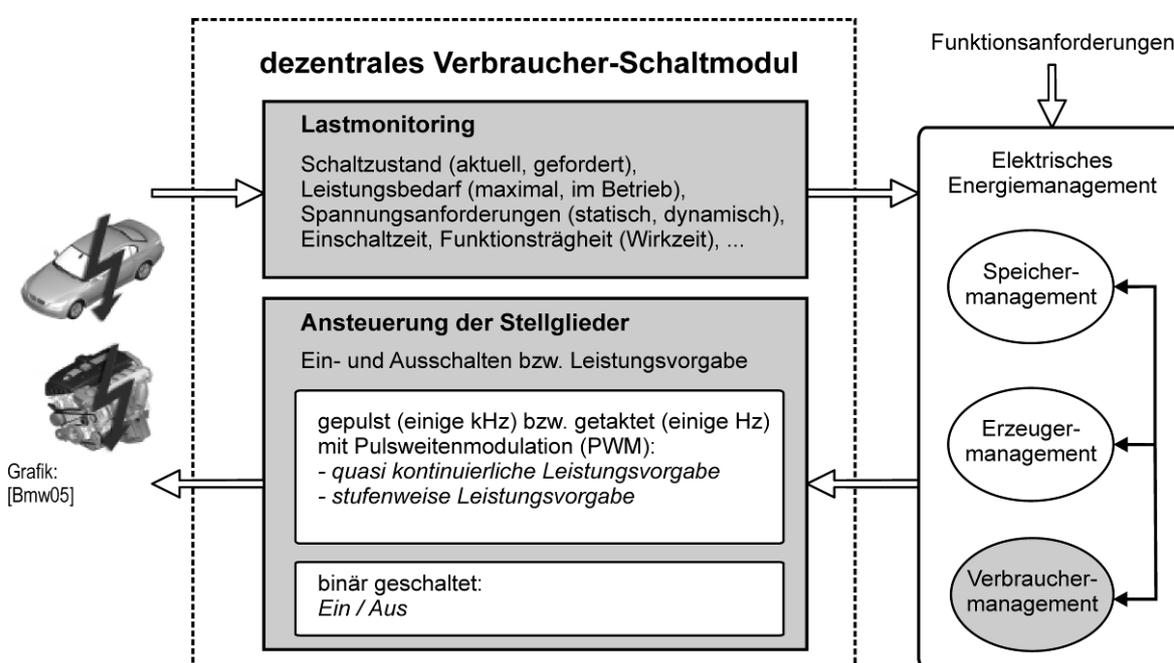


Bild 2.16 Zustandserfassung und Ansteuerung von Verbrauchern über ein Schaltmodul

Bei der Realisierung eines EEM mit übergeordneter Betriebsstrategie nach Abschnitt 2.4.1 sind Schnittstellen zwischen den Funktionsanforderungen und dem EEM zu schaffen. Hier wird die Verknüpfung der funktionalen und energetischen Aspekte deutlich. Die Ausführung von Schaltvorgängen ist neben funktionalen Gesichtspunkten auch von *energetischen Systemzuständen* abhängig. In der Praxis werden nicht alle elektrischen Verbraucher vom EEM beeinflussbar sein. Viele sicherheitsrelevante Funktionen müssen weiterhin einen direkten Eingriff auf die entsprechenden Schaltmodule besitzen.

Zur Koordination der Leistungen werden im EEM Angaben zu den Verbrauchern im Fahrzeug benötigt. Dazu gehören die in Bild 2.16 genannten Eigenschaften und Anforderungen. Mit der Funktionsträgheit eines Verbrauchers ist die Speicherfähigkeit einer

¹⁴ Als Beispiele seien genannt: Motorsteuergerät, Getriebesteuergerät, Lichtsteuergerät, Klimasteuergerät, Türsteuergeräte, Sitzsteuergeräte usw.

Verbraucherfunktion, beispielsweise eines Heizelements gemeint, welches erst stark verzögert auf eine Änderung der Leistungszuführung reagiert. Kurzzeitige Leistungsänderungen haben damit nur einen geringen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Funktion und werden deshalb vom Nutzer nicht als Komforteinbuße wahrgenommen. Die Eigenschaften der Verbraucher können dem EEM als a priori Informationen zur Verfügung gestellt werden. Ebenfalls ist ein Informationsaustausch mit einem Lastmonitoring vorstellbar, in welchem gegebenenfalls eine Adaption der Lastparameter während des Betriebs anhand von Verbrauchermodellen erfolgen kann. Für eine flexible Anbindung von Schaltmodulen an das EEM ist eine Normierung dieser Schnittstelle vorteilhaft.

2.4.4 Erweiterung der Funktionsstruktur

Die EEM-Funktionen müssen in die Betriebsstrategie des Gesamtfahrzeugs und die Funktionslandschaft des Fahrzeugs integriert werden. Dazu ist es erforderlich, bestehende Funktionen zu erweitern und eine Steuerung der Leistungsflüsse über einen zentralen Energiekoordinator zu ermöglichen. Dabei ist eine Funktionsstruktur anzustreben, welche eine einfache Portierung und offene Skalierung für verschiedene Bordnetzarchitekturen ermöglicht. Zur Umsetzung dieser Forderung sollte der zentrale Energiekoordinator über eine *einheitliche* Schnittstelle verfügen, mit der er mit den Komponenten des Energiesystems in Verbindung steht und direkt oder indirekt die Steuerdaten der Komponenten beeinflussen kann. Andererseits sind komponentenspezifische Schnittstellenmodule notwendig, welche aus den Systemgrößen und Funktionsanforderungen an die jeweilige Komponente die notwendigen Energieanforderungen ermitteln und diese dem Energiekoordinator mitteilen. Diese EEM-Funktionen können dezentral in den jeweiligen Steuergeräten integriert und an das übergeordnete Energie- und Funktionsmanagement des Gesamtfahrzeugs angebunden sein. Folgende Abbildung veranschaulicht schematisch eine solche Funktionsstruktur am Beispiel des herkömmlichen 14V-Bordnetzes.

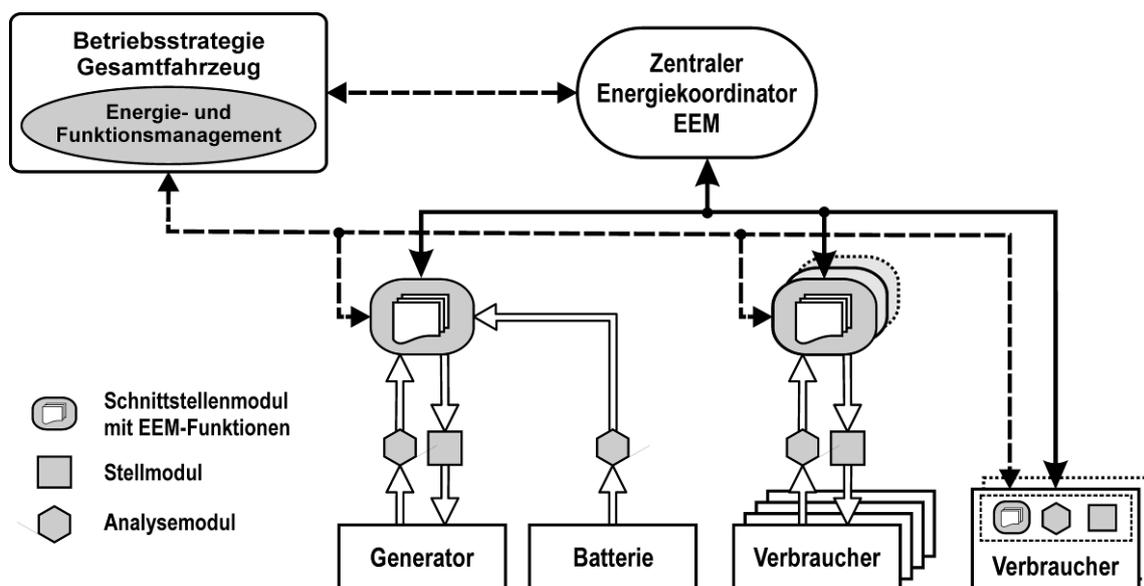


Bild 2.17: Funktionsstruktur eines EEM am Beispiel des 14V-Bordnetzes

Bei einer Definition der einheitlichen Schnittstelle ist zu beachten, dass sie für alle Komponenten universell einsetzbar ist, einen einfachen Aufbau besitzt und sich möglichst in bestehende Kommunikationssysteme integrieren lässt. Aus den aktuellen Veröffentlichungen sollen zwei Ansätze kurz vorgestellt werden, welche das Ziel einer allgemeingültigen, flexiblen EEM-Funktionsstruktur mit Hilfe einer offenen, einheitlichen Schnittstelle verfolgen:

- *Verwendung eines Ranglistenverfahrens:* Die zentrale Energiekoordination erfolgt über eine Rangliste in Form einer zweidimensionalen Tabelle mit einer Unterscheidung in Klassen und Prioritäten innerhalb einer Klasse [Sch07b]. Die Klassen ermöglichen eine Einteilung der Komponenten in bestimmte Kategorien, z. B. Erzeuger, nicht beeinflussbare Verbraucher oder beeinflussbare Verbraucher mit unterschiedlichen Funktionsträgheiten. Diese Ranglistentabelle dient als einheitliche Schnittstelle zwischen den Komponenten. Alle Komponenten des Energiesystems melden zyklisch ihre Energieanforderungen in Form der Klasse, Prioritätskennzahl und Leistung über eine einheitliche Schnittstelle, welche in die Rangliste eingetragen werden. Ausgehend von der höchsten Klasse und Priorität wird die aktuelle Schnittmenge aus Energieangebot und –nachfrage ermittelt. Die freigegebene Klasse und Prioritätsstufe wird den Bordnetzkomponenten mitgeteilt. Die Zuordnung der Komponenten in Klassen und Prioritäten kann frei von der Applikation festgelegt werden und sich während des Betriebs ändern. Über „virtuelle Verbraucher“ kann die angebotene Leistung von Erzeugern und Speichern ebenfalls in Abhängigkeit der Klasse und Priorität beliebig reduziert werden.
- *Verwendung eines Börsenmodells:* Die zentrale Energiekoordination erfolgt über das Modell einer Energiebörse. Die einheitliche Schnittstelle zwischen den Komponenten bildet dabei ein virtueller Warenpreis für Leistungspakete [Gra04]. Die Handelsstrategie der Komponenten ist in Preis-Leistungsfunktionen hinterlegt, welche von der Applikation definiert wird und sich während des Betriebs dynamisch ändern kann. Der aktuelle Gleichgewichtspreis zwischen Angebot und Nachfrage wird den Komponenten mitgeteilt und bestimmt somit deren Verhalten. Eine ausführliche Beschreibung eines Markt- bzw. Börsenmodells folgt in Abschnitt 5.3.

Beide Ansätze haben gemeinsam, dass über ein einheitliches Vergleichsmaß eine situationsangepasste Koordination zwischen Erzeugung und Nutzung der Energie realisiert wird. Bei der Bestimmung dieses Vergleichsmaßes für die einzelne Komponente können die in den vorherigen Abschnitten ausgeführten Gesichtspunkte zur sicheren und effizienten Bereitstellung der Energie einfließen, welche zur Ausführung der angeforderten Funktionen notwendig ist.

3 Zuverlässige Bereitstellung elektrischer Energie

Die sichere Funktionserfüllung der Energiedienstleistungen im Kraftfahrzeug bedarf einer zuverlässigen Bereitstellung der elektrischen Energie im Energiebordnetz. Diese Forderung stellt die zentrale Aufgabe eines elektrischen Energiemanagements (EEM) dar. Das folgende Kapitel betrachtet Aspekte zur zuverlässigen Bereitstellung elektrischer Energie und systematisiert die Lösungsansätze im Rahmen eines elektrischen Energiemanagements. So wird zwischen Maßnahmen zur Vermeidung von Leistungsdefiziten im stationären Fall und Eingriffen zur Beherrschung von dynamischen Lastwechseln unterschieden. Dadurch kann eine übersichtliche Einordnung der verschiedenen Strategien erfolgen.

3.1 Übersicht der Strategien

Die Eigenschaften des elektrischen Bordnetzes als lokales Energiesystem (vgl. Abschnitt 2.1) und die Tatsache, dass die installierte Verbraucherleistung bereits heute die Generatormennleistung deutlich übersteigt, können in ungünstigen Betriebspunkten zu kurzzeitigen Instabilitäten bis hin zum Zusammenbruch bzw. Totalausfall des Energiebordnetzes führen. Der dringende Handlungsbedarf wird insbesondere durch die steigende Nutzung der Batterie deutlich. Sie wird wegen des gestiegenen Energiedurchsatzes und des häufigen Erreichens niedriger Ladezustände deutlich stärker beansprucht. Laut ADAC-Pannenstatistik liegen über die Hälfte der Ausfälle im elektrischen System in entladenen oder defekten Batterien begründet [Lor07]. Wesentliche Motivation für die Einführung eines EEM in modernen Kraftfahrzeugen sind deshalb häufig Maßnahmen, welche ein Batteriemangement in den Mittelpunkt stellen.

Bei einer Betrachtung der zuverlässigen Bereitstellung elektrischer Energie sind allgemein zwei Fälle zu unterscheiden (Bild 3.1): Zum einen muss im stationären Fall gewährleistet sein, dass die gesamte Verbraucherleistung die vom Erzeuger und Speicher¹ zur Verfügung stehende Leistung nicht übersteigt. Tritt ein Leistungsdefizit auf, muss vom EEM entweder eine Steigerung der Energieerzeugung oder eine Reduktion der Verbraucherleistungen bewirkt werden. Auf die einzelnen Strategien wird im Abschnitt 3.2 eingegangen. Zum anderen bewirken Änderungen der Leistungsanforderung von Verbrauchern und deren Eigenschaften des Schaltverhaltens transiente Vorgänge im Bordnetz, welche die Bordnetzstabilität beeinflussen. Die Entwicklungstendenzen in der Leistungsdynamik elektrischer Verbraucher stellen diesbezüglich hohe Anforderungen an die Energieversorgung im Bordnetz (vgl. Abschnitt 2.2.2). Im folgenden Abschnitt 3.3 werden Strategien vorgestellt, um diese Lastwechsel sicher zu beherrschen.

¹ Im herkömmlichen 14V-Bordnetz entspricht dies der Leistung von Generator und Batterie.

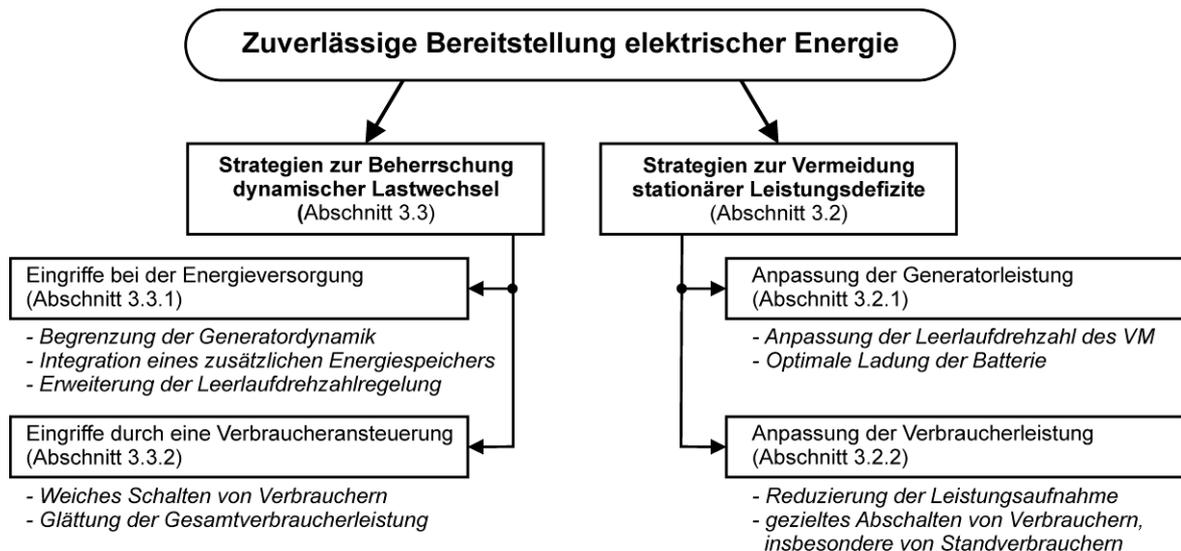


Bild 3.1: Strategien zur zuverlässigen Bereitstellung elektrischer Energie

3.2 Strategien zur Vermeidung von stationären Leistungsdefiziten

Für die Leistungsbilanz im stationären Fall muss sichergestellt sein, dass die momentan benötigte Gesamtverbraucherleistung die maximal erzielbare Leistung der Versorgungskomponenten nicht übersteigt und somit die Bordnetzstabilität gefährdet. Dabei spielt die Batterie eine wesentliche Rolle bei der Bereitstellung von Energie bei unzureichender Leistungserzeugung des Generators z. B. im Motorleerlauf. Ihre Leistungsfähigkeit ist, wie bereits ausgeführt, eingeschränkt. Deshalb ist im Rahmen eines EEM für eine ausreichende Ladung der Batterie zu sorgen, damit sicherheitsrelevante Funktionen jederzeit erfüllt und Energie für einen Motorstart zur Verfügung steht. Weiterhin ist die Belastung der Batterie durch eine Anpassung der Erzeuger- und Verbraucherleistung zu minimieren. Dabei gilt es, den Konflikt zwischen Funktionsverfügbarkeit und Bordnetzstabilität zu lösen.

Wesentliche Funktionen eines modernen EEM umfassen die oben genannten Anforderungen und sind in den verschiedenen EEM-Konzepten wiederzufinden, so z. B. in [Bmw05], [Fab06], [Geh05], [Luz05], [Rec00], [Zub03]. Bild 3.2 stellt die Struktur schematisch dar. In Abhängigkeit vom aktuellen Bordnetzstatus beeinflusst das EEM Motorleerlaufdrehzahl, Generatorsollspannung und Verbraucherleistungen. Die Stellkriterien zeigen, dass der Batterie ein zentraler Stellenwert zugeteilt wird. Für viele Steueralgorithmen ist eine möglichst genaue Kenntnis des Batteriezustands erforderlich, welches die Bedeutung der Batteriediagnose unterstreicht. Im Folgenden werden die einzelnen Maßnahmen zur Vermeidung von Leistungsdefiziten zusammengefasst.

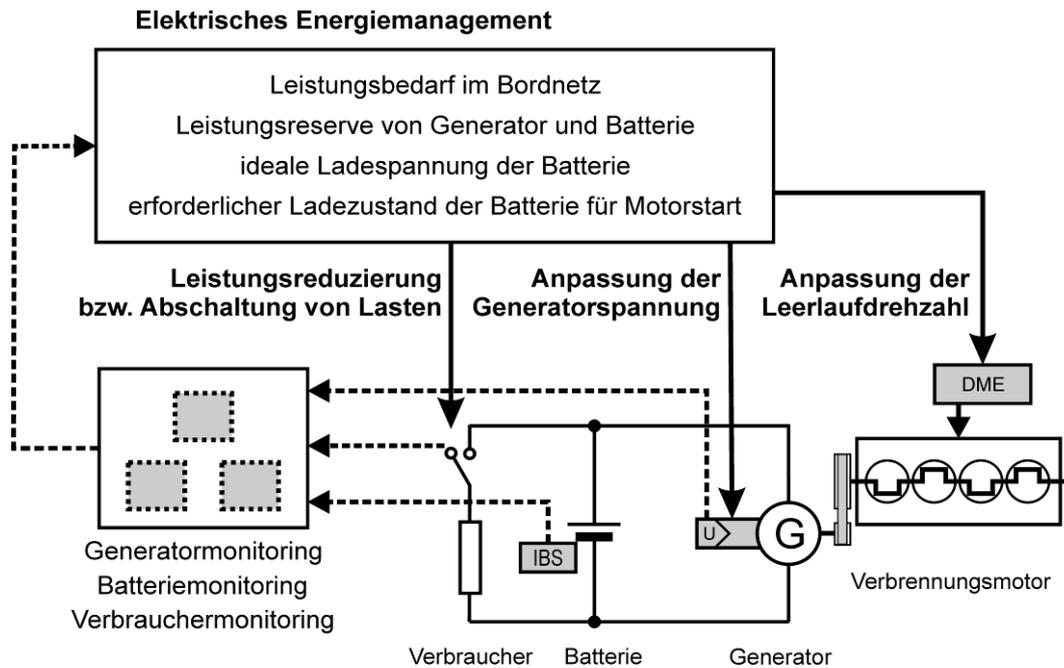


Bild 3.2: Stellkriterien und Stellgrößen eines modernen EEM zur Beherrschung von Leistungsdefiziten

3.2.1 Anpassung der Generatorleistung

Reicht bei niedrigen Motorleerlaufdrehzahlen die Energieerzeugung des Generators nicht zur Deckung des Energiebedarfs aus, kann eine Anhebung der Leerlaufdrehzahl die Energieentnahme aus der Batterie verhindern. Da besonders im unteren Drehzahlbereich die Leistung des Generators sehr stark mit der Drehzahl steigt (vgl. Anhang A.2), hat bereits eine geringe Erhöhung einen großen Einfluss auf die Leistungsbilanz. Gleichzeitig gilt es abzuwägen, inwieweit die Nachteile durch Geräusch, Emissionen und Kraftstoffverbrauch vermieden werden können. Als Kriterien für eine Anhebung dienen neben der Generatorauslastung und dem Batteriestrom die Leistungsfähigkeit (SOF) und der Ladezustand (SOC) der Batterie. Dabei ist eine Filterung der Systemgrößen sinnvoll, um kurzzeitige Lastschwankungen auszuschließen [Fab06].

Für die Spannungsstabilität und die Verfügbarkeit elektrischer Funktionen ist eine ausreichende Ladung der Batterie von großer Bedeutung. Durch Vorgabe der Generatorsollspannung kann das EEM anhand der gemessenen und berechneten Größen aus dem Batteriemonitoring die Klemmenspannung der Batterie für eine effektive Ladung anpassen. Die wesentlichen Kriterien sind in Bild 3.2 angegeben. Damit ist es möglich, stromabhängige Spannungsabfälle des Ladekabels zu kompensieren, die Ladezeitdauer zu verkürzen und Alterungsmechanismen gezielt entgegenzuwirken. Berücksichtigung müssen jedoch die Spannungsanforderungen aktiver Verbraucher finden, da die Bordnetzspannung unmittelbar mit beeinflusst wird.

3.2.2 Anpassung der Verbraucherleistung

Ist eine Erhöhung der Generatorleistung nicht möglich bzw. sinnvoll, müssen Leistungsdefizite im Bordnetz in Abhängigkeit des Batteriezustands durch gezielte Leistungsreduzierung bzw. Abschaltung von Verbrauchern beseitigt werden. Die Eingriffe des EEM erfolgen zumeist anhand einer Rangfolge in Form von Abschaltstufen. Die Zuordnung der Verbraucher in der Rangfolge wird dabei anhand ihrer Funktionsrelevanz und Funktionsträgheit (Wahrnehmbarkeit) festgelegt. Bei Bedarf kann die Rangfolge den Umgebungsanforderungen angepasst werden. Umgekehrt ist vom EEM eine Überprüfung der Leistungsreserve *vor* dem Zuschalten eines Verbrauchers möglich. Ist die Bereitstellung der Energie nicht gewährleistet, wird der Verbraucher erst bei ausreichender Leistungsreserve oder nach Ablauf einer funktionsspezifischen Toleranzzeit aktiviert [Geh05].

Eine besondere Bedeutung haben Eingriffe während der Phasen des Motorstillstands. Um die Startfähigkeit des Verbrennungsmotors nicht zu gefährden, erfolgt in modernen EEM-Systemen während der Ruhephasen eine Überwachung des Bordnetzzustands. Bei Unterschreiten eines kritischen Batterieladezustands werden Standverbraucher abgeschaltet, bei erhöhtem Ruhestrom die entsprechenden Komponenten vom Bordnetz getrennt. Häufig werden einige Komfortverbraucher sofort bei Motorstillstand abgeschaltet, während gesetzlich vorgeschriebene Standverbraucher wie z. B. Warnblinker oder Standlicht vom EEM nicht beeinflusst werden dürfen [Bmw05].

Weiterhin gehören zahlreiche einfache, verbraucherbezogene Schaltstrategien, wie sie bereits seit einigen Jahren in vielen Fahrzeugen umgesetzt sind, im erweiterten Sinne zu Maßnahmen eines EEM. Häufig sollen durch Hinweise mögliche Fehlbedienungen des Fahrers vermieden werden. Darunter zählen beispielsweise:

- Anschluss von Verbrauchern an Klemme 15 (geschaltete Batteriespannung). Bei ausgeschalteter Zündung ist die Spannungsversorgung unterbrochen.
- Automatische Taktung und/oder Abschaltung von Verbrauchern nach Ablauf einer bestimmten Betriebszeit (z. B. Heckscheibenheizung).
- Kurzzeitiges Abschalten von Verbrauchern während des Motorstarts (z. B. Klimagebläse, Radio, Abblendlicht).
- Akustischer Warnhinweis bei Motorstillstand und Öffnen der Fahrertür, wenn bestimmte Verbraucher eingeschaltet sind (z. B. Abblendlicht).
- Abschalten von Verbrauchern bei abgeschlossenem Fahrzeug (z. B. Innenraumbeleuchtung).

3.3 Intelligente Steuerung von Lastwechseln

Als elektrische Lastwechsel werden Änderungen des Leistungsbedarfs elektrischer Verbraucher im Bordnetz bezeichnet. Sie haben Ausgleichsvorgänge zur Folge. Gerade bei leistungsintensiven, hochdynamischen Aktoren, wie sie bei vielen neuartigen Fahrzeugfunktionen benötigt werden (vgl. Bild 2.4), ist die Stabilität des herkömmlichen Energiebordnetzes gefährdet. Weiterhin sind die Rückwirkungen zu beachten, welche sich aus der direkten Kopplung des Generators mit dem Antriebsstrang ergeben. Mit Hilfe des in Bild 3.3 dargestellten Leistungsflussdiagramms können die Auswirkungen eines elektrischen Lastwechsels systematisch aufgezeigt werden:

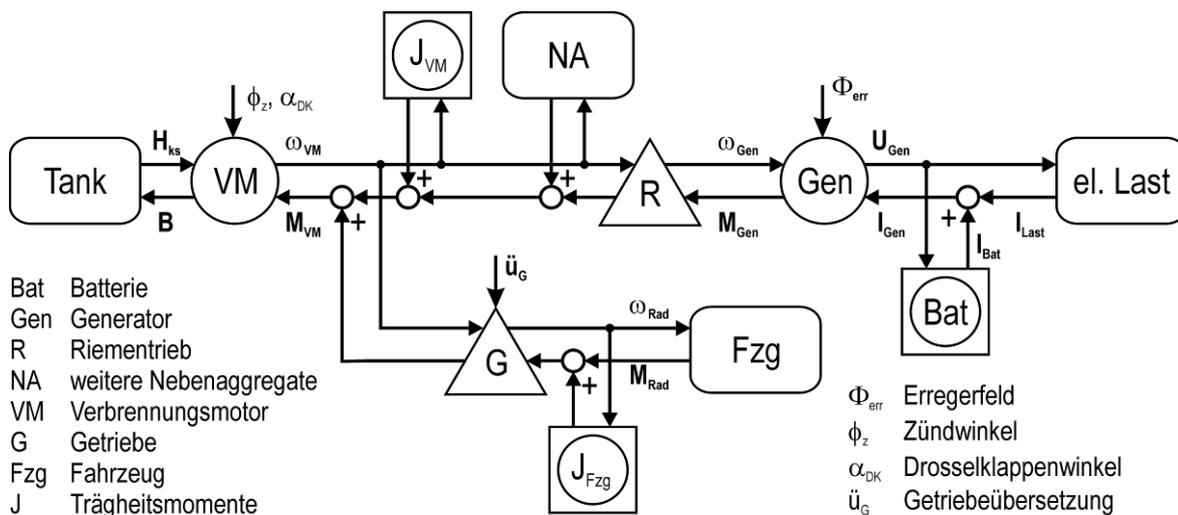


Bild 3.3: Darstellung der Lastwechselkette im vereinfachten Leistungsflussdiagramm unter Vernachlässigung der Verlustleistungen²

Eine Änderung der elektrischen Leistungsanforderung führt zu einem veränderten Strombedarf und wirkt somit auf die Bordnetzspannung zurück. Bis eine Änderung des Erregerfeldes durch den Generatorregler erfolgt, übernimmt die Batterie den Leistungsausgleich³. In Folge der geänderten Generatorleistung wirkt das Generatormoment mit dem festen Übersetzungsverhältnis des Riementriebs auf die Antriebsdrehzahl zurück. Da im Fahrbetrieb über die Kupplung und das Getriebe die hohen Trägheitsmassen des Fahrzeugs eingekoppelt sind, wird ein elektrischer Lastwechsel nur eine sehr langsame Drehzahländerung bewirken, die der Fahrer im Rahmen des sich ständig ändernden Fahrwiderstandes über die Gaspedalstellung unbemerkt ausgleichen kann. Ist jedoch im Fall des Motorleerlaufs die Kupplung geöffnet ($\ddot{u}_G = 0$), wirkt nur noch das geringe Trägheitsmoment der Kurbelwelle einer Drehzahländerung entgegen. Hinzu kommt, dass der Verbrennungsmotor prinzipbedingt bei niedrigen Drehzahlen, insbesondere auf positive Laständerungen, nur langsam reagieren kann. Die Bestrebungen zu immer geringeren Schwungmassen und niedrigeren Leerlaufdrehzahlen erfordern deshalb besondere Maßnahmen, um einen ruhigen Motor-

² Eine Übersicht der verwendeten Schaltzeichen nach Bouscayrol [Bou05a] befindet sich im Anhang A.1.

³ Die Reaktionszeit des Generators auf Laständerungen beträgt etwa 100 ms. Die Zeitkonstante der Erreger-spule wird vom Regler teilweise kompensiert [Ouy06].

leerlauf bei elektrischen Lastwechseln zu gewährleisten. Die Güte und Schnelligkeit der Leerlaufdrehzahlregelung hat darauf einen entscheidenden Einfluss.

Bei der Betrachtung wurde deutlich, dass die Ausgleichsvorgänge innerhalb der Reaktionskette maßgeblich von der Dynamik der einzelnen Energiewandler mit ihren zugehörigen Regeleinrichtungen und dem Energieinhalt der Speicherelemente abhängig sind. Dabei ist festzustellen, dass die Systemdynamik ausgehend von der Last zum Verbrennungsmotor immer weiter abnimmt.

Es ergeben sich zwei grundsätzliche Lösungsansätze zur Beherrschung von Lastwechseln: Wenn die Aktorik es zulässt, kann zum einen die Dynamik der Laständerungen durch intelligente Eingriffe reduziert werden. Zum anderen ist eine Erhöhung der Dynamik der Energieversorgung durch zusätzliche Speicher oder schnelle Regelungen möglich. Es gilt die transienten Vorgänge so zu gestalten, dass am Antriebsstrang keine Komforteinbußen auftreten, gleichzeitig aber die Bordnetzstabilität gewährleistet ist. In den folgenden Abschnitten werden die Eingriffsmöglichkeiten näher vorgestellt. Dies wird am Beispiel des herkömmlichen 14V-Energiebordnetzes durchgeführt, viele Aspekte sind jedoch auf andere Bordnetztopologien mit mehreren Spannungsebenen übertragbar. Eine Übersicht der einzelnen Eingriffsmöglichkeiten wird in Bild 3.4 anhand der Wirkungskette veranschaulicht.

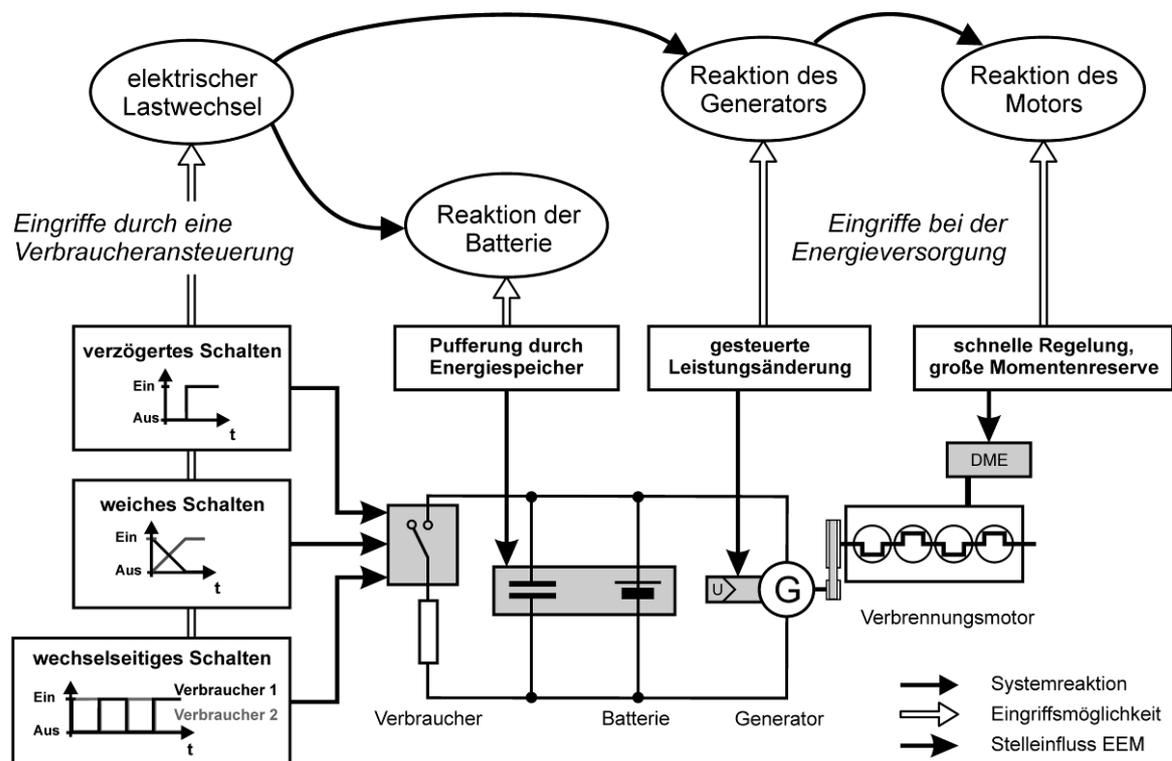


Bild 3.4: Übersicht der Möglichkeiten zur Verbesserung des Gesamtsystemverhaltens bei Lastwechseln im elektrischen Energiebordnetz [Büc03]

3.3.1 Eingriffe bei der Energieversorgung

Eine Verbesserung des Lastwechselverhaltens kann durch Änderungen in der Bordnetzarchitektur (vgl. Abschnitt 2.3) und eine übergelagerte Steuerung der Energieerzeuger durch ein EEM erreicht werden. Wesentliche Ansätze dazu werden in diesem Abschnitt näher vorgestellt.

Begrenzung der Generatordynamik (Load Response Control)

In heutigen Generatorreglern kann die Dynamik der positiven Leistungsänderung des Generators mit der so genannten Load Response Control (LRC) begrenzt werden. Damit ist es möglich, die Lastzuschaltung für den Riementrieb und den Verbrennungsmotor zu dämpfen. Dazu begrenzt die LRC-Funktion das Stellsignal DF^4 in seinem Anstieg (vgl. Bild 2.6). Die Rampensteilheit kann über die Reglerschnittstelle in verschiedenen Stufen vorgegeben werden. Da Lastsprünge besonders bei niedrigen Generator Drehzahlen hohe Drehmomentsprünge hervorrufen⁵ und diese im Motorleerlauf kritisch sind, werden hier langsame Änderungen appliziert, während bei höheren Generator Drehzahlen steile Rampen zugelassen werden. Nachteil der LRC ist eine verstärkte Belastung der Batterie. Während des Ausgleichvorgangs übernimmt sie die Funktion einer Leistungspufferung (Bild 3.5). Da nach der Energieabgabe der Batterie kurzzeitig ein erhöhter Ladestrom fließt, wird die Dauer des Ausgleichvorgangs im Bordnetz insgesamt deutlich verlängert. Weiterhin ist bei schlechtem Leistungsabgabevermögen der Batterie (SOF) die Bordnetzstabilität gefährdet.

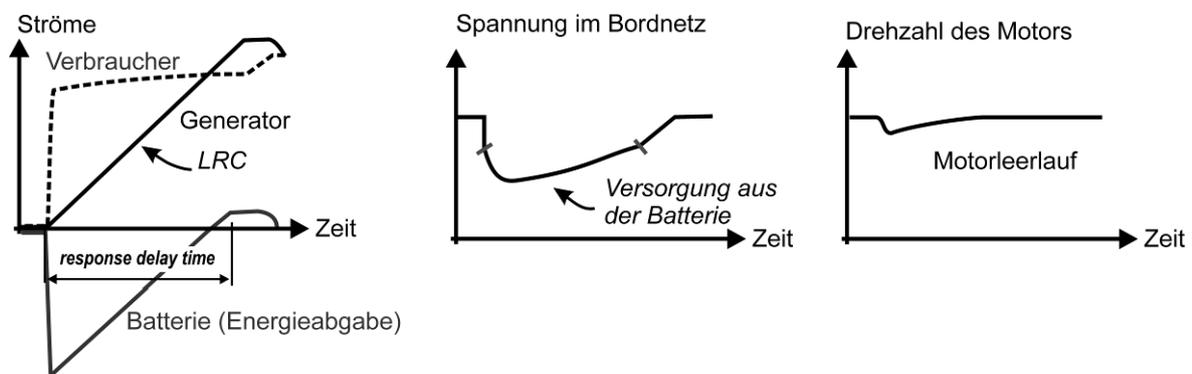


Bild 3.5: Qualitativ skizzierte Ausgleichsvorgänge bei ohmscher Lastzuschaltung mit Begrenzung der Generatorleistung durch die LRC im Motorleerlauf [Büc03]

Im Rahmen eines EEM ist es möglich, die LRC in Abhängigkeit von Zuständen des Antriebsstrangs und des Bordnetzes zu gestalten. Damit können gezielt die Rückwirkungen beeinflusst werden. Beispielhaft wurde in [Jin07] eine Vorgabe der LRC mit Hilfe eines Fuzzy-Logic-Controllers umgesetzt und erfolgreich am Bordnetzprüfstand getestet. Als

⁴ Dynamo-Feld: Tastverhältnis der PWM zur Steuerung der Erregerspannung.

⁵ Siehe Generatorkennlinien im Anhang A.2.

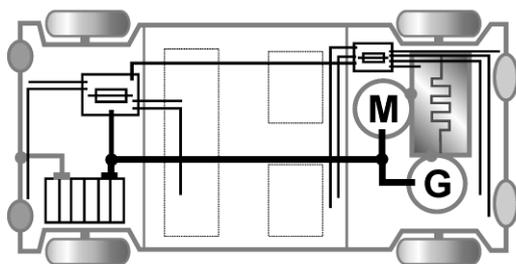
Eingangsgrößen der Fuzzy-Steuerung dienten dabei neben der Motordrehzahl der Batterie-zustand⁶ und der Betrag der Laststromänderung.

Integration eines zusätzlichen Energiespeichers

In Bezug auf die Bordnetzstabilität kann der Einsatz zusätzlicher leistungsfähiger Energiespeicher notwendig werden. Wie in Abschnitt 2.3.2 dargestellt, sind SuperCaps für kurzzeitige, zyklische Leistungspufferungen sehr gut geeignet. Die Anbindung kann in einer direkten Parallelschaltung zum Bordnetz oder über einen DC/DC-Wandler erfolgen.

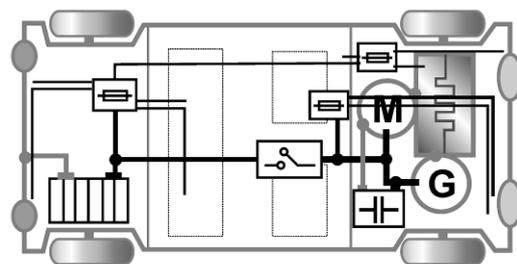
Entscheidend für die Dimensionierung von parallelen Stützkondensatoren sind die notwendige Pufferleistung und der zulässige Spannungsabfall. Da das Spannungstoleranzband im 14V-Bordnetz sehr eng gefordert wird, ist nur eine geringe Ausnutzung des SuperCap-Moduls möglich [Büc03]. Weiterhin muss beachtet werden, dass sich aus der direkten Parallelschaltung zur Batterie ein Stromteiler ergibt, welcher vom Innenwiderstand der beiden Speicher und den Kabelwiderständen der Zuleitungen zum Verbraucher abhängig ist. Ein geschickter Einbauort und die Gestaltung des Kabelbaums kann die gewünschte Funktionalität entscheidend beeinflussen (Bild 3.6). Werden das SuperCap-Modul und leistungsdynamische Verbraucher in der Nähe der Startanlage und des Generators platziert und an das Bordnetz angebunden, können Spannungsschwankungen an der Batterie deutlich verringert werden. Gleichzeitig ist es möglich, den Querschnitt der Ladeleitung zur Batterie zu verkleinern, da bei der Dimensionierung die hohen Starterströme unberücksichtigt bleiben können [Kur07]. Ein optionaler Schalter könnte zusätzlich bei einem Motorstart die Batterie vom Bordnetz trennen, um auch in diesem Fall eine stabile Spannung für empfindliche Verbraucher zu gewährleisten.

Konventionelle Anordnung:



- + Batterie in geschützter Umgebung
- + Gewichtsverteilung
- Lange Ladeleitung zur Batterie
- Lange Zuleitung zum Starter
- Lange Zuleitungen zu Verbrauchern

Zusätzlicher SuperCap im Frontbereich:



- + Direkte Anbindung von unempfindlichen Großleistungsverbrauchern am Generator
- + Verringerung der Leitungsquerschnitte (Ladeleitung zur Batterie, Verbraucherleitungen)
- + Optionaler Schalter kann Batterie trennen

Bild 3.6: Vorteile der Anordnung eines SuperCap-Moduls im Frontbereich bei paralleler Integration im Einspannungsbordnetz (Skizze)

Wird das SuperCap-Modul in Verbindung mit einem DC/DC-Wandler in das Bordnetz integriert, ist eine wesentlich bessere Speicherausnutzung möglich. Faktoren bei der Aus-

⁶ Die Beurteilung der Batterie-Leistungsfähigkeit stützte sich dabei vereinfacht auf Temperatur und SOC.

legung der oberen Spannungsgrenze sind Ladeeffizienz, Wandlerverluste sowie Komplexität des SuperCap-Moduls [Büc03]. Um den DC/DC-Wandler nicht für die hohen Pufferleistungen auslegen zu müssen, sollten die leistungsintensiven Verbraucher direkt an das SuperCap-Modul angebunden werden (vgl. Bild 2.9). Die Konsequenz ist eine Aufteilung des Bordnetzes in ein Leistungs- und ein Energiebordnetz an der Stelle des Schalters in Bild 3.6 (vgl. auch Bild 2.10). Durch die Möglichkeit der Verwendung höherer Generatorspannungen bietet diese Topologie gleichzeitig das höchste Kraftstoffeinsparpotential für eine Bremsenergierückgewinnung [Chr06].

Erweiterung der Leerlaufdrehzahlregelung

Die Leerlaufdrehzahlregelung (LL-Regelung) des Verbrennungsmotors hat zur Aufgabe, durch geeignete Laststerverfahren sein inneres (indiziertes) Drehmoment während des Betriebszustands „Leerlauf“ so zu steuern, dass die geforderte Motordrehzahl konstant bleibt bzw. nur eine geringe Leerlaufunruhe auftritt. Dabei gilt es, auftretende Lastmomente der Nebenaggregate und sämtliche Reibmomente zu kompensieren. Bei der Auswahl einer geeigneten Stellgröße muss beachtet werden, dass zum einen ein genügend großer Stellbereich zur Verfügung steht und zum anderen eine ausreichende Dynamik erreicht wird. Für drosselgesteuerte Motoren kommen als Steuerverfahren die Änderung des Gemischmassenstroms vor dem Einlassventil über Änderung des Drosselklappenwinkels α_{DK} und die Änderung des Wirkungsgrades der Verbrennung über den Zündzeitpunkt ϕ_z in Frage. Bei Valvetronic-Motoren wird ebenfalls eine Änderung des Liefergrades mit Hilfe der variablen Steuerung des Einlassventils (VVT) genutzt [Usp07]. Die Dynamik der drei Laststerverfahren wird in Bild 3.7 qualitativ verglichen.

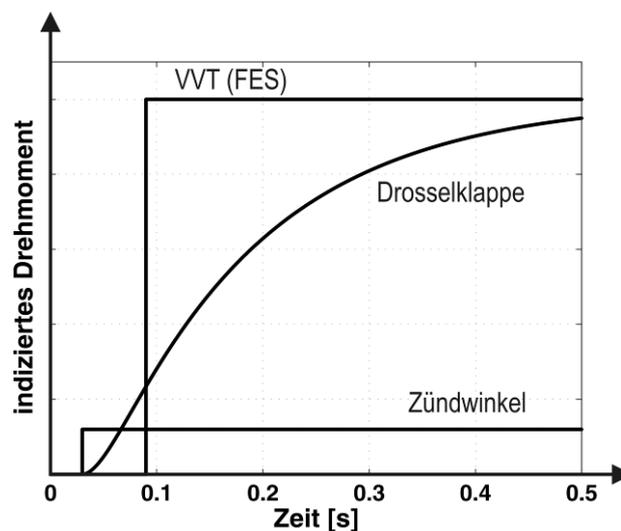


Bild 3.7: Qualitativer Vergleich der Stelldynamik verschiedener Laststerverfahren bei einer Motordrehzahl von 1000 min⁻¹ [Sch88]

Die Stelldynamik über die Drosselklappe ist neben ihrer eigenen Verzögerung hauptsächlich von der Saugrohrdynamik und dem Saugverhalten des Motors abhängig und wird somit vom Saugrohrvolumen und der Motordrehzahl bestimmt. Der große Vorteil der

Zündzeitpunktverstellung ist in der nahezu verzögerungsfreien Beeinflussung des indizierten Motormoments zu sehen. Da der Drehmomentvorhalt jedoch einen erhöhten Kraftstoffverbrauch bedeutet, wird er möglichst klein gehalten. Der mögliche Stellbereich ist eingeschränkt, so dass dieses Verfahren nur als zusätzliche Steuergröße eingesetzt werden kann. Die drosselfreie Laststeuerung nach dem Prinzip des „frühen Einlassschließens“ (FES), wie sie serienmäßig in den Valvetronic-Motoren umgesetzt wurde [Kon03], ermöglicht grundsätzlich Vorteile bezüglich Kraftstoffverbrauch und Abgasemissionen. Bei alleinigem Einsatz des FES-Verfahrens ohne die Zündzeitpunktverstellung ergibt sich eine größere Totzeit im Vergleich zur Drosselsteuerung [Sch88].

Im Rahmen eines EEM ist es möglich, die drehmomentbasierte LL-Regelung so zu erweitern, dass auf Lastwechsel im Bordnetz schneller reagiert werden kann (Bild 3.8). Das vom Generatormonitoring ermittelte Drehmoment kann als Störgröße aufgeschaltet werden [Lie01]. Auf diese Weise wird einer Änderung des Generatormoments entgegengewirkt, bevor der LL-Regler auf Grund einer Drehzahländerung reagiert. Voraussetzung dafür ist eine schnelle Kommunikation zum Generatorregler, um dynamische Änderungen zu berücksichtigen. Alternativ dazu ist eine zusätzliche Berechnung eines Vorsteuerwertes im EEM vorstellbar. So könnte vor dem Zuschalten eines Verbrauchers der zusätzliche Drehmomentbedarf des Generators abgeschätzt und zu dem aktuell ermittelten Generatormoment addiert werden. Damit wäre eine sehr frühe Reaktion der Laststeuerverfahren auf bevorstehende Lastwechsel möglich. Deren Totzeiten könnten somit kompensiert werden.

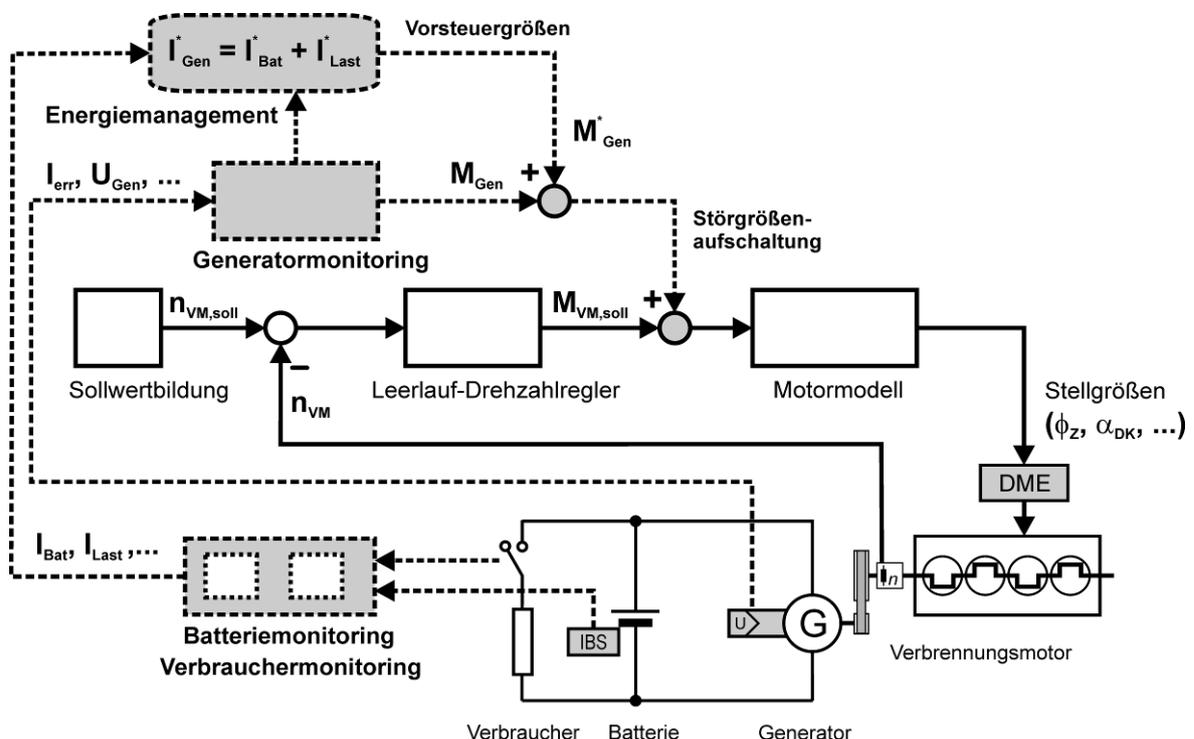


Bild 3.8: Erweiterung des drehmomentbasierten Leerlaufdrehzahlregelkreises mit Störgrößenaufschaltung und Vorsteuerung des Generatormoments

3.3.2 Eingriffe durch eine Verbraucheransteuerung

Eine intelligente Ansteuerung von Bordnetzlasten wirkt am Anfang der Ursachenkette (vgl. Bild 3.4). Zum einen kann die Dynamik der elektrischen Leistungsänderung beeinflusst werden, zum anderen ist mit Hilfe eines übergeordneten EEM eine Glättung der Verbraucherleistung im Gesamtbordnetz möglich.

Weiches Schalten von Verbrauchern

Durch langsames Schalten von Verbrauchern können Lastsprünge im Bordnetz aufgeweicht werden, z. B. mit dem Sanftanlauf von Stellmotoren. Ein weiches Schalten ist nur für Verbraucher möglich, welche sich robust gegenüber langsamen Leistungsänderungen verhalten und bei denen keine Einschränkungen auf Grund funktionaler Anforderungen existieren. Diese Methode ist beispielsweise für Komfortfunktionen vorstellbar, deren zugehörige Lasten eventuell um eine gepulste Ansteuerung erweitert werden müssen. Es entstehen zusätzliche Kosten, jedoch wird auch eine erweiterte Komfort-Funktionalität ermöglicht (z. B. gedimmtes Innenlicht, Sanftanlauf der Fensterhebermotoren, ...).

Glättung der Verbraucherleistungen im Gesamtbordnetz

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion von Lastwechseln stellt die Glättung oder Nivellierung der Gesamtverbraucherleistung im Fahrzeug dar. Die Idee ist, dass gleichsinnige Schaltvorgänge gemieden und gegensinnige Lastwechsel genutzt werden, um die Leistungsänderung im Energiebordnetz zu reduzieren. Mögliche Konzepte sind beispielsweise:

- Eine kurzzeitige Leistungsreduktion einzelner Verbraucher bei Lastspitzen im Bordnetz. Hier kommen Verbraucher mit hoher Funktionsträgheit in Betracht.
- Den Schaltvorgang erst dann vornehmen, wenn ein gegensinniger Lastbedarf auftritt. Dies ist nur für zeitlich unkritische Funktionen und daher sehr eingeschränkt möglich.
- Zeitlich versetztes bzw. verzögertes Schalten bei gleichzeitiger Aktivierung bzw. Deaktivierung von Verbrauchern [Bäk98], z. B. Türverriegelung, Fensterhebermotoren.
- Wechselseitige Ansteuerung getakteter Verbraucher, z. B. gleichzeitig aktiver Sitzheizungen [Bäk98], [LS06]. Dabei werden die Ansteuersignale der Verbraucher zeitlich verschoben, die Ansteuerfrequenzen bleiben unverändert.

Zur Realisierung dieser Maßnahmen ist eine zentrale Steuerung und zeitliche Synchronisation der einzelnen Schaltmodule notwendig, was bei verteilten Funktionen über mehrere dezentrale Steuergeräte zu Problemen hinsichtlich des erforderlichen Kommunikationsaufwands führen kann. Sind jedoch die einzelnen Lasten an *einem* dezentralen Schaltmodul angeschlossen, können in Abhängigkeit der Funktionsanforderung die genannten Maßnahmen relativ einfach umgesetzt werden.

4 Effiziente Bereitstellung elektrischer Energie

In diesem Kapitel werden zunächst die Strategien eines elektrischen Energiemanagements zur effizienten Bereitstellung und Nutzung elektrischer Energie benannt. Im Anschluss daran erfolgt eine Untersuchung der Energiewandlungskette von Verbrennungsmotor und Generator hinsichtlich einer kraftstoffminimalen Bereitstellung elektrischer Energie durch zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Nutzung. In einem ersten Ansatz werden dazu die stationären Kennfelder der Energiewandler analysiert. Mit Hilfe von Willans-Kennlinien und der Einführung eines Delta-Wirkungsgrades werden Aussagen für beide Energiewandler und das Gesamterzeugersystem getroffen. Ein zweiter Ansatz verfolgt das Konzept der simulationsgestützten Optimierung. Dazu wird ein Optimierungsprogramm eingesetzt, in welchem evolutionäre Optimierungsverfahren implementiert sind. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Betriebsführung eines gegebenen Anforderungsprofils wird der Kraftstoffverbrauch optimiert und die Ergebnisse anschließend bewertet. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick zum Einsatz dynamischer und prädiktiver Betriebsstrategien.

4.1 Übersicht der Strategien

Der Anteil der elektrischen Energieerzeugung am Gesamtenergiebedarf des Kraftfahrzeugs nimmt ständig zu. Da er einen direkten Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch besitzt, stellt sich zunehmend die Frage, inwieweit im Rahmen eines elektrischen Energiemanagements (EEM) Maßnahmen für eine effiziente Bereitstellung und Nutzung von Energie umgesetzt werden können. In Bild 4.1 sind die verschiedenen Strategien systematisiert.

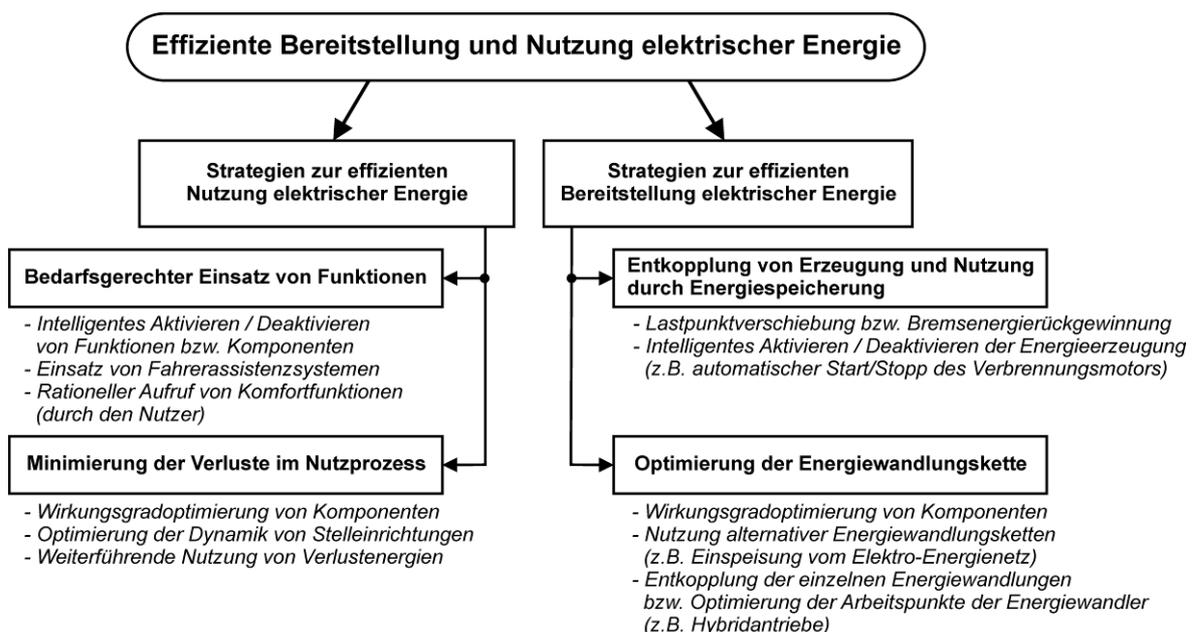


Bild 4.1: Strategien zur effizienten Bereitstellung und Nutzung elektrischer Energie

Die Übersicht unterscheidet zwischen Strategien zur effizienten Nutzung und einer effizienten Bereitstellung elektrischer Energie. Es wird deutlich, dass sowohl Aspekte des Entwurfs von Fahrzeugfunktionen als auch die Eigenschaften der Energiewandlungskette eine entscheidende Rolle auf die Energieeffizienz besitzen.

4.1.1 Energiewandlungskette im Kraftfahrzeug

Die Energieeffizienz für den Betrieb eines Kraftfahrzeugs kann, wie anhand der Energiewandlungskette in Bild 4.2 dargestellt ist, in zwei Teile gegliedert werden. Die Verluste der externen Energiebereitstellung von der Gewinnung primärer Energieträger bis zur Speicherung im Fahrzeug sind in der so genannten „Well-to-Tank-Efficiency“ zusammengefasst¹. Sie werden von den Eigenschaften der Lagerstätten und den notwendigen Transport- und Umwandlungsprozessen bestimmt. Als „Tank-to-Wheel-Efficiency“ wird der Wirkungsgrad zur mobilen Energienutzung im Fahrzeug bezeichnet. Der Gesamtwirkungsgrad „Well-to-Wheel“ ergibt sich aus dem Produkt der beiden Wirkungsgrade. Dieser wird maßgeblich durch die eingesetzten Energiewandler und die Freiheitsgrade des Fahrzeug-Energiesystems im Verbund mit einem Energiemanagement beeinflusst [Euc07], [Wil05].

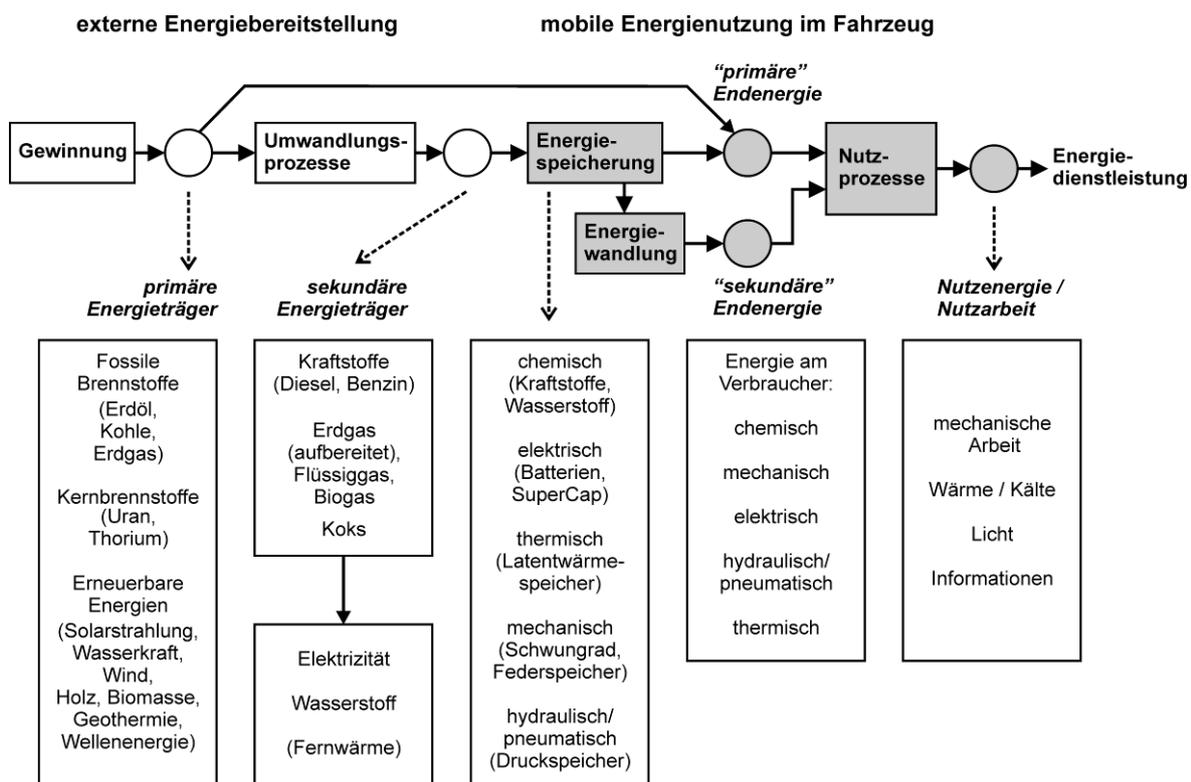


Bild 4.2: Energiewandlungskette beim Betrieb von Kraftfahrzeugen, frei nach [Cra04], [Ble05]

¹ Die Möglichkeit der direkten Nutzung primärer Energieträger wird hier nicht näher betrachtet. Eine Anwendung für Straßenfahrzeuge scheint aus heutiger technologischer Sicht für den Serieneinsatz nur als *zusätzliche* Energiebereitstellung praktikabel (z. B. Solarzellen, Thermogeneratoren).

In dieser Betrachtung bleibt der Energiebedarf für Fahrzeugherstellung, Wartung und Recycling unberücksichtigt. Bei konventionellen Antrieben beträgt dieser Anteil am kumulierten Gesamtenergiebedarf heute etwa 12 % [Win03]. Beim Einsatz energiesparender Technologien ist der Mehraufwand im Einzelnen zu prüfen. Dabei haben insbesondere die Lebensdauern und Recyclingverfahren der Komponenten eine große Bedeutung².

In Bild 4.2 wird bei der mobilen Energienutzung im Fahrzeug in eine „primäre“ und eine „sekundäre“ Endenergie eingeteilt, um zwischen der direkten Nutzung sekundärer Energieträger (Kraftstoffverbrennung im Verbrennungsmotor) und der Verwendung weiterer Endenergieformen durch Energiewandler (z. B. elektrische Energieerzeugung mit dem Generator) zu unterscheiden.

Da der Fahrer zumeist eine direkte Kontrolle auf wesentliche Leistungsflüsse im Fahrzeug hat, kann er bereits z. B. durch vorausschauende Verkehrsbeobachtung oder richtige Gangwahl den Einsatz sekundärer Energie optimieren. Zusätzlich kann durch vernünftigen Einsatz von Komfortfunktionen der Energiebedarf beeinflusst werden. Hieraus wird die Diskrepanz zwischen einer Energieeinsatzoptimierung eines Energiemanagements und den Kundenwünschen nach hoher Fahrdynamik und hohen Geschwindigkeiten sowie vielen Komfortfunktionen deutlich. Um eine hohe Akzeptanz zu erreichen, müssen daher die Maßnahmen eines Energiemanagements für einen effizienten Fahrzeugbetrieb keine oder nur wenig wahrnehmbare Einschränkungen der Fahreranforderungen besitzen. Heutige Strategien konzentrieren sich daher häufig auf eine Optimierung der komplex vernetzten Leistungsflüsse im Fahrzeug, um vor allem im dynamischen Fahrbetrieb Effizienzsteigerungen zu erzielen. Es kann jedoch vermutet werden, dass auf Grund steigender Energiekosten in Zukunft die Akzeptanz für ein aktives Eingreifen im Sinne eines energieeffizienten Fahrzeugbetriebs auch mit Einschränkungen in der Systemdynamik steigen wird.

4.1.2 Strategien zur effizienten Bereitstellung elektrischer Energie

Abhängig von den Freiheitsgraden, welche das Fahrzeug-Energiesystem bietet, können in einem EEM verschiedene Strategien Anwendung finden, um den Energieeinsatz der gespeicherten Sekundärenergie im Kraftfahrzeug zu optimieren und somit die „Tank-to-Wheel-Efficiency“ zu erhöhen. Hier werden die entscheidenden Vorteile hybrider Antriebskonzepte gesehen. Die meisten Strategien können ebenfalls in herkömmlichen Antrieben Anwendung finden, obwohl sie dann oftmals ein geringeres Einsparpotential bieten. Da zumeist auf die Nutzung von Energiespeichern zurückgegriffen wird, müssen bei der Bestimmung von Einsparpotentialen stets deren Verluste Berücksichtigung finden. Zu den Strategien eines aktiven EEM zur effizienten Bereitstellung elektrischer Energie zählen im Einzelnen:

² Eine Untersuchung der energetischen Bilanz könnte ähnlich der Grenzkosten aus den Betrachtungen der wirtschaftlichen Vertretbarkeit in [Win03] (Kapitel 2.3) erfolgen.

- *Strategie 1: Automatischer Start/Stop des Verbrennungsmotors bei keiner bzw. geringer Fahrleistung:* Abschalten des Verbrennungsmotors, wenn keine Antriebsleistung benötigt wird, also während der Brems- und Stillstandsphasen im Fahrzyklus. Je nach Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebssystems und den Eigenschaften des elektrischen Energiespeichers kann auch in Phasen, in welchen nur geringe Antriebsleistungen benötigt werden, der Antrieb rein elektrisch erfolgen (vgl. Tabelle 2.2). Voraussetzung ist ein automatisches Starten des Verbrennungsmotors, wenn dessen Einsatz erforderlich ist. Während des Motorstillstands muss die Energiebereitstellung aus Energiespeichern für sämtliche Energiedienstleistungen gewährleistet sein.
- *Strategie 2: Entkopplung zwischen der Leistung des Verbrennungsmotors und der Fahrleistung (Motorunterstützung):* Lastpunktverschiebung mittels der elektrischen Maschine entweder zur Antriebsunterstützung oder zum verstärkten Laden von Energiespeichern. Auf diese Weise ist ein Betrieb des Verbrennungsmotors in der Nähe des optimalen Wirkungsgrades möglich. Eine konsequente Erweiterung dieses Konzeptes stellen die Verkleinerung der Verbrennungsmotorleistung („downsizing“) und die Verwendung von vielstufigen oder kontinuierlichen Kennungswandlern (CVT-Getrieben) dar.
- *Strategie 3: Zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Nutzung elektrischer Energie:* Die Erzeugung sekundärer Endenergie erfolgt verstärkt in Phasen besonders effizienter Sekundärenergiewandlung entweder durch Verwendung eines Speichers oder durch verstärkte Energienutzung von Verbrauchern. Einsparpotentiale ergeben sich durch eine Lastpunktverschiebung und rekuperatives Bremsen.

Auf nicht elektrische Konzepte innerhalb des Energie- und Funktionsmanagements des Gesamtfahrzeugs soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, auch wenn diese häufig Schnittstellen zum EEM besitzen (vgl. Bild 2.12). Als wichtige Beispiele seien das thermische Energiemanagement u. a. mit der Rekuperation thermischer Verlustenergien [Mor06a] oder die Entkopplung von Neben- bzw. Zusatzaggregaten vom Verbrennungsmotor (z. B. Wasserpumpe, Klimakompressor, Lenkhilfepumpe) genannt.

4.1.3 Energiewandlungskette zur Erzeugung elektrischer Energie

Eine wesentliche Teilaufgabe eines EEM ist es, die Erzeugung elektrischer Energie hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs zu optimieren. In den folgenden Abschnitten 4.2 und 4.3 erfolgen daher Untersuchungen, inwieweit durch eine Steuerung der Generatorleistung während des Fahrzeugbetriebs Kraftstoffeinsparungen möglich sind. Dabei soll für einen konventionellen Antriebsstrang die Strategie 3 der *zeitlichen Entkopplung von Erzeugung und Nutzung elektrischer Energie* verfolgt werden. Das Fahrverhalten soll durch das EEM nicht beeinflusst werden, um die Freiheit des Fahrers nicht einzuschränken. Damit können die Betriebspunkte des Verbrennungsmotors mit Drehzahl und Drehmoment für den Fahrwiderstand des Fahrzeugs und weitere Nebenaggregate als fest vorgegeben betrachtet werden (Bild 4.3). Die Komplexität der Problemstellung wird dadurch auf die Leistungs-

vorgabe des Generators reduziert. Ziel ist es, die Energieerzeugung verstärkt in Bereiche zu legen, in welchen die Erzeugung besonders effizient ist. Das Einsparpotential ergibt sich aus der Differenz zwischen den unterschiedlichen Kraftstoffmengen für das Erzeugen elektrischer Energie in den verschiedenen Arbeitspunkten im Fahrbetrieb.

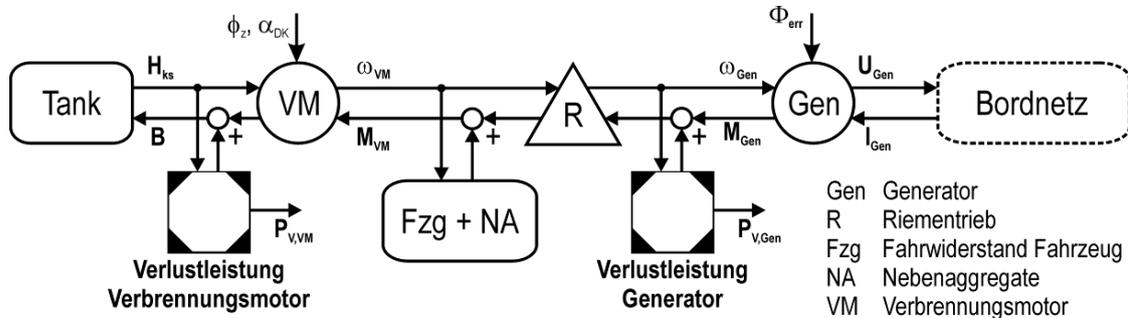


Bild 4.3: Leistungsflussdiagramm zur Erzeugung elektrischer Energie im konventionellen Antriebsstrang

Es gilt, die in Bild 4.3 dargestellte Wandlungskette von Verbrennungsmotor und Generator näher zu untersuchen. Dabei soll offen bleiben, ob die Entkopplung über elektrische Energiespeicher oder über die Speicherfähigkeit von Verbrauchern mit hoher Funktionsträgheit realisiert wird. Wird während der Schubabschaltung bei Fahrzeugverzögerung kein Kraftstoff in den Verbrennungsmotor eingespritzt, ist es nahe liegend, dass eine verstärkte Energieerzeugung mit rekuperativem Bremsen stattfindet. Um ein möglichst großes Kraftstoffeinsparpotential zu erreichen stellt sich hier die Frage, wann es sinnvoll ist, die gespeicherte Energie wieder dem Energiesystem zuzuführen. Dafür sind anhand der Wandlungskette die Betriebsbereiche geringer Erzeugereffizienz zu identifizieren. Zur Vereinfachung der Untersuchungen sollen dynamische Verluste vernachlässigt werden. Wegen des vorgegebenen Fahrprofils bleiben die mechanischen Beschleunigungsverluste identisch. Durch die Entkopplung können zusätzliche dynamische Verluste bei den Stellrichtungen zur Leistungsänderung entstehen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass ihr Anteil bei der Bestimmung des Einsparpotentials einen geringen Einfluss besitzt.

4.2 Analytische Betrachtungen der Wandlungskette

Anhand der Wirkungsgradkennfelder von Verbrennungsmotor und Generator kann eine analytische Betrachtung der Wandlungskette erfolgen. Es werden zunächst separate Wirkungsgradbetrachtungen von Verbrennungsmotor und Generator unter Verwendung von stationären Kennfeldern bzw. mittleren Wirkungsgraden durchgeführt. Im Anschluss daran werden die Einsparpotentiale der Wandlungskette für Lastpunktverlagerungen abgeleitet.

4.2.1 Wirkungsgrade am Verbrennungsmotor

Der mittlere effektive Wirkungsgrad η_{VM} eines Verbrennungsmotors setzt sich aus den thermodynamischen Eigenschaften des Verbrennungsprozesses und den mechanischen

Verlusten zusammen (Bild 4.4). Ausgehend vom Wirkungsgrad des vollkommenen Motors im idealen Kreisprozess η_{voll} ist der Gesamtgütegrad $\eta_{güte}$ mit dem Wirkungsgrad der Kraftstoffzufuhr $\eta_{ks zu}$ und dem Motortyp zu berücksichtigen. Weiterhin müssen mechanische Verluste η_m beachtet werden. Sie setzen sich aus den Reibungsverlusten, den Strömungsverlusten sowie der Arbeit zum Antrieb des Ventiltriebs und der Hilfsenergie von Nebenaggregaten zusammen³. Demnach gilt [Url94]:

$$\eta_{VM} = \eta_{voll} \cdot \eta_{güte} (\eta_{ks zu}, VM_{Typ}) \cdot \eta_m \quad (4.1)$$

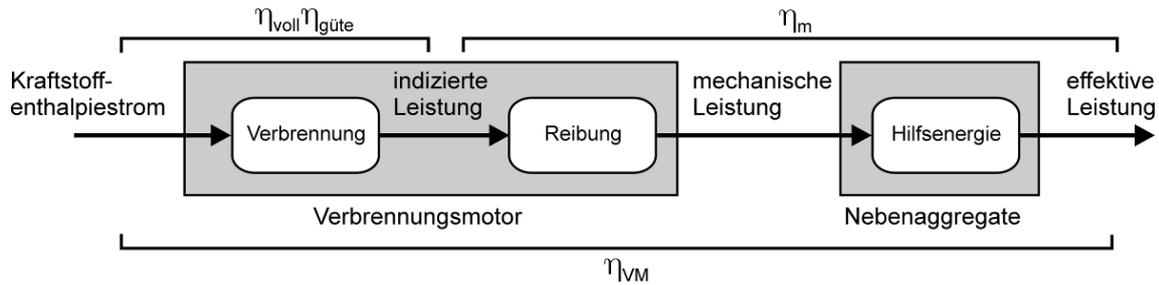


Bild 4.4: Wirkungsgrade am Verbrennungsmotor

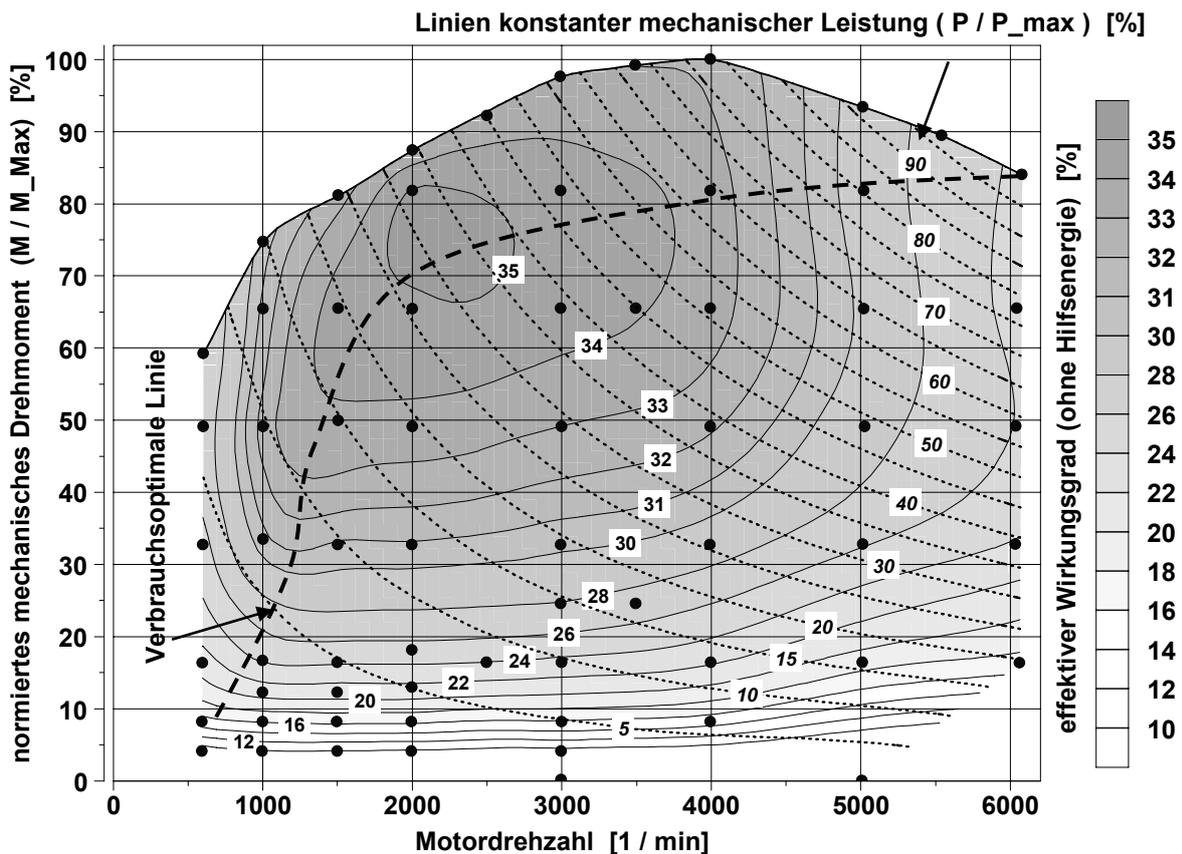


Bild 4.5: Effektives Wirkungsgradkennfeld des untersuchten Valvetronic-Ottomotors [Ris05], interpoliert nach den eingezeichneten Messpunkten

³ Bei der Vermessung an Motorprüfständen spielen nur die Hilfsenergien eine Rolle, welche für den Betrieb des Motors notwendig sind (Kühlkreisläufe, Kraftstoffpumpe, DME, ...). Im konkreten Fall müssen die motor- und messspezifischen Randbedingungen angegeben werden.

Zwei weitere wichtige Einflussgrößen auf den effektiven Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors sind zum einen die zugehörige Motorsteuerung mit ihrer Applikation zur Betriebsartenführung und zum anderen die Betriebstemperatur des Motors. Bild 4.5 zeigt das effektive Wirkungsgradkennfeld des untersuchten Valvetronic-Ottomotors:

$$\eta_{VM} = f(M_{VM}, n_{VM}). \quad (4.2)$$

Die Messdaten stammen aus Grundmotorvermessungen am Motorenprüfstand der TU Dresden [Ris05]. Die Vermessung erfolgte bei betriebswarmem Motor ohne Nebenaggregate. Sämtliche Hilfsenergie wurde von extern bereitgestellt, die Kühlmittelpumpe extern angetrieben. Damit entspricht das erfasste Drehmoment an der Kurbelwelle dem gesamten abgegebenen Drehmoment des Motors. In den folgenden Betrachtungen wird diese mechanische Motorleistung (vgl. Bild 4.4) als nutzbare Leistung für die Wirkungsgradberechnungen verwendet. Aus dem Kennfeld sind die für den Ottomotor typischen Werte zu entnehmen. So werden die maximalen Wirkungsgrade bis 35 % im oberen Teillastbereich zwischen 50-90 % vom Maximalmoment und bei mittleren Drehzahlen von 1500 bis 3500 min^{-1} erreicht. Zwei Drittel der chemischen Kraftstoffenergie wird bei der Verbrennung durch das Abgas und die Kühlkreisläufe in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. In dem Kennfeld sind ebenfalls die Linien konstanter mechanischer Leistung $P_{m,VM}$ gestrichelt dargestellt. Hieraus kann die verbrauchsoptimale Linie $\beta(P_{m,VM})$ graphisch approximiert werden. Sie folgt entlang den Betriebspunkten mit dem jeweiligen größten Wirkungsgrad:

$$\beta(P_{m,VM}) = \max \{ \eta_{VM}(n_{VM}, M_{VM}) \mid P_{m,VM} \}, \quad (4.3)$$

mit

$$P_{m,VM} = 2\pi \cdot n_{VM} \cdot M_{VM}. \quad (4.4)$$

Befindet sich der aktuelle Arbeitspunkt unterhalb der verbrauchsoptimalen Linie, kann bei konstanter Drehzahl durch eine Lastpunktanhebung der Wirkungsgrad erhöht werden, oberhalb der Linie ist die Erzeugung sekundärer Endenergie nicht effizient. Um das Einsparpotential einer Drehmoment-Lastpunktverlagerung genauer zu bestimmen, sind die Differenzen des Wirkungsgrades entlang konstanter Drehzahlen entscheidend. Eine anschauliche Betrachtung kann mit Hilfe von Willans-Kennlinien erfolgen.

Wirkungsgradbetrachtungen mit Willans-Kennlinien

Mit den Willans-Kennlinien⁴ wird die Abhängigkeit der zugeführten Leistung als Funktion der nutzbaren Leistung bei konstanten Drehzahlen dargestellt, deshalb bieten sie sich für Wirkungsgradbetrachtungen an. Die Darstellung kann zur näherungsweise Bestimmung der mechanischen Verlustarbeit von Verbrennungsmotoren verwendet werden [Url94]. Der Ansatz kann ebenfalls allgemein zur Modellierung von Energiewandlern angewendet werden [Riz99], wobei häufig zur Modellvereinfachung eine Linearisierung der Kennlinien

⁴ Die Bezeichnung geht auf den britischen Ingenieur P.W. Willans (ca. 1900) zurück, welcher die Effizienz von hochdrehenden Dampfmaschinen untersuchte.

durchgeführt wird. Im Anhang A.3 ist der qualitative Verlauf der linearisierten Kennlinie dargestellt.

Für den zu untersuchenden Verbrennungsmotor ergeben sich die in Bild 4.6 abgebildeten Kennlinien für einige Drehzahlen. Die zugeführte Leistung $P_{ks,VM}$ entspricht dabei dem Kraftstoffenthalpiestrom

$$P_{ks,VM} = B \cdot H_{ks} \quad (4.5)$$

für die Nutzleistung ist die mechanische Leistung $P_{m,VM}$ an der Kurbelwelle vorgegeben. Im jeweils mittleren Lastbereich sind lineare Bereiche zu erkennen. Im unteren Lastbereich steigt der Wirkungsgrad schneller an, im oberen Lastbereich fällt er etwas ab. Der Anstieg im linearen Bereich der Kennlinien im mittleren Drehzahlbereich beträgt 41 % mit einer maximalen Abweichung von ± 3 % [Büc06b]. Im Motorleerlauf und bei hohen Drehzahlen ab 4000 min^{-1} sind die Anstiege deutlich kleiner. Im Vergleich zu Angaben aus der Literatur ist eine gute Übereinstimmung festzustellen [Rho96]. Das nichtlineare Verlustverhalten des Verbrennungsmotors liegt zum einen an zusätzlichen leistungsabhängigen Verlusten, die bei der Energiewandlung auftreten⁵. Zum anderen wird durch Maßnahmen der Motorsteuerungen bewusst der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors beeinflusst, um sein Betriebsverhalten zu verbessern. Als Stichpunkte seien der Drehmomentvorhalt, die Kraftstoffanfertigung und die Klopfregelung genannt.

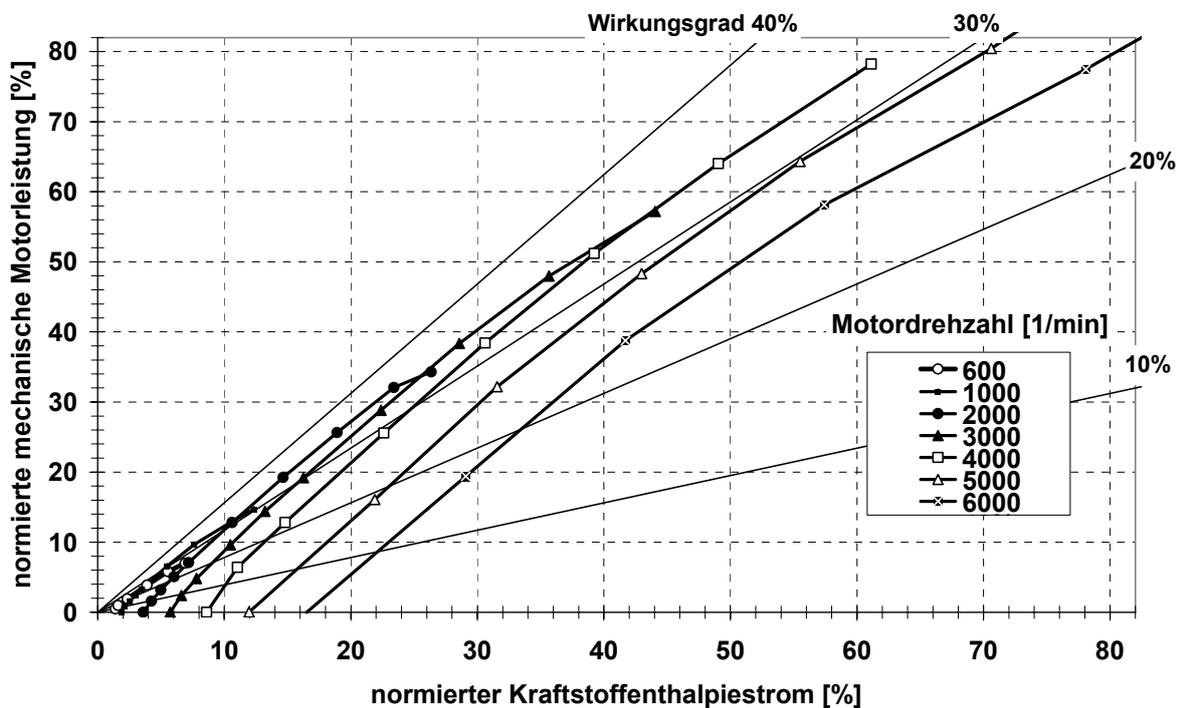


Bild 4.6: Willans-Kennlinien des untersuchten Verbrennungsmotors

⁵ In [Büc06b] wird mit einer elektrischen Analogiebetrachtung anhand eines aktiven Zweipols nachgewiesen, dass der gekrümmte, nichtlineare Verlauf der Willans-Kennlinien den stromabhängigen Verlusten am Innenwiderstand des Quellen-Ersatzschaltbilds entspricht.

Eine zusätzliche mechanische Lastanforderung bei gegebenem Arbeitspunkt AP_1 ergibt eine Verschiebung zu Arbeitspunkt AP_2 auf der Willans-Kennlinie (Bild 4.7). Es ist zu erkennen, dass sich der Wirkungsgrad verbessert, da der Anstieg der Verbindungsgerade zum Koordinatenursprung zunimmt. Die dafür notwendige *zusätzliche* Leistung $\Delta P_{ks,VM}$ (Kraftstoff*mehr*verbrauch) berechnet sich aus

$$\Delta P_{ks,VM} = P_{ks,VM}(AP_2) - P_{ks,VM}(AP_1) = \frac{P_{m,VM}(AP_2)}{\eta_{VM}(AP_2)} - \frac{P_{m,VM}(AP_1)}{\eta_{VM}(AP_1)} = \frac{P_{m,zus}}{\Delta\eta}, \quad (4.6)$$

wobei der Delta-Wirkungsgrad $\Delta\eta$ dem Anstieg der Verbindungsgeraden zwischen den beiden Arbeitspunkten entspricht:

$$\Delta\eta = \frac{\Delta P_{m,VM}}{\Delta P_{ks,VM}} = \frac{P_{m,VM}(AP_2) - P_{m,VM}(AP_1)}{P_{ks,VM}(AP_2) - P_{ks,VM}(AP_1)}. \quad (4.7)$$

Es ist wichtig hervorzuheben, dass im Delta-Wirkungsgrad nur die „inneren“, für die zusätzliche Leistungsbereitstellung auftretenden Verluste berücksichtigt sind. Die „externe“ Verluste, z. B. drehzahlabhängige Reibungsverluste, sind für Fragen der Lastpunktverschiebung nicht relevant.

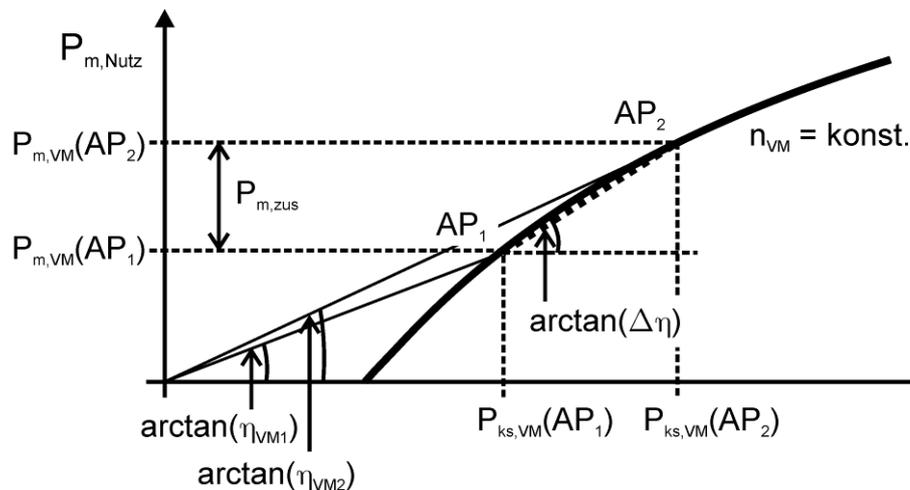


Bild 4.7: Definition des Deltawirkungsgrades für eine Lastpunktverlagerung anhand der Willans-Kennlinie

Aus der rechtsseitigen Differenzenbildung können die Delta-Wirkungsgrade der vermessenen Arbeitspunkte berechnet werden. Dabei treten messtechnisch bedingte Streuungen auf. Trotzdem lassen sich aus Bild 4.8 tendenzielle Aussagen bei Lastpunktverschiebung am Verbrennungsmotor treffen. Eine zusätzliche Belastung ist in Bereichen hoher Delta-Wirkungsgrade sinnvoll. Eine höhere mechanische Leistungsabgabe des Verbrennungsmotors ist damit:

- im Leerlaufdrehzahlbereich und bei hohen Drehzahlen ($> 4000 \text{ min}^{-1}$) ungünstig,
- im unteren Teillastbereich bis etwa 20 % vom Maximalmoment besonders günstig,
- im oberen Lastbereich oberhalb der verbrauchsoptimalen Linie ungünstig.

In dem Kennfeld ist ebenfalls der annähernd linearere Bereich bei mittleren Drehzahlen und Lastmomenten deutlich zu erkennen. Da die meisten Arbeitspunkte im Fahrbetrieb, insbesondere bei gesetzlichen Fahrzyklen, in diesem Bereich liegen, wird zur Abschätzung eines Kraftstoffmehrverbrauchs bzw. Kraftstoffeinsparungspotentials häufig vereinfacht der mittlere Delta-Wirkungsgrad verwendet z. B. in [Mül01], [Bäk98].

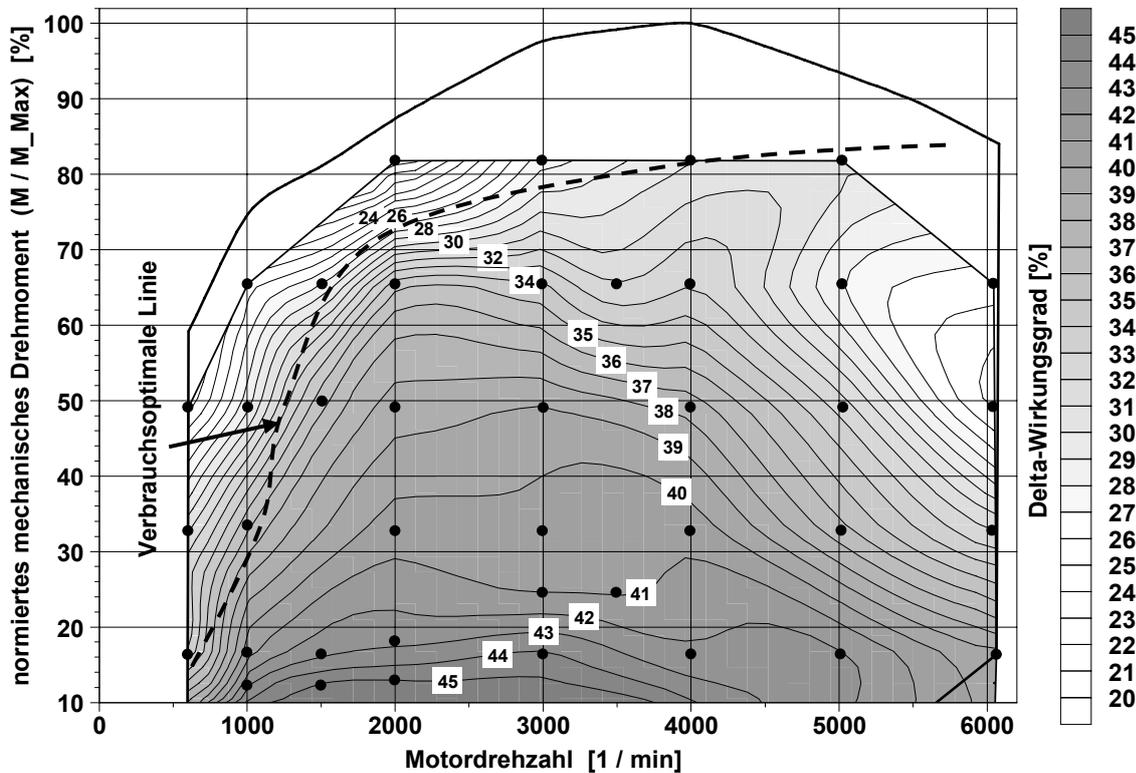


Bild 4.8: Delta-Wirkungsgrade im Kennfeld des untersuchten Verbrennungsmotors, linear interpoliert nach der rechtsseitigen Differenzenbildung der eingezeichneten Messpunkte⁶

4.2.2 Wirkungsgrade am riemengetriebenen Klauenpolgenerator

Die Verlustleistung elektrischer Maschinen kann allgemein in Verluste der elektrischen Stromkreise, der magnetischen Kreise und in mechanische Verluste aufgeteilt werden. Die Aufteilung der Verlustleistungen des untersuchten Drehstrom-Klauenpolgenerators bei Nenndrehzahl und maximaler elektrischer Leistung zeigt Bild 4.9 in einem Sankey-Diagramm. Die Darstellung resultiert aus der Vermessung der Einzelkomponenten und des Gesamtwirkungsgrades an einem Bordnetzprüfstand (vgl. Abschnitt 6.1) sowie einfachen analytischen Berechnungen [Sal07]. Der Betrag und die Aufteilung der Verluste sind bei

⁶ Es wird angenommen, dass durch Fahrwiderstände und Leistungsanforderungen sekundärer Energiewandler eine ständige Grundlast an der Kurbelwelle auftritt, welche etwa 10 % des Maximalmoments entspricht.

gegebener Bauform⁷ im Wesentlichen von der Drehzahl, dem Generatorstrom und der Temperatur abhängig (vgl. Anhang A.2).

Das Wirkungsgradkennfeld des untersuchten Generators ist in Bild 4.10 dargestellt. Die Vermessung erfolgte am Bordnetzprüfstand unter Vorgabe stationärer Arbeitspunkte für Drehzahl und Laststrom. Die Sollspannung wurde mit 14,3 V fest vorgegeben:

$$\eta_{Gen} = f(n_{Gen}, P_{el,Gen}) \quad | \quad U_{Gen} = konst. \quad (4.8)$$

Um den Einfluss der Temperatur gering zu halten, wurde der Generator nach der stationären Belastung elektrisch entregt. Mit Hilfe seiner Eigenkühlung konnte dadurch während der Messungen eine annähernd konstante Ständertemperatur von 50 °C gewährleistet werden.

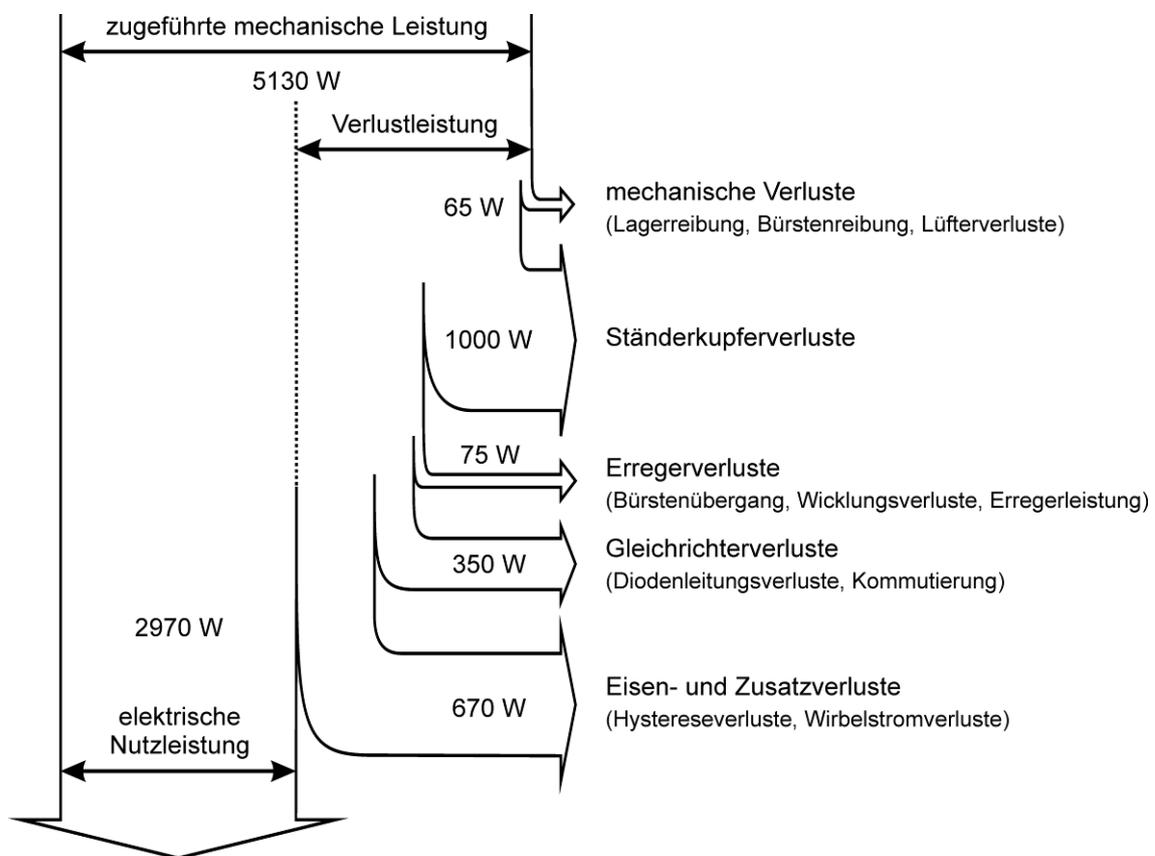


Bild 4.9: Sankey-Diagramm des untersuchten Klauenpolgenerators bei Nenndrehzahl von 6000 min⁻¹ und maximaler Leistung

Aus dem Kennfeld kann entnommen werden, dass der Generator für die häufigen Betriebsfälle bis Drehzahlen von 12000 min⁻¹ und elektrischen Leistungen bis 1500 W optimiert wurde. Eine elektrische Energieerzeugung sollte deshalb bevorzugt in diesem Bereich erfolgen. Bei höheren Leistungsanforderungen sinkt der Wirkungsgrad stetig und umso

⁷ In [Küp96] und [Sch06] werden die Verluste der elektrischen und magnetischen Kreise mit Hilfe von Finite-Elemente Rechnungen näher untersucht. Es erfolgen Bewertungen verschiedener konstruktiver Maßnahmen zur Steigerung der Leistungsabgabe und des Wirkungsgrades.

schneller, je höher die Drehzahl ist. Wird der Generator mit sehr hohen Drehzahlen betrieben, werden nur noch geringe Wirkungsgrade erreicht.

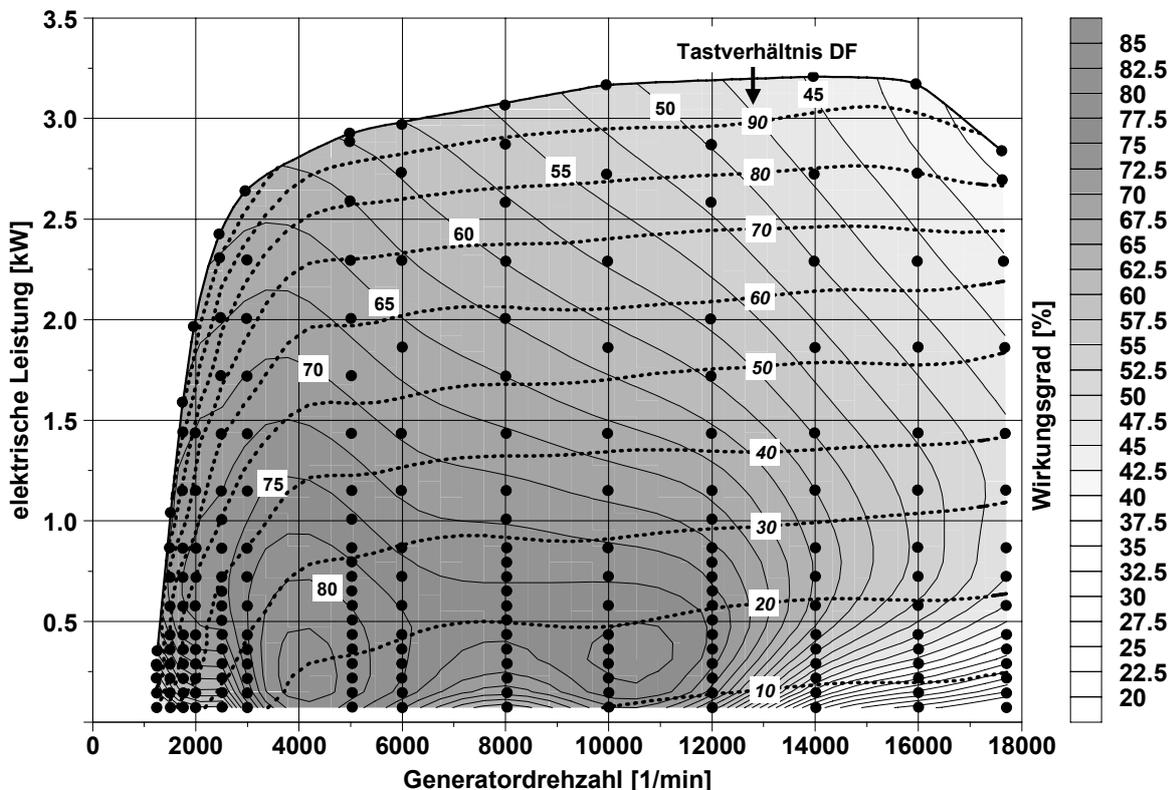


Bild 4.10 Wirkungsgradkennfeld des untersuchten Generators, interpoliert nach den eingezeichneten Messpunkten ($U_{\text{Gen,soll}} = 14,3\text{V}$, ϑ_{Gen} ca. 50°C)

Die Aussagen werden durch die Willans-Kennlinien in Bild 4.11 bestätigt. Dabei ist auffällig, dass im Gegensatz zum Verbrennungsmotor die Kennlinien über einen weiten Drehzahlbereich bis etwa 6000 min^{-1} erst ab hohen Nutzleistungen divergieren. Eine Lastpunktverschiebung wird daher erst in diesem Bereich Einsparpotentiale bieten. Da der Anstieg der Kennlinien mit zunehmender Leistungsbereitstellung immer geringer wird, sollten hohe Auslastungen des Generators gemieden werden, insbesondere in Bereichen hoher Drehzahlen.

Das Temperaturverhalten des Generators wird von seiner Verlustleistung, Lüfterdrehzahl und der Umgebungstemperatur im Motorraum beeinflusst. Kann die entstehende Verlustleistung nicht ausreichend abgeführt werden, erwärmt sich der Generator. Diese Temperaturerhöhung bewirkt einen weiteren Anstieg der stromabhängigen Verluste und wird vom Regler durch Erhöhung der Erregerspannung kompensiert. Bei hohen Auslastungen wird deshalb insbesondere bei niedrigen Drehzahlen der Generatorwirkungsgrad weiter reduziert. Bei exemplarischen Messungen ist eine Minderung des Wirkungsgrades bei hohen Ständereisentemperaturen zwischen 1 % bis 5 % festgestellt worden [Sal07].

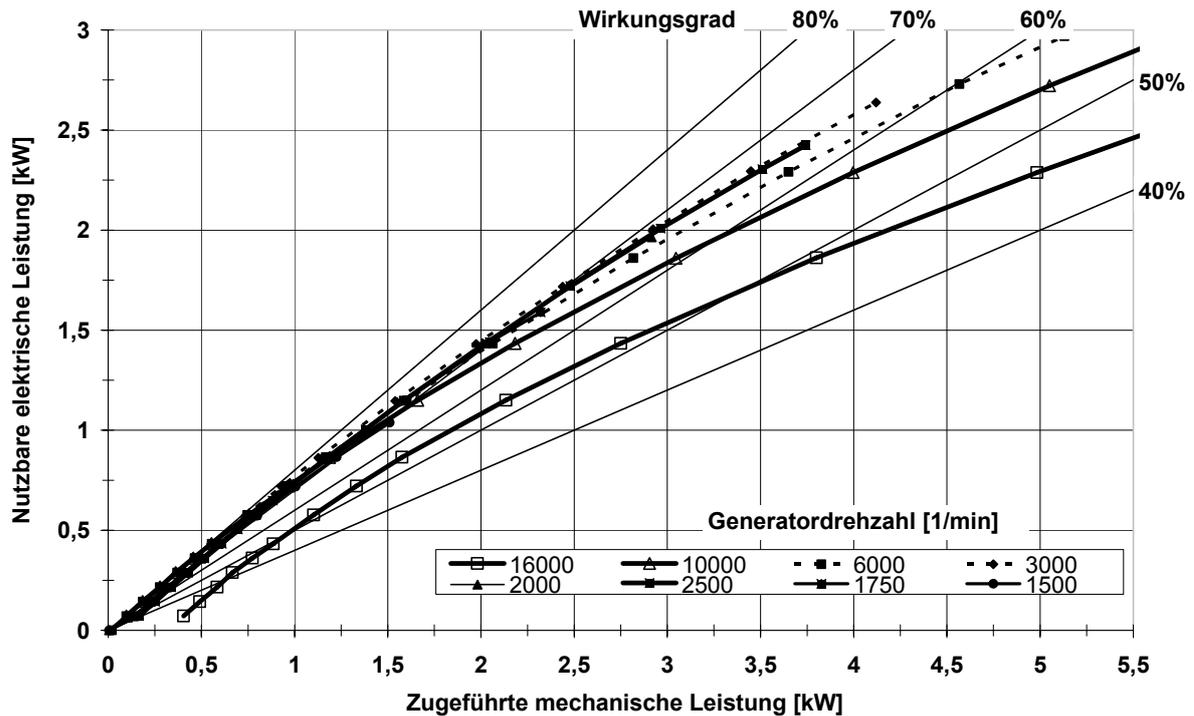


Bild 4.11 Willans-Kennlinien des untersuchten Generators

4.2.3 Aussagen zum Gesamterzeugersystem

Wird die Antriebsleistung des Generators als zusätzliche mechanische Leistung $P_{m,zus}$ an der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors angesetzt, kann mit Hilfe von Gleichungen (4.5) und (4.6) der zur elektrischen Energieerzeugung notwendige Kraftstoffmehrverbrauch B berechnet werden:

$$B = \frac{\Delta P_{ks,VM}(P_{el,Gen}, M_{VM}, n_{VM})}{H_{ks}} = \frac{P_{m,zus}}{\Delta \eta \cdot H_{ks}} = \frac{P_{el,Gen}}{\Delta \eta \cdot \eta_{Gen} \cdot H_{ks}}. \quad (4.9)$$

Dabei wird vereinfacht von einer starren Kopplung der beiden Drehzahlen über den Riemtrieb ausgegangen⁸. Die Verluste im Riemtrieb sind damit vernachlässigt. Der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} wird bei der Betrachtung von Drehzahl und Lastmoment des Verbrennungsmotors und der Generatorleistung bestimmt:

$$\eta_{ges} = \Delta \eta(n_{VM}, M_{VM}) \cdot \eta_{Gen}(n_{VM} \cdot \ddot{u}_R, P_{el,Gen}) \quad (4.10)$$

Anhang A.3 enthält eine Tabelle mit den berechneten Gesamtwirkungsgraden in Abhängigkeit einzelner Arbeitspunktbereiche der einzelnen Größen. Daraus ist zu entnehmen, dass der Gesamtwirkungsgrad in einem weiten Bereich zwischen 13 % und 35 % schwankt. Die Variation in den häufigen Betriebsbereichen niedriger bis mittlerer Drehzahlen und bei

⁸ Das Übersetzungsverhältnis \ddot{u}_R aus den Wirkdurchmessern der Riemenscheiben des untersuchten Systems beträgt 2,93:1. Es wird ein Keilrippenriemen vom Profil PK6 eingesetzt. Die tatsächliche Drehzahlübersetzung ist von der Riemenvorspannung und der Belastung des Riemetriebes abhängig. Der Schlupf (und damit die Verlustleistung) beträgt im Mittel 2 %.

mittleren Lastmomenten sowie elektrischen Leistungen von 500 W bis 1000 W fällt jedoch mit 27 % bis 31 % relativ gering aus. Allein im Leerlaufdrehzahlbereich können Wirkungsgrade von nur 24 % erreicht werden. Die niedrigen Gesamtwirkungsgrade treten im hohen Drehzahlbereich und bei hohen Lastmomenten des Verbrennungsmotors auf. Dies wird ebenfalls aus Bild 4.12 deutlich, in welchem exemplarisch im Motorkennfeld der Kraftstoffmeherverbrauch zur Erzeugung von 500 W elektrischer Leistung dargestellt ist. Der effiziente Bereich befindet sich unterhalb der verbrauchsoptimalen Linie und erstreckt sich von etwa 1000 min^{-1} bis 4000 min^{-1} . Oberhalb von 4000 min^{-1} nimmt der Wirkungsgrad mit steigender Drehzahl rasch ab. Auch im Motorleerlauf findet keine effiziente Erzeugung elektrischer Energie statt.

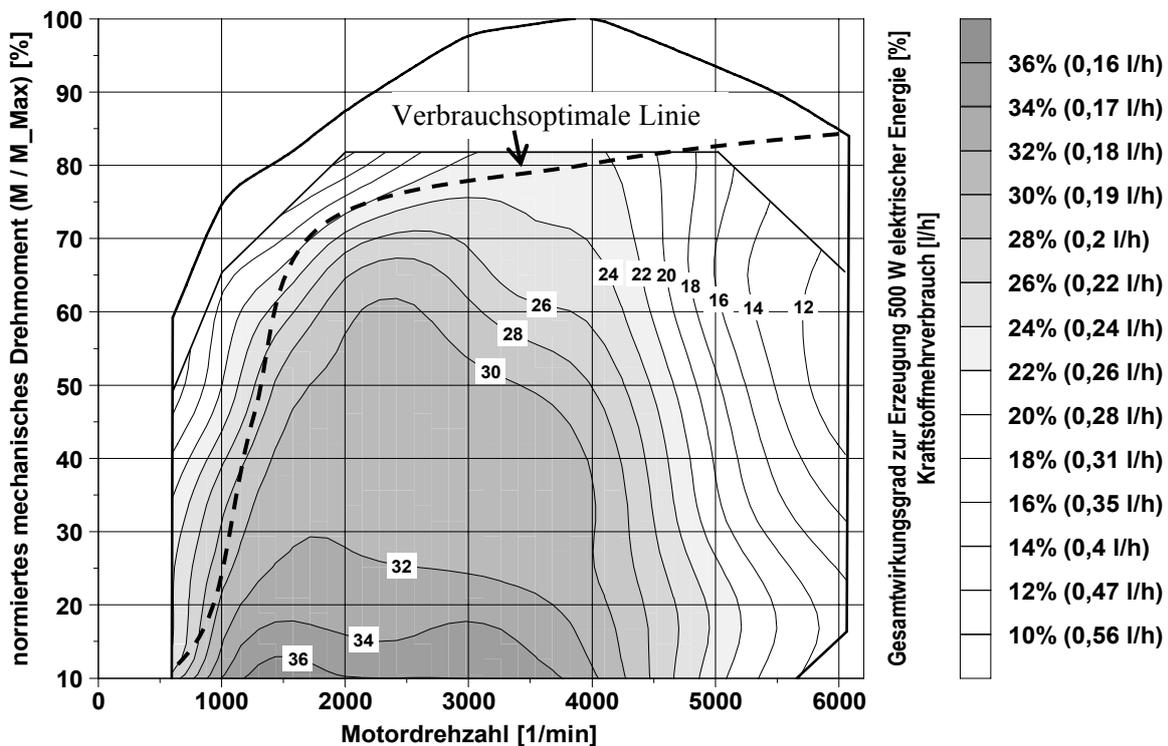


Bild 4.12: Gesamtwirkungsgrad und Kraftstoffmeherverbrauch zur Erzeugung von 500 W elektrischer Energie in Abhängigkeit von Motordrehzahl und mechanischem Lastmoment ($H_{ks} = 8840 \text{ Wh/l}$)

Da in gesetzlichen Fahrzyklen wie im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bei den meisten Fahrzeugen keine hohen Drehzahlen und relativen Lastmomente gefordert werden, beschränkt sich hier das Einsparpotential auf die Leerlaufanteile. Wird durch Lastpunktverlagerung für Phasen des Motorleerlaufs die Erzeugung elektrischer Energie auf den Fahrbetrieb verschoben, ergibt sich im untersuchten System bei der Erzeugung von 500 W elektrischer Leistung ein theoretisches Einsparpotential im NEFZ von etwa 9 ml Kraftstoff⁹ oder 0,08 l/100km. Kann die Energiemenge vollständig durch rekuperatives Brem-

⁹ Annahmen: Der Gesamtwirkungsgrad beträgt im Motorleerlauf 20 %, der Gesamtwirkungsgrad im Fahrbetrieb 30 %. Das ergibt eine Verbrauchseinsparung von 0,11 l/h (vgl. Bild 4.12). Die Stillstandszeiten betragen im NEFZ 293 s. Dies ergibt eine Einsparung von 9 ml Kraftstoff. Umgerechnet auf die Fahrzykluslänge von 11 km ergibt sich ein Einsparpotential von 80 ml/100km.

sen gewonnen werden, steigt das Einsparpotential auf 22 ml bzw. 0,2 l/100km an. Da die einfache Überschlagsrechnung die Speicherverluste nicht berücksichtigt, wird das Einsparpotential in der Realität geringer ausfallen. In Abhängigkeit von der Dauer der Motorstillstandsphasen bietet die Start-Stopp-Funktion des Verbrennungsmotors zumeist deutlich höhere Einsparpotentiale [Neu07].

Im praxisrelevanten Fahrbetrieb ist ebenfalls der Bereich hoher Drehzahlen und Lastmomente beim Anfahren bzw. während einer Fahrzeugbeschleunigung für eine Lastpunktverschiebung interessant. Hier kann zusätzlich die hohe Dynamik des Generators für ein „passives Boosten“ während des Beschleunigungsvorgangs besonders im niedrigen Drehzahlbereich ausgenutzt werden.

Der Gesamtwirkungsgrad nimmt mit wachsender elektrischer Leistung stetig ab. Deshalb muss bei einer Lastpunktverlagerung beachtet werden, dass der effiziente Bereich nicht überschritten wird. Bei dem untersuchten System beträgt er etwa 1500 W. Die mittlere Bordnetzlast sollte deutlich unter dieser Grenze liegen, damit genügend Stellbereich für eine Lastpunktverlagerung vorhanden ist.

Aus den Betrachtungen wird deutlich, dass die Einsparpotentiale durch Lastpunktverlagerungen und rekuperativem Bremsen (Strategie 3) von der Verteilung und der Häufigkeit der Betriebspunkte von Verbrennungsmotor und Generator im Fahrzeugbetrieb abhängig sind. Um diesen Einfluss bei dynamischen Betriebsstrategien zu berücksichtigen, müssen die Betrachtungen mit zeitlichem Bezug erfolgen¹⁰. Die Fragestellung nach einer zeitlichen Betriebsführung eines Energiesystems hinsichtlich einer Energieeinsatzoptimierung wird mit Hilfe von Optimierungsverfahren gelöst [Cra04], [Mei00], [Kut06], [Kes07].

4.3 Simulationsgestützte Optimierung der Wandlungskette

Die Suche nach der bestmöglichen Betriebsführung bei gegebenen zeitlichen Leistungsanforderungsprofilen ist mit Optimierungsverfahren möglich. Diese Methode ist besonders bei komplexen Energiesystemen mit vielen Freiheitsgraden¹¹ zielführend.

Die wichtigsten Kriterien bei der Auswahl eines Optimierungsverfahrens sind neben der notwendigen Rechenkapazität und -dauer das Aussehen von Zielfunktion und Nebenbedingungen. Im Fall der Energieeinsatzoptimierung kann die Zielfunktion im Allgemeinen als eine Kostenfunktion aufgefasst werden. Nebenbedingungen entstehen durch Restriktionen im Energiesystem und externen Anforderungen (vgl. Bild 2.12). Hinsichtlich des Energiesystems müssen allgemein folgende Eigenschaften beachtet werden [Hab04]:

¹⁰ vergleiche [Win03], Kapitel 4.2

¹¹ Bei der Energieeinsatzoptimierung entstehen die Freiheitsgrade durch die Variation der Leistungsflüsse im Energiesystem. Zusätzliche Freiheitsgrade treten auf, wenn die Dimensionierung von Komponenten mit einbezogen wird [Kut06].

- Unstetigkeiten, Nichtlinearitäten:
Begrenzungen, Schalten, nichtlineare Zusammenhänge,
- Hochdimensional:
Anzahl der Komponenten, Systemzuständen und Zeitintervalle,
- Nicht trennbar:
Betriebszustände sind durch den Einsatz von Energiespeichern in den Teilintervallen voneinander abhängig.

In Bild 4.13 sind in einer Übersicht verschiedene Optimierungsverfahren genannt, welche in der Einenergieeinsatzoptimierung bevorzugt eingesetzt werden. An mathematischen Verfahren kommen verschiedene numerisch iterative Verfahren in Frage. Sie zeichnet aus, dass sie den gesamten Lösungsbereich des Systems anhand der aufgestellten Zielfunktionen und Ungleichungsbedingungen durchsuchen. Damit stellt die gefundene Lösung stets das globale Optimum dar. Nachteilig ist jedoch der enorme Rechenaufwand, welcher nichtlinear mit den Freiheitsgraden sowie Zustands- und Zeitdiskretisierungen ansteigt. Damit das Systemmodell berechenbar bleibt, muss es deshalb stark vereinfacht werden. Die Güte der Lösung ist somit direkt von der Modellgenauigkeit abhängig.

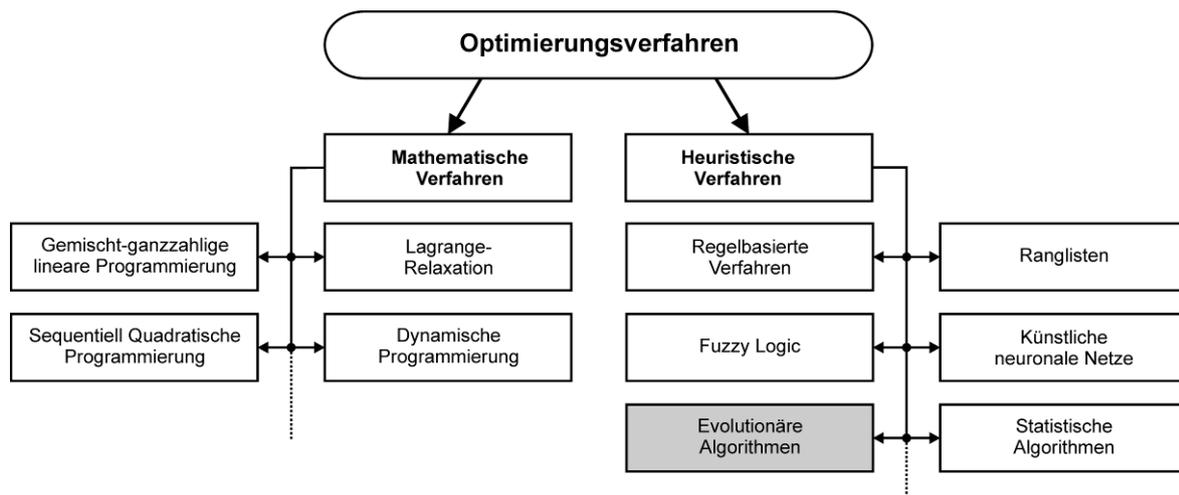


Bild 4.13: Übersicht von Optimierungsverfahren zur Energieeinsatzoptimierung

In [Kes07] wird die dynamische Programmierung zur Energieeinsatzoptimierung verschiedener Hybridantriebskonzepte und zur Optimierung der elektrischen Energieerzeugung genutzt. Als Modelle der Energiewandler werden die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Willans-Kennlinien verwendet, welche stückweise linearisiert werden. Durch geschickte Wahl der Diskretisierungsstufen und Berücksichtigung künstlicher Beschränkungen auf Grund von Restriktionen wird der Lösungsraum eingeschränkt.

Demgegenüber ist bei gleicher Systemkomplexität der Rechenaufwand heuristischer Optimierungsverfahren zumeist deutlich kleiner. Der Begriff Heuristik¹² wird allgemein für Verfahren verwendet, welche Probleme systematisch lösen. Es handelt sich dabei um

¹² griechisch: „Kunst des Entdeckens“

Strategien, die auf Grundlage von „Betriebserfahrungen“ bzw. Expertenwissen entwickelt und für günstig ermittelt wurden. Abhängig vom verwendeten Verfahren kann mit zusätzlichem Expertenwissen die Rechenzeit verkürzt werden. Allerdings ist das gefundene Optimum nur so gut wie die aufgestellte Regelbasis. Damit kann nicht garantiert werden, dass das globale Optimum gefunden wird [Hab04]. Vorteil der heuristischen Verfahren liegt in der Trennung zwischen der Energiesystemmodellierung und dem Optimierungsverfahren. Werden Schnittstellen zum Optimierungsmodul geschaffen, können bereits bestehende Simulationsmodelle eingesetzt werden. Die Beschreibung der Modelle ist beliebig, solange die Eingangssteuergrößen verarbeitet und die Systemdaten zur Bildung der Zielfunktion dem Optimierungsmodul zur Verfügung stehen.

Das Prinzip der simulationsgestützten Optimierung mit heuristischen Verfahren ist in Bild 4.14 dargestellt. In einer Rekursionsschleife wird vom Optimierungsverfahren unter Vorgabe der externen Leistungsanforderungen der Parametervektor in geeigneter Weise so lange variiert, bis der Zielfunktionswert minimal bzw. das Abbruchkriterium erfüllt ist. Der Zielfunktionswert wird im Simulationsmodell aus den entstehenden Arbeitskosten und den Strafkosten verletzter Nebenbedingungen des Energiesystems gebildet.

In [Hab04] werden die Evolutionären Algorithmen für die Energieeinsatzoptimierung lokaler Energiesysteme favorisiert und für verschiedene Energiesysteme erfolgreich angewendet. Gegenüber anderen Verfahren zeichnen sie sich dadurch aus, dass die Rechenzeit nur linear mit Größe und Komplexität der Freiheitsgrade im Modell wächst, das globale Optimum nach ausreichend langer Rechenzeit immer gefunden wird und nicht zwingend Expertenwissen notwendig ist. Da das Optimierungsmodul zur Verfügung stand, konnte es nach Anpassung des Energiesystemmodells für die Frage der effizienten Bereitstellung elektrischer Energie im Kraftfahrzeug eingesetzt werden [Büc06b], [Win06].

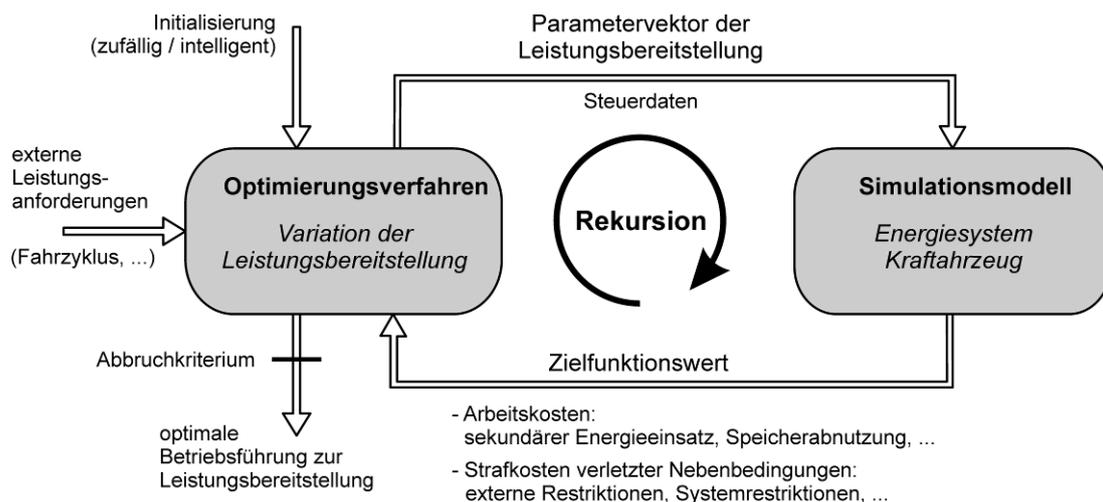


Bild 4.14: Prinzip einer simulationsgestützten Energieeinsatzoptimierung

4.3.1 Evolutionäre Optimierungsalgorithmen

Die evolutionären Strategien wurden erstmals 1972 von Rechenberg vorgestellt und unabhängig davon die genetischen Algorithmen 1975 von Holland. Sie unterscheiden sich nur in Details bzw. lassen sich durch Variation bestimmter Parameter ineinander überführen [Hab04]. Mit evolutionären Algorithmen ist es gelungen, die Mechanismen der biologischen Evolution in einem Algorithmus abzubilden. Die Evolutionstheorie von Darwin erklärt die Entwicklung und Anpassung des Lebens auf natürliche Weise in der Natur (Bild 4.15).

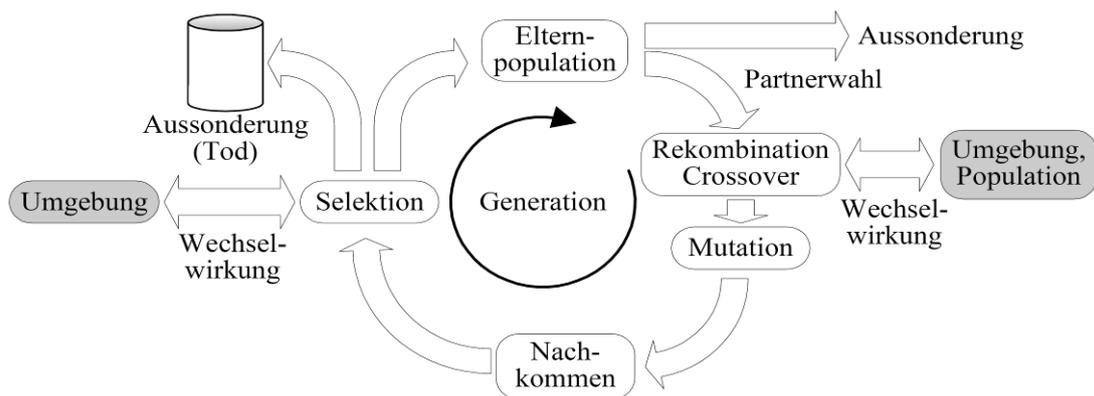


Bild 4.15: Prinzipien der biologischen Evolution [Hab04]

Die Individuen (Lebewesen), die dabei besser an ihre Umgebung angepasst sind als andere, haben eine höhere Überlebenschance. Die Merkmalsausprägung der Individuen ist laut Darwin rein zufällig. Es können mehr Nachkommen von den Individuen gezeugt werden, deren Merkmalsausprägung eine höhere Überlebenschance verspricht. Dies wird auch als „Survival of the fittest“ bezeichnet. In den nachfolgenden Populationen setzen sich langsam die Individuen durch, die „fitter“ sind und damit „bessere“ Merkmale besitzen. Es erfolgt keine zielgerichtete Optimierung der Erbmasse, sondern das Optimierungsverhalten entsteht erst durch die natürliche Auslese.

Entfernt man sich von der strengen Zuordnung zur Biologie, so kann die Evolutionstheorie als ein häufiges und auf viele Bereiche hin anwendbares Entwicklungsprinzip angesehen werden. Viele biologische, menschliche und technische Prozesse laufen nach einem der Evolution ähnlichen Prinzip ab. Die zu optimierenden Parameter eines technischen Systems werden in Form von Replikatoren (Individuen) codiert. Bei solchen abstrahierten Systemen treten folgende Grundprinzipien der Evolution auf [Hab04]:

- Replikatoren (Individuen), die durch Herstellungsinformationen beschrieben sind,
- mögliche zufällige Veränderungen (Mutationen) der Herstellungsinformationen (fehlerbehaftete Vervielfältigung der Replikatoren),
- Kopplung zwischen Eigenschaften der Replikatoren und Vervielfältigungsgeschwindigkeit (kumulative Selektion),
- endliche Ressourcen.

Anwendung zur Energieeinsatzoptimierung

Das Optimierungsmodul wurde aus der Arbeit von Herrn Hable übernommen, welches die Evolutionären Algorithmen in dem Rechenprogramm Matlab umsetzt [Hab04]. Die Codierung der Replikatoren erfolgt in einer Matrix, die aus den Schaltvektoren der einzelnen Komponenten des Energiesystems für den Optimierungszeitraum bestehen (Bild 4.16). In den Schaltvektoren \mathbf{u} sind die relativen Leistungen für die $n+1$ Zeitintervalle hinterlegt:

$$\mathbf{u} = (u[0], \dots, u[n]). \quad (4.11)$$

Die Leistungen sind dabei auf die jeweilige Maximalleistung der Komponente normiert. Positive Werte sind als Leistungsabgabe festgelegt (Erzeugerzählpeilsystem).

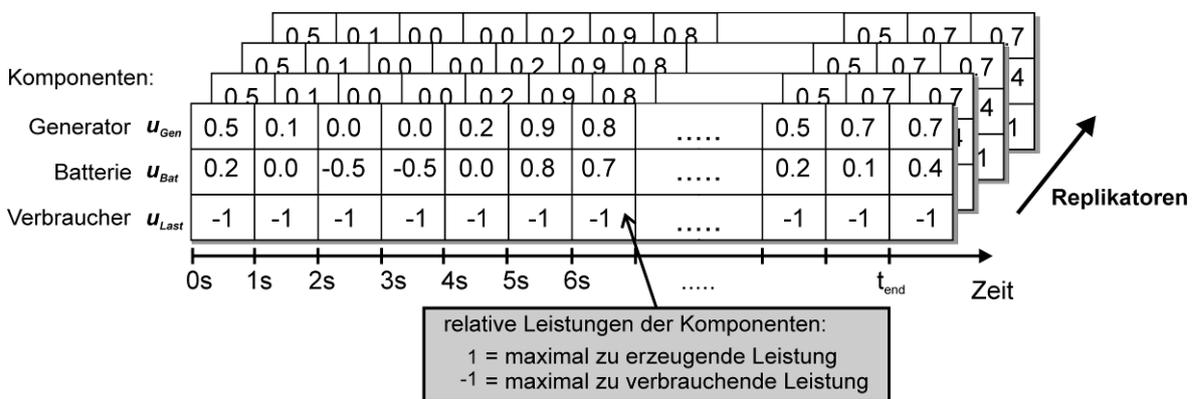


Bild 4.16: Matrixcodierung der Replikatoren, bestehend aus den Parametervektoren zur Leistungsbereitstellung der einzelnen Komponenten

Der Ablauf der Optimierung folgt dem Schema aus Bild 4.14. Im Anhang A5.1 ist ein Programmablaufplan dargestellt. Zur Bewertung der Replikatoren nach ihrer Fitness werden die Kosten, welche im Optimierungszeitraum entstehen, in den einzelnen Komponentenmodellen berechnet. Vom Optimierungsmodul werden je Zyklus (Generation) die genetischen Operationen Partnerwahl, Rekombination, Mutation und Aussonderung durchgeführt. Die Funktionsweise der einzelnen Operationen ist im Anhang A5.1 genauer erläutert. Einige Operationen können durch Parameter in ihrer Ausführung beeinflusst werden, um die Variationsbreite der genetischen Algorithmen aus der Literatur nachzubilden. In [Win06] wurden mit den Empfehlungen aus [Hab04] verschiedene Parametervariationen durchgeführt und ein geeigneter Parametersatz ermittelt. Durch zwei Mechanismen kann die Konvergenzgeschwindigkeit der Optimierung deutlich gesteigert werden:

- Intelligente Initialisierung der Menge der Replikatoren (Startpopulation) durch Nutzung von Expertenwissen, z. B. die Vorgabe „rekuperatives Bremsen“.
- Verbesserung der Fitness der Kinder nach der Rekombination durch „Tipps“. Im konkreten Fall wurde die Leistungsbilanz eines jeden Zeitabschnitts ausgeglichen, um die Strafkosten der verletzen Nebenbedingungen zu vermeiden.

4.3.2 Simulationsmodell des elektrischen Energiesystems

Für die Fragestellung der kraftstoffminimalen Erzeugung elektrischer Energie wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches sich an das Leistungsflussdiagramm in Bild 4.3 anlehnt. Es besteht aus einer Erzeuger-, Speicher- und Verbraucherkomponente. Als Eingangsgröße einer jeden Modellkomponente wird der zugehörige Schaltvektor übergeben und auf seine zulässige Form überprüft. Es erfolgt eine Korrektur, um harte Nebenbedingungen nicht zu verletzen. Danach werden die elektrischen Leistungen und entstehenden Kosten berechnet. Es wird überprüft, ob alle für das Modell zutreffenden weichen Nebenbedingungen erfüllt sind und gegebenenfalls Strafkosten dafür ermittelt. Die in eine zulässige Form gebrachten Schaltvektoren in der Matrixcodierung und die Gesamtkosten im Optimierungszeitraum werden an das Optimierungsverfahren zurückgegeben.

Als Eingangsdaten der Optimierung dienen Fahrzyklusdaten, die während realer Messfahrten mit einem Versuchsfahrzeug aus der sportlichen Oberklasse aufgezeichnet wurden. Verbrennungsmotor und Generator im Fahrzeug entsprechen dabei dem in Abschnitt 4.2 untersuchten System. Da das Versuchsfahrzeug mit spezieller Drehmomentmesstechnik ausgestattet ist, steht neben der Motordrehzahl zusätzlich das Antriebsmoment für das Fahrzeug sowie der einzelnen Nebenaggregate als Messdaten zur Verfügung. Die zeitliche Diskretisierung wird auf 1 Sekunde festgelegt. Sie stellt einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und notwendiger Rechenleistung dar.

Erzeugermodell

Das Erzeugermodell besteht aus Generator und Verbrennungsmotor und basiert auf den in Abschnitt 4.2 vorgestellten stationären Kennfeldern. Im Generatormodell ist die drehzahlabhängige Maximalleistung $P_{el,Gen,max}(n_{VM})$ mit zugehörigem Drehmoment $M_{Gen,max}(n_{VM})$ hinterlegt. Auf diese Weise können bei gegebenem Drehzahlprofil n_{VM} im Voraus die Werte der einzelnen Diskretisierungsschritte ($k \in n$) ermittelt werden. Mit der relativen Leistungsanforderung des Parametervektors \mathbf{u}_{Gen} wird im Optimierungslauf aus diesen Maximalwerten die Generatorleistung $\mathbf{P}_{el,Gen}$ und das dafür notwendige Generatormoment \mathbf{M}_{Gen} vereinfacht linear approximiert¹³. Da der Generator nur Leistung abgeben kann, erfolgt zuvor eine Betragsbildung in jedem Diskretisierungsschritt von \mathbf{u}_{Gen} :

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{Gen}[k] &= |\mathbf{u}_{Gen}[k]| \\ \mathbf{P}_{el,Gen}[k] &= \mathbf{u}_{Gen}[k] \cdot \mathbf{P}_{el,Gen,max}[k] \\ \mathbf{M}_{Gen}[k] &= \mathbf{u}_{Gen}[k] \cdot \mathbf{M}_{Gen,max}[k] \end{aligned} \quad (4.12)$$

Zusammen mit den gemessenen Antriebsmomenten zum Überwinden der Fahrwiderstände und zum Betreiben aller weiteren Nebenaggregate \mathbf{M}_{Fzg+NA} wird nun der Kraftstoffverbrauch aus dem absoluten Verbrauchskennfeld [g/s] des Verbrennungsmotors interpoliert:

¹³ Die leistungsabhängigen Änderungen des Wirkungsgrads bleiben so unberücksichtigt. Dies erspart eine rechenintensive Interpolation im Kennfeld.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{VM}[k] &= \ddot{u}_R \cdot \mathbf{M}_{Gen}[k] + \mathbf{M}_{Fzg+NA}[k] \\ \mathbf{B}_{VM}[k] &= \text{Verbrauchskennfeld}_{VM}(\mathbf{M}_{VM}[k], \mathbf{n}_{VM}[k]) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Um nur den Mehrverbrauch durch die Erzeugung elektrischer Energie zu bestimmen, wird anschließend der im Vorfeld bestimmte Grundverbrauch ohne Generator abgezogen. Der Kraftstoffverbrauch wird anschließend mit einem Faktor λ gewichtet, um ihn in der Zielfunktion eine größere Relevanz zuzuordnen:

$$\mathbf{K}_E[k] = \lambda \cdot (\mathbf{B}_{VM}[k] - \mathbf{B}_{VM\ Fzg+NA}[k]). \quad (4.14)$$

Speicher- und Verbrauchermodell

Das Modell des elektrischen Speichers eines Blei-Akkumulators wurde aus [Hab04] übernommen, welches mit einer vom Ladezustand und Stromverlauf unabhängigen Kapazität rechnet. Um Tiefentladungen zu vermeiden, wird die Batterie nur auf 70 % ihrer Kapazität entladen. Der Anfangsladezustand der Batterie ist auf 95 % gesetzt, damit nicht schon nach kurzer Zeit die Batterie entladen bzw. überladen wird (vgl. Tabelle A5.1). Ansonsten fallen Strafkosten für verletzte harte Nebenbedingungen an. Der Batterie sind Kosten für den Energiedurchsatz zugewiesen. Um zu vermeiden, dass sich die Batterie während der Optimierungszeit kontinuierlich entlädt, wird am Ende des Optimierungsintervalls ein Mindestladezustand gefordert. Bei Unterschreiten werden Strafkosten fällig [Win06].

Im Verbrauchermodell sind alle elektrischen Verbraucher des Energiebordnetzes zusammengefasst. Es kann eine konstante Verbraucherleistung angenommen oder ein Verbraucherprofil in das Modell eingelesen werden. Im Verbrauchermodell werden keine Kosten berechnet, sondern nur der Lastverlauf und der zulässige Schaltvektor an das Optimierungsprogramm zurückgegeben.

4.3.3 Optimierung der elektrischen Energieerzeugung

In Verbindung mit dem vorhandenen Optimierungsmodul wird im Folgenden der Fragestellung einer effizienten elektrischen Energieerzeugung bei einem gegebenen Leistungsprofil nachgegangen.

Wahl der Eingangsdaten

Aus den vorhandenen Fahrzeugmessdaten wird ein dynamisches Fahrprofil gewählt, in welchem möglichst viele Betriebsbereiche des Verbrennungsmotors im realen Fahrbetrieb abgedeckt sind. Um den Rechenaufwand der Optimierung einzugrenzen, wird der Zeitraum eingeschränkt. Einige Kenngrößen des gewählten Fahrprofils, welches von einer Messfahrt mit dem Versuchsfahrzeug im urbanen Verkehr stammt, zeigt Bild 4.18. Die Arbeitspunkte im Kennfeld des Verbrennungsmotors werden für eine spätere Auswertung in fünf Betriebsbereiche eingeteilt: Leerlauf und Anfahren (Bereich 1), Schubphase (Bereich 2), Teillast bei geringen Drehzahlen (Bereich 3), Teillast bei hohen Drehzahlen (Bereich 4), Volllast (Bereich 5). Bei der Auswahl des Fahrprofils wurde darauf geachtet, dass eine

möglichst gleichmäßige Verteilung der Betriebsbereiche vorliegt. Weiterhin sollte eine möglichst hohe Anzahl an Bereichswechseln auftreten, ohne dass die mittlere Verweildauer im Bereich zu klein ist (Tabelle 4.1, Bild 4.17).

Tabelle 4.1: Verteilung der Betriebsbereiche im ausgesuchten Fahrprofil

Betriebsbereich	1	2	3	4	5
prozentualer Anteil im Profil	29 %	21 %	15 %	29 %	6 %
Anzahl zeitlich zusammenhängender Abschnitte	5	15	11	17	6
mittlere Verweildauer	17 s	4 s	4 s	5 s	3 s

Um den Einfluss des Generators für eine Lastpunktverlagerung zu erhöhen und trotzdem einen großen Spielraum für die Optimierung zu gewähren, wird für den gesamten Optimierungszeitraum eine konstante elektrische Leistungsanforderung von 1000 W vorgegeben. Die Annahme vereinfacht die Auswertung zur Fragestellung einer effizienten Energieerzeugung¹⁴.

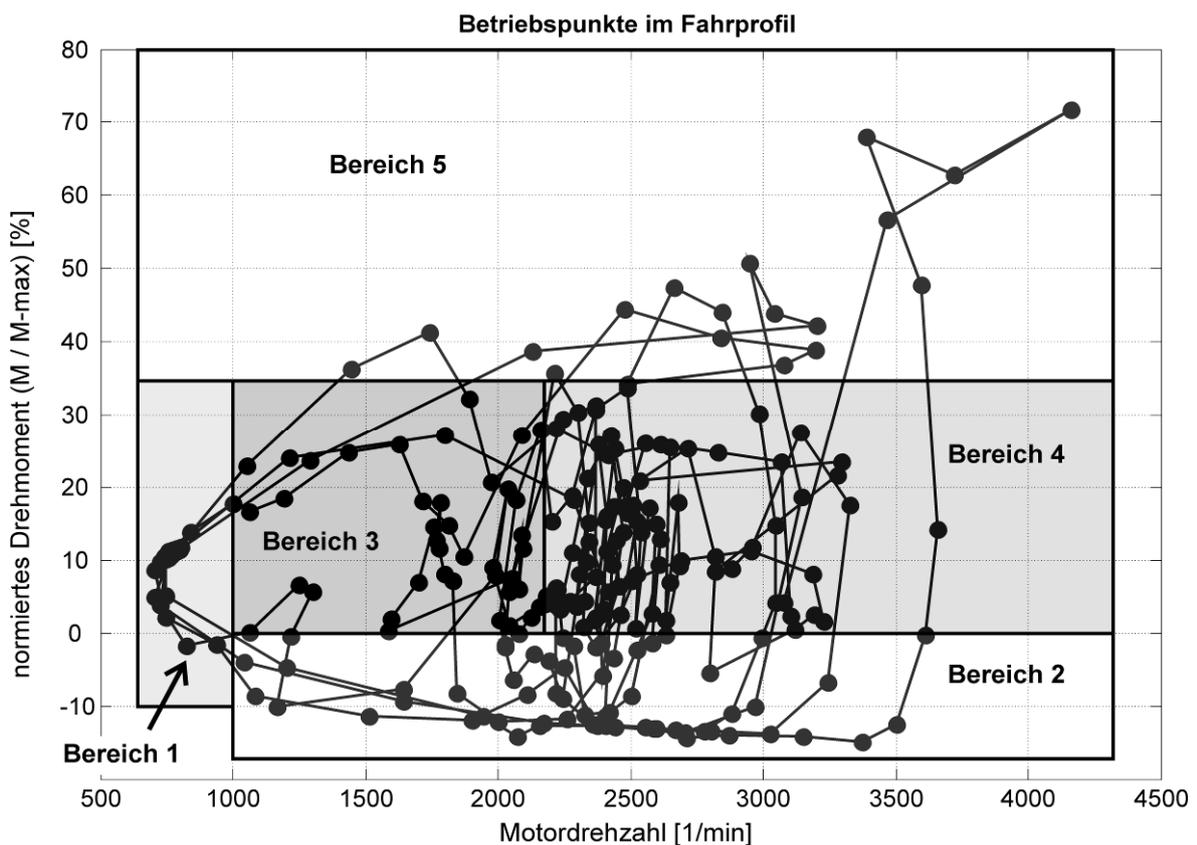


Bild 4.17: Einteilung der Betriebsbereiche im Kennfeld des Verbrennungsmotors mit den Betriebspunkten des ausgewählten Fahrprofils

¹⁴ Um den Freiheitsgrad auf die elektrische Energieerzeugung einzuschränken, wird an dieser Stelle nur die zeitliche Entkopplung über die Batterie als Energiespeicher betrachtet. Wegen $P_{el,Gen} = P_{el,Last} + P_{el,Bat}$ sind Aussagen zur Entkopplung über Verbraucher in einfacher Weise möglich.

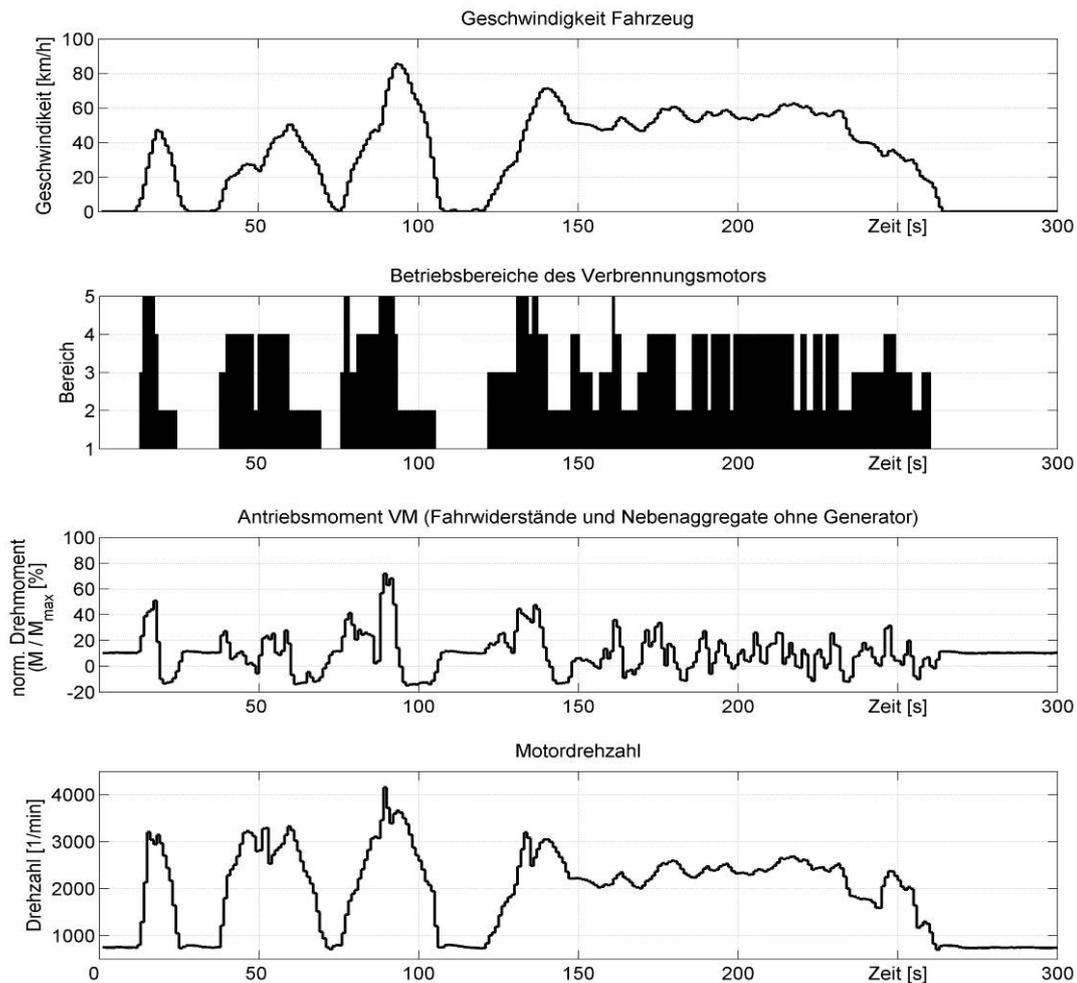


Bild 4.18: Kenngrößen des ausgewählten Fahrprofils für die Optimierung [Win06]

Durchführung der Optimierung

Nach der Durchführung einiger Testläufe zum Ermitteln günstiger Parameter des Optimierungsmoduls wurden für das gegebene Leistungsprofil verschiedene Optimierungsdurchläufe durchgeführt. Die verwendeten Parameter des Optimierungsmoduls sind im Anhang in Tabelle A5.2 angegeben. In allen Optimierungsläufen beträgt die Populationsgröße konstant 1000 Replikatoren. Je Generation wird aus den Eltern durch Rekombination das Zehnfache an Kindern erzeugt. Die Folgegeneration besteht zu 50 % aus den besten und zu 50 % aus zufällig ausgewählten Replikatoren der restlichen Gesamtpopulation (Eltern und Kinder). Die Anzahl der gerechneten Zyklen (Generationen) bis zum Abbruch variiert aus Zeitgründen.

Um die Konvergenzgeschwindigkeit der Optimierung zu erhöhen, wird nach der Rekombination die Leistungsbilanz der Kinder-Replikatoren mit Hilfe von „Tipps“ ausgeglichen. In Abhängigkeit von dem Vorzeichen der Batterieleistung wird entweder die Erzeugerleistung des Generators oder die Entladeleistung der Batterie so angepasst, dass kein Leistungsüberschuss oder –defizit entsteht [Win06]. Die einzelnen Optimierungsdurchläufe unterscheiden sich in der Art der Initialisierung. Aus den Erkenntnissen vorhergehender

Optimierungsläufe und aus den Ergebnissen von Abschnitt 4.2 wird die Startpopulation nach verschiedenen Methoden intelligent initialisiert. Im Anhang A5.3 sind die Ergebnisse von zwei ausgewählten Optimierungsdurchläufen aus [Win06] ausführlich dargestellt (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Übersicht der beiden ausgewählten Optimierungsdurchläufe

Nr.	Initialisierungsverfahren	Anzahl gerechneter Zyklen	Initialisierungsmethode		
			Bereich 1, Leerlauf	Bereich 2, Schubphase	Bereich 5, Volllast
1.	zufällig	3000	-----		
2.	intelligent	11 000	Batterie wird mit mindestens 70 % ihrer Nennleistung entladen	maximale Batterieladung	nur Entladen der Batterie möglich

Ergebnisse der Optimierung

In Tabelle 4.3 sind die resultierenden Kosten beider Optimierungsdurchläufe gegenübergestellt. Der optimierte Parametervektor entspricht dabei dem Schaltvektor des Replikators mit der besten „Fitness“ der Endpopulation. Zur quantitativen Bewertung der Ergebnisse wird der erreichte Gütewert als Kostenangabe¹⁵ und der eingesparte Kraftstoff in Prozent angegeben. Als Referenzwert dient der Kraftstoffverbrauch, wenn die elektrische Energieversorgung ohne zeitliche Entkopplung zwischen Erzeugung und Nutzung geschieht, also ohne Nutzung der Batterie. Dieser Wert wurde anhand einer Simulation unter Nutzung des zuvor beschriebenen Simulationsmodells gewonnen, um Modellierungsfehler auszuschließen¹⁶.

Tabelle 4.3: Ergebnisse der beiden ausgewählten Optimierungsdurchläufe

Nr.	eingesparter Kraftstoff	Gesamtkosten	Kosten Energieerzeugung Batterie	Kosten Energieerzeugung Generator
1.	1,44 %	383,19 €	13,02 €	370,17 €
2.	1,68 %	365,23 €	12,84 €	352,38 €

¹⁵ Die Kosten werden im Simulationsmodell aus den Arbeits- und Strafkosten der Komponenten des Energiesystems berechnet. Sie werden in Euro [€] angegeben, wobei dies nur eine fiktive Vergleichsgröße darstellt. Damit ist der erreichte Zielfunktionswert der Optimierungsdurchläufe gegeben.

¹⁶ Ein Vergleich des Kraftstoffverbrauchs zwischen Erzeugermodell und des Berechnungswertes im Motorsteuergerät des Fahrzeugs ergibt einen relativen Fehler von ca. -8 %. Er entsteht, da im Modell die dynamischen Verluste, das thermische Verhalten sowie Abweichungen der Einspritzmenge durch die fahrzustandsabhängige Vorgabe der Motorsteuerung (z. B. Segeln, Leerlauf) vernachlässigt werden [Win06].

Wie erwartet erkennt man bereits anhand des Leistungsverlaufs nach dem Schaltvektor der ersten Optimierung mit zufälliger Initialisierung, dass es günstig ist, während der Schubphasen (Bereich 2) die Batterie zu laden (vgl. Bild A5.2). Auf Grund des unregelmäßigen Leistungsverlaufs in den anderen Bereichen lassen sich nur schwer weitere Aussagen treffen. Eine statistische Auswertung der Batterieleistung lässt jedoch die Tendenz erkennen, dass es während hoher Lastmomente (Bereich 5) und insbesondere im Motorleerlauf (Bereich 1) günstig ist, die elektrische Leistung aus der Batterie bereitzustellen (vgl. Bild A5.4). Diese Erkenntnisse werden im zweiten Optimierungsdurchlauf in der intelligenten Initialisierung durch entsprechende Vorgaben berücksichtigt. Im zweiten Optimierungsdurchlauf konnte eine Kraftstoffeinsparung von 1,68 % erzielt werden. In Bild 4.19 ist der Verlauf der Leistungen des besten Schaltvektors nach dem zweiten Optimierungsdurchlauf gezeigt.

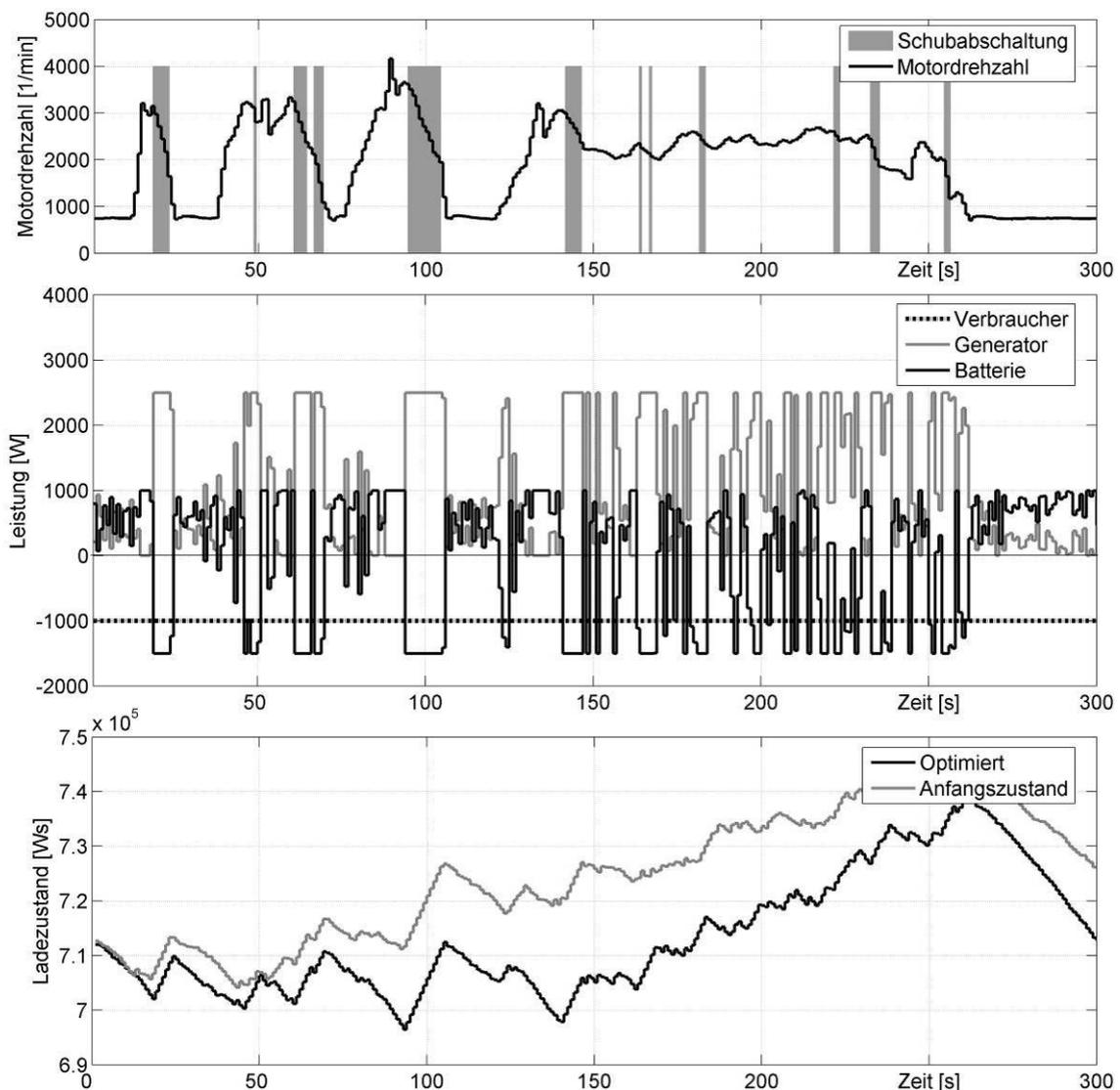


Bild 4.19: Ergebnis des zweiten Optimierungsdurchlaufs mit intelligenter Initialisierung: Leistungsverlauf und Batterieladezustand nach dem Schaltvorschlag des besten Replikators

Man erkennt, dass in den Bereichen des Motorleerlaufs versucht wird, nur zum Teil die Energie vom Generator zu erzeugen. In der langen Leerlaufphase am Ende des Fahrprofils werden die Verbraucher fast ausschließlich aus der Batterie versorgt. Dabei scheint es günstig, diese Energie im vorherigen Fahrabschnitt zu erzeugen. Es können aus der Darstellung keine eindeutigen Aussagen getroffen werden, welcher Teillastbereich dafür günstiger ist. Die statistische Auswertung der Batterieleistung zeigt jedoch, dass die Aussagen des Abschnitts 4.2.3 bestätigt werden können (Tabelle A5.6). Sowohl der Median als auch der arithmetische Mittelwert zeigen an, dass gegenüber dem Teillastbereich bei hohen Motordrehzahlen (Bereich 4) eine effizientere Energieerzeugung im Teillastbereich mit geringen Motordrehzahlen (Bereich 3) stattfindet. Die Qualität dieser Aussage ist gegenüber dem ersten Optimierungsdurchlauf höher. Eindeutig ist die Aussage für den Volllastbereich (Bereich 5). Aus der statistischen Auswertung und der Betrachtung des Leistungsverlaufs geht deutlich hervor, dass in den kurzen Abschnitten extremer Fahrzeugbeschleunigungen eine elektrische Energieerzeugung vom Generator ungünstig ist.

Der Verlauf der Kostenentwicklung über die Optimierungszyklen (Generationen) ist in Bild 4.20 dargestellt. Die logarithmische Darstellung verdeutlicht, dass die Konvergenzgeschwindigkeit anfangs sehr stark abnimmt und mit zunehmender Zyklenzahl sich nur geringfügig ändert. Durch die intelligente Initialisierung sind die Anfangskosten im Vergleich zum ersten Optimierungsdurchlauf relativ gering (vgl. Bild A5.3). Der folgende schnelle Abfall der Kosten resultiert daraus, dass die hohen Strafkosten für unausgeglichene Leistungsbilanzen und die Restriktionen der Batterieleistung schnell beseitigt werden. Darauf folgt die eigentliche Optimierung zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs. Die Kostenentwicklung ähnelt dabei den in [Hab04] beobachteten Verläufen.

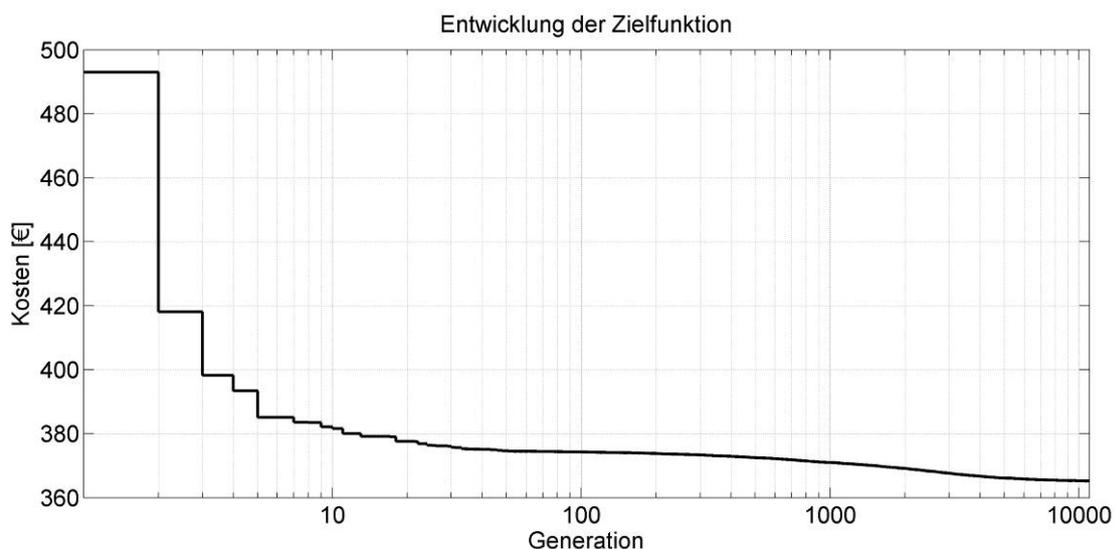


Bild 4.20: Entwicklung der Zielfunktion (Kosten) während der Optimierungszyklen

Bewertung

Anhand der simulationsgestützten Optimierung ist gezeigt worden, dass mit einer zeitlichen Entkopplung von Erzeugung und Nutzung elektrischer Energie Kraftstoff eingespart werden kann. Das größte Einsparpotential entsteht durch rekuperatives Bremsen. Die geringe Abnahme der Zielfunktion deutet darauf hin, dass die Unterschiede im Kraftstoffverbrauch in den anderen Betriebsbereichen des Verbrennungsmotors relativ gering ausfallen. Dies liegt vor allem an dem geringen Einfluss des Generators auf das Lastmoment während des Fahrbetriebs. Die statistische Auswertung der Batterieleistung bestätigt jedoch tendenziell die Ergebnisse der analytischen Betrachtungen. So ist es sinnvoll, die gewonnene Bremsenergie im Vollastbetrieb und während des Motorleerlaufs einzusetzen.

4.4 Dynamische Betriebsstrategien

Wie bereits in Abschnitt 2.4.1 erwähnt, sind für die Energieeinsatzoptimierung dynamische Betriebsstrategien vorteilhaft, welche „online“ die günstigsten Steuerdaten für das Fahrzeug-Energiesystem ermitteln. Nichtprädiktive Strategien nutzen dabei nur historische und zum aktuellen Zeitpunkt vorliegende Informationen. Zur Bestimmung einer *optimalen* Steuertrajektorie sind jedoch für das Fahrzeug-Energiesystem Prognosen für die Energieanforderungen, der externen Restriktionen und der resultierenden Systemzustände für den gesamten Optimierungszeitraum notwendig. Dies liegt an den Systemrestriktionen, insbesondere der Wandler- und Speichersysteme. So ist beispielsweise die Kapazität des elektrischen Energiespeichers begrenzt. Soll z. B. eine Lastpunktverschiebung genutzt werden, ist ein Wissen um die zukünftigen Betriebspunkte des Verbrennungsmotors von Vorteil. Da sich eine aktuelle Entscheidung der Betriebsstrategie auf den Speicherinhalt auswirkt, hat sie ebenfalls Einfluss auf den zukünftigen Energieeinsatz, falls die zulässigen Kapazitätsgrenzen über- oder unterschritten werden. Hier kann keine optimale Anpassung des Betriebspunkts des Verbrennungsmotors mehr erfolgen. Im ungünstigen Fall ist es somit möglich, dass durch vorangegangene Fehlentscheidungen insgesamt mehr Kraftstoff zur Energiebereitstellung notwendig ist.

In Anlehnung an ein Energiemanagementsystem zur Energieeinsatzoptimierung von lokalen Energiesystemen aus der Energieversorgung [Mei00] zeigt Bild 4.21 eine mögliche Struktur für ein Fahrzeug mit den einzelnen Modulen für Prognose, Optimierung und Regelung¹⁷. Das Prognosemodul erstellt wahrscheinlichkeitsbasierte Vorhersagen für den Energiebedarf der Verbraucher und mögliche Erzeugungspotentiale. Als Eingangsdaten dienen neben den externen Energieanforderungen die Systemdaten des Energiesystems und aufgearbeitete Kenngrößen der Umwelt. Das Optimierungsmodul berechnet „online“ auf Grundlage der Prognoseverläufe und der erwarteten Unsicherheiten eine Steuertrajektorie für den optimalen Betrieb des Energiesystems im Optimierungszeitraum. Das Regelmodul

¹⁷ In der Energieversorgung wird das Modul zur Überwachung und Regelung der Systemstabilität häufig als „Supervisory Control and Data Acquisition“ (SCADA) bezeichnet [Mei00]. In Bild 4.21 wird in Anlehnung an Abschnitt 2.4.4 der Begriff Energiekoordinator verwendet.

weist den einzelnen Betriebsmitteln bzw. Fahrzeugfunktionen in Echtzeit die entsprechenden Leistungen zu und stellt sicher, dass die Leistungsbilanzen zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sind. Es lehnt sich an die Vorschläge des Optimierungsmoduls an, kann aber bei Abweichungen von Prognosewerten kurzfristig zugunsten der Funktionsverfügbarkeit und Systemstabilität eingreifen.

Allgemein gilt es, zwischen Optimierungszeitraum, Prognoseunsicherheit und Einsparpotential abzuwägen. Mit wachsendem Prognosehorizont wird sich die vom Optimierungsmodul berechnete Steuertrajektorie dem Optimum immer weiter annähern. Allerdings steigen gleichzeitig die Prognoseunsicherheiten stark an, so dass kurzfristige Eingriffe des Regelmoduls wahrscheinlich werden. Eine weitere Grenze für den Optimierungszeitraum stellen die Systemgrenzen des Energiesystems dar. So wird in [Bac05] und [Hül07] festgestellt, dass das theoretische Einsparpotential bereits mit einem Optimierungshorizont von einigen Minuten kaum noch erhöht werden kann.

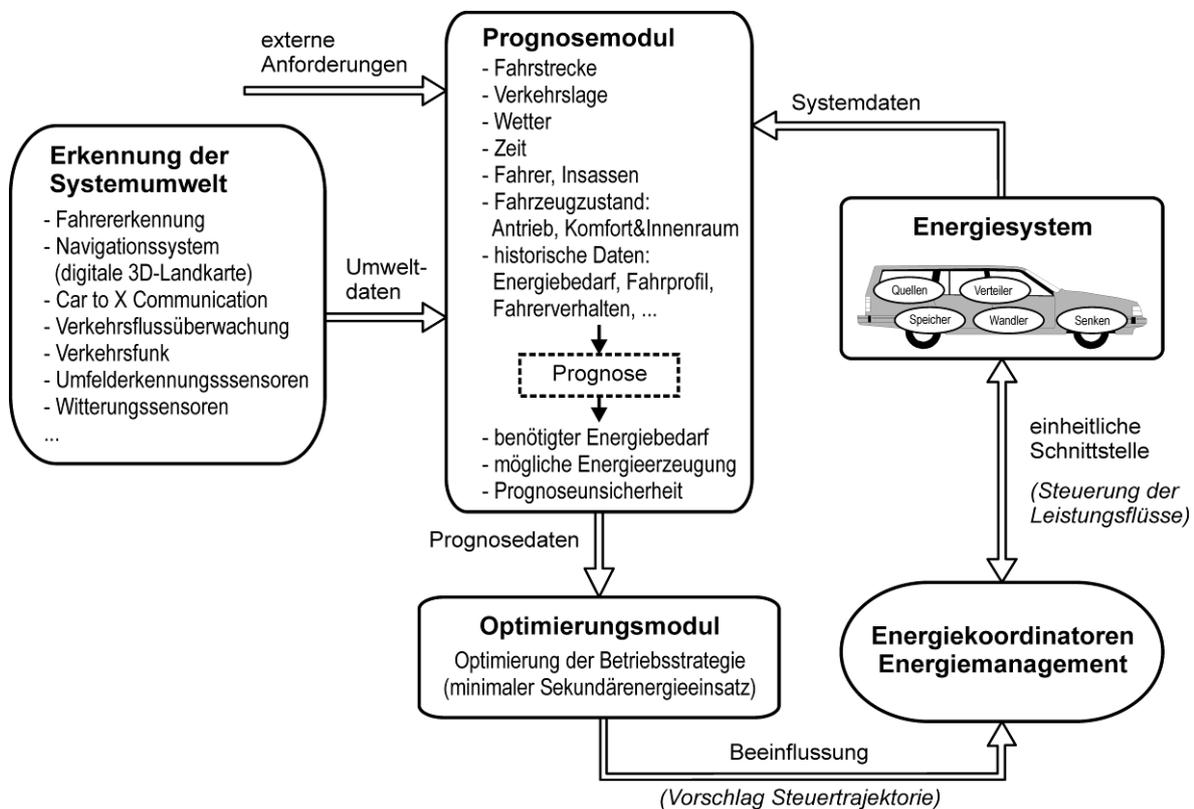


Bild 4.21: Schematische Struktur einer prädiktiven Betriebsstrategie

In Zukunft werden dynamische, prädiktive Betriebsstrategien als Unterstützung des Fahrers für einen kraftstoffeffizienten Fahrzeugbetrieb eine stärkere Rolle spielen. Dafür sind die folgenden Herausforderungen zu lösen:

- Gewinnung von Prognosedaten [Lin02a], [LS06]. Die sich rasch entwickelnden Telematiksysteme und darauf aufbauenden Fahrerassistenzsysteme sowie wissensbasierte Verfahren bieten dafür eine interessante Grundlage [Sch07a].

- Umsetzung einer Online-Optimierung im Fahrzeug mit begrenzten Rechenressourcen unter Nutzung eines gleitenden Prädiktionshorizonts [Bac05] oder geeigneter Nachführung von Optimierungsparametern in einem Regelkreis [Kes07].
- Umsetzung der Steuerdaten im Energiesystem mit einer sicheren und „komfortablen“ Erfüllung der Energiedienstleistungen für Fahrer und Insassen. Die Eingriffe können entweder direkt z. B. durch aktive Fahrerassistenzsysteme oder in Form von Handlungsempfehlungen anhand geeigneter Informationssysteme erfolgen.

5 Anwendung ökonomischer Modelle für ein Energiemanagement

Wird das elektrische Energiebordnetz aus wirtschaftswissenschaftlicher Sicht betrachtet, so gibt es Anbieter (Erzeuger) und Nachfrager (Verbraucher) von Energie. Ein Vergleich der Fragestellungen aus den Wirtschaftswissenschaften zeigt eine enge Verbindung zu den in Kapiteln 3 und 4 genannten Forderungen nach zuverlässiger und effizienter Bereitstellung elektrischer Energie. In diesem Kapitel soll untersucht werden, inwieweit ökonomische Theorien und Modelle zur Lösung einer Energiekoordination im elektrischen Energiemanagement (EEM) beitragen können. Die Idee ist, auf Basis eines ökonomischen Ansatzes ein Energiemanagement zu entwerfen, welches in seiner Funktionsstruktur skalierbar, flexibel und dynamisch ist (vgl. Abschnitt 2.4.4). Ziel ist eine zuverlässige und effiziente Bereitstellung der „Ware“ Energie mit Hilfe eines Energiekoordinators, welcher über eine einheitliche Schnittstelle zu den Komponenten des Energiesystems die Leistungsflüsse beeinflusst.

Zunächst werden in diesem Kapitel einige wesentliche Grundzüge ökonomischer Mechanismen der Mikroökonomie zusammengestellt und in Bezug auf den Einsatz in einem EEM näher charakterisiert. Die Analogien zwischen der Mikroökonomie und den Fragestellungen eines Energiemanagements werden grundlegend aufgezeigt. Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen einseitigen und zweiseitigen Marktmechanismen zur Allokation von Ressourcen werden am Markt- und Versteigerungsmodell deutlich. Es wird dargestellt, wie die Ergebnisse der vorangestellten Kapitel in die Funktionsstruktur dieser ökonomischen Modelle integriert werden können. Aus der theoretischen Auseinandersetzung mit dem Fachgebiet wird deutlich, dass die Modelle und Werkzeuge der Mikroökonomie für das EEM einige interessante Perspektiven zum Entwurf einer Energiekoordination bieten.

5.1 Problemstellung wirtschaftswissenschaftlicher Theorien

Obwohl die Wirtschaftswissenschaften sich sehr vielgestaltig präsentieren, steht im Kern einer jeden ökonomischen Theorie die Frage um das Koordinationsproblem einer arbeitsteilig gegliederten Volkswirtschaft, bei der ökonomisches Gleichgewicht, Effizienz und evolutionäre Weiterentwicklung gesichert sind [FiKö91]. Das Hauptanliegen der mikroökonomischen Theorie als Teil der Volkswirtschaftslehre besteht in der Erklärung der marktwirtschaftlichen Koordination einzelwirtschaftlicher Entscheidungen von Wirtschaftseinheiten [SMS07]. Darunter zählen einzelne Personen, private Haushalte, Unternehmen (Firmen) und der „Staat“, welche alle Entscheidungskompetenzen für wirtschaftliches Handeln haben. Es werden die Entscheidungen der Nachfrager und Anbieter im Einzelnen und das Zusammentreffen der Aktivitäten auf Märkten näher untersucht. Ein wichtiger Aspekt besteht in der Lösung des Zielkonflikts der Gesellschaft zwischen Effizienz und Gerechtigkeit. Die Effizienz bezieht sich in diesem Fall auf die optimale Nut-

zung wirtschaftlicher Güter bei begrenzten Ressourcen. Gerechtigkeit bedeutet in einer Gesellschaft, die wirtschaftliche Wohlfahrt fair auf die Mitglieder zu verteilen [Man04]. Hier wird der Bezug zu den Fragestellungen des EEM deutlich.

Aus der direkten Verknüpfung mit der menschlichen Gesellschaft ergeben sich in den Wirtschaftswissenschaften die folgenden „erkenntnistheoretischen“ Schwierigkeiten [FiKö91]:

- Das Einbeziehen des menschlichen Verhaltens, welches durch individuelle Erfahrungen und Sichtweisen sowie subjektive Entscheidungen geprägt ist.
- Durch die ständige Weiterentwicklung der Gesellschaft (Evolution) ändern sich moralische Werte, ideologische Überzeugungen und politische Interessen. Eine Abgrenzung der Ökonomie von anderen Bereichen des gesellschaftlichen Lebens (und damit den Sozialwissenschaften) ist nur theoretisch möglich.
- Reale Experimente können nicht durchgeführt werden. Die Dynamik und Ergebnisse der komplexen Wirtschaftskreisläufe auf Veränderungen sind schwer vorhersehbar (Bezug zur Chaostheorie [Lin93]).

Diese sind Ursache für zahlreiche Methodenstreits, sich ständig anpassende Theorien sowie verschiedene Gegenstandsbestimmungen bzw. wissenschaftlichen Schwerpunkten innerhalb der Wirtschaftswissenschaften. Eine Validation in Bezug auf die wirtschaftliche Realität ist bei der Anwendung von wirtschaftlichen Modellen für ein EEM nicht erforderlich. Deshalb können einige wesentliche Vereinfachungen getroffen werden, welche sich auf Grund der fest definierten Gestaltungsmöglichkeiten und –grenzen des technischen Systems ergeben:

- Das gewünschte Verhalten der „wirtschaftlichen Einheiten“ des Energiesystems kann im Modell mit frei gewählten deterministischen Funktionen hinterlegt werden. Eine komplexe Modellierung eines „homo oeconomicus“¹ ist nicht notwendig.
- Das Energiesystem ist in seiner Architektur fest definiert und keinen Veränderungen im Sinne von evolutionären Prozessen ausgesetzt. Die Koordination der „Ware“ Energie erfolgt stets nach den zuvor festgelegten Algorithmen bzw. Funktionen.
- Die aufgestellten Modelle können frei in ihrer Komplexität gestaltet und erprobt werden. Änderungen bewirken eine sofortige Reaktion der „wirtschaftlichen Einheiten“. Der Einfluss einzelner Parameter kann auf diese Weise im Vorfeld anhand von Simulationen untersucht werden.

¹ Genaueres zur Definition siehe z. B. [Lin93]. In [SMS07] werden verschiedene moderne Ansätze genannt, darunter z. B. das Modell eines lernfähigen, abwägenden, maximierenden Menschen.

5.2 Neoklassische Markttheorie

Die mikroökonomische Wirtschaftstheorie wird heute von der neoklassischen Markttheorie dominiert. Ihre wirtschaftlichen Modellvorstellungen liegen in der klassischen Nationalökonomie von Adam Smith (1723-1790) begründet und wurden durch die von mehreren Wissenschaftlern² Ende des 19. Jahrhunderts aufgestellte Grenznutzenschule und Marktgleichgewichtsanalyse erweitert. Die neoklassische Theorie stellt die optimale Allokation (Zuordnung) von knappen Ressourcen auf die wirtschaftlichen Einheiten unter Berücksichtigung *subjektiver* Nutzenmaximierung in den Vordergrund. Auf dieser Basis erfuhr sie eine ständige Erweiterung und wird trotz zahlreicher Gegenströmungen und Kritik in der Mikroökonomie zur Erklärung von Marktverhalten angewendet³. Die aktuelle Kritik bezieht sich vor allem auf die mangelnde Integration dynamischer Marktprozesse [Lin93] und auf den fehlenden praktischen Bezug zur tatsächlichen wirtschaftlichen Realität⁴ [FiKö91]. Bei der Anwendung für ein EEM können beide Kritikpunkte wegen den bereits genannten Einschränkungen vernachlässigt werden. Vielmehr ist die Möglichkeit interessant, die Allokation der Energie über einen virtuellen Preis zu steuern.

5.2.1 Spezialisierungen

Zur Beschreibung marktwirtschaftlichen Verhaltens existieren in der neoklassischen Theorie zahlreiche Spezialisierungen in den Kategorien der Marktstruktur, des Marktverhaltens und der Marktergebnisse. Dabei wird in der formalen Wirkungskette das Marktergebnis durch das Marktverhalten aus der vorliegenden Marktform bestimmt (Bild 5.1). Die Spezialisierungen dienen als Analysemittel, um die komplexen Vorgänge der Volkswirtschaft in einzelnen Problemlösungen zu erklären und in die gesamte Theorie zu integrieren. Unter anderem wird der marktliche Koordinationsmechanismus unter verschiedenen Randbedingungen, insbesondere auch bei Defekten, die beispielsweise durch unvollkommene Märkte, Monopolbildung oder externe Effekte auftreten können, näher betrachtet [SMS07].



Bild 5.1: Wirkungskette der Markttheorie [WiN04]

Für eine vollständige Darstellung der einzelnen Spezialisierungsformen und -anwendungen wird an dieser Stelle auf die zahlreichen Lehrbücher der Mikroökonomie verwiesen, z. B. [SMS07], [Var06], [Man04], [WiN04]. Vielmehr soll im Folgenden gezeigt werden, welche speziellen Anwendungen und Allokationsmodelle sich bei der Übertragung für eine Energiekoordination ergeben bzw. sich für ein EEM eignen.

² Als wichtige Wissenschaftler seien genannt: Hermann Heinrich Gossen (1810-1858), Stanley Jevons (1835-1882), Carl Menger (1840-1910), Léon Walras (1834-1910), Alfred Marshall (1842-1924).

³ Weitere Strömungen sind z. B.: Marxismus, Keynesianismus, Institutionalismus [FiKö91].

⁴ Als Protestbewegung zur „mainstream economics“ sieht sich die „post-autistic economics“ [PAE07].

5.2.2 Marktwirtschaftliches Konkurrenzgleichgewicht

Zentraler Kern der neoklassischen Theorie ist die subjektive Bewertung des Nutzens eines wirtschaftlichen Gutes⁵ durch die Haushalte. Dabei wird der Nutzen, welcher von der zuletzt konsumierten Gütermenge erzeugt wird, als Grenznutzen bezeichnet. Er nimmt mit steigender Verbrauchsmenge ab. Die Haushalte sind entsprechend ihrer Bedürfnisse an einer Nutzenmaximierung bestrebt, indem sie den auf den jeweiligen Güterpreis bezogenen Grenznutzen auf die verschiedenen Güter gleich aufteilen (Gossensche Gesetze). Den Unternehmen wird unterstellt, dass sie zur Produktion des Wirtschaftsguts die knappen Ressourcen⁶ dafür einsetzen, einen möglichst hohen Gewinn zu erzielen. Die Theorie der Marktwirtschaft beruht so auf einer individuellen Entscheidungsfreiheit. Nach der klassisch-liberalen These fördert das freie Handeln der einzelnen Wirtschaftseinheiten im eigenen Interesse nach Nutzen- bzw. Gewinnmaximierung bei funktionierendem Wettbewerb die Wohlfahrt aller [SMS07]. Das marktwirtschaftliche Zuteilungsverfahren lässt die Preise sich so einpendeln, dass diese die gesamte Kaufbereitschaft der Nachfrager für die einzelnen Güter auf die insgesamt von den Anbietern zur Verfügung gestellten Mengen zurückdrängen (Gesetz von Walras)⁷. Das Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage auf allen Gütermärkten wird als totales Konkurrenzgleichgewicht bezeichnet. Die Nachfrager werden in der Zuteilung also gemäß ihrer objektiv erkennbaren Kaufbereitschaft berücksichtigt, in der sich ihre subjektiven Nutzeneinschätzungen ausdrücken [SMS07].

5.3 Energiemanagement als Marktmodell

Das EEM kann formal als ein Allokationsproblem für einen Einzelmarkt betrachtet werden, bei dem das vom Generator angebotene wirtschaftliche Gut „elektrische Leistung“ von den elektrischen Verbrauchern kontinuierlich nachgefragt wird. Wegen des zeitlichen Bezugs wird im Folgenden auch von einem Energiemarkt gesprochen. In Abhängigkeit des Generatorleistungsangebots können zwei unterschiedliche Marktstrukturen auftreten (Bild 5.2).

Bei abgestelltem Verbrennungsmotor liegt ein Monopol⁸ vor, da die Fahrzeugbatterie als einziger Anbieter existiert. Im normalen Fahrbetrieb steht der Generator als Monopolist vielen kleinen Nachfragern gegenüber. Die Marktform kann sich jedoch zu einem Duopol ändern, je nachdem ob die Fahrzeugbatterie als Anbieter oder Nachfrager auftritt. Da der Leistungsfluss der Batterie im herkömmlichen Bordnetz jedoch direkt von der Generatorleistung abhängig ist, kann sie nicht unabhängig handeln. Erst wenn vom Generator nicht genügend Leistung bereitgestellt wird, kann sie am Markt als Anbieter auftreten.

⁵ Im Gegensatz zu freien Gütern sind wirtschaftliche Güter neben einer Nützlichkeit durch Knappheit gekennzeichnet. Für sie ist ein Preis zu zahlen [SMS07].

⁶ Produktionsfaktoren: Arbeit, Kapital, Boden (Rohstoffe) [SMS07].

⁷ Bereits Adam Smith beschrieb in seinem Werk „An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations“ (1776) die „unsichtbare Hand“ des freien Wettbewerbs, womit selbstsüchtige Interessen in sozial nützlichem Verhalten gewandelt werden [FiKö91].

⁸ Eine Übersicht der Marktformen ist im Anhang A6.1 dargestellt.

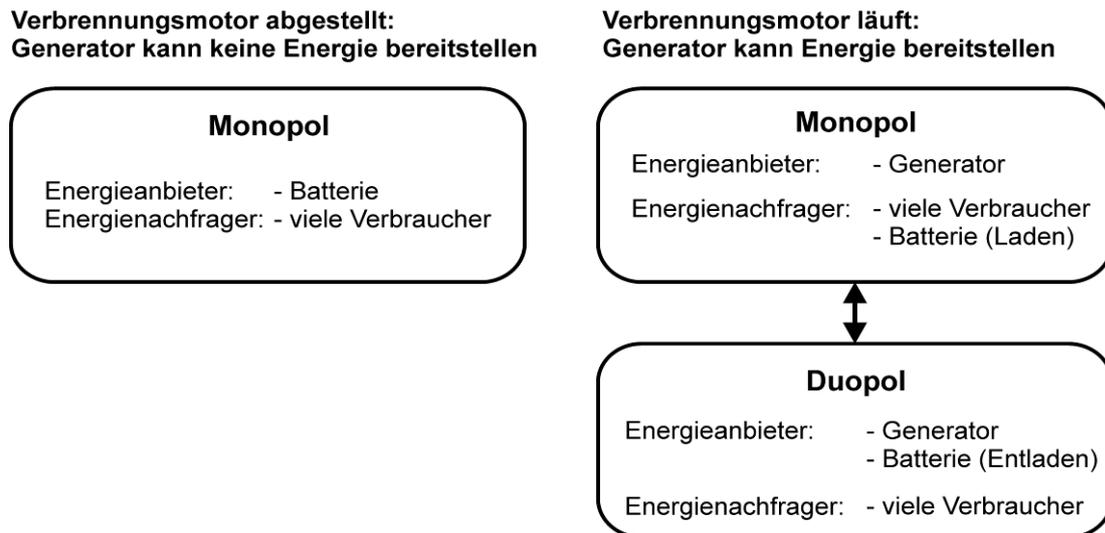


Bild 5.2: Marktformen des Energiebordnetzes im Kraftfahrzeug

5.3.1 Preis-Leistungs-Funktionen der Bordnetzkomponenten

Die Verteilung der elektrischen Leistung auf dem Markt erfolgt durch Bildung eines Warenpreises, welcher von dem sich ständig ändernden Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage beeinflusst wird. Zur Bestimmung der preisabhängigen Bedarfs- bzw. Angebotsmengen dienen Preis-Leistungs(mengen)-Funktionen, welche den einzelnen Marktteilnehmern zugeordnet werden. Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, wie bei der Definition dieser Angebots- bzw. Nachfragefunktionen die Gesichtspunkte einer zuverlässigen und effizienten Bereitstellung elektrischer Energie berücksichtigt werden können.

Nachfragefunktionen der Verbraucher

Die elektrischen Verbraucher haben als Nachfrager das Ziel, bei einem gegebenen Budget (Einkommen) ihren Nutzen u zu maximieren⁹. Da ihr jeweiliges Budget b nur auf *ein* wirtschaftliches Gut zu verteilen ist, wird die optimale Konsummengung x direkt vom Warenpreis p festgelegt:

$$u_{\max} = \max \{ u(x) \mid p \cdot x \leq b \}. \quad (5.1)$$

Den Verlauf von drei Nutzen- und Nachfragefunktionen unter Berücksichtigung verschiedener Ansteuerungsvarianten der Verbraucher zeigt Bild 5.3. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Anstieg der Nutzenfunktionen bis zur Leistungsgrenze des Verbrauchers stets positiv ist. Der Verlauf der Nutzenfunktion kann zum einen physikalisch motiviert sein, in dem sie in Analogie zur Willans-Kennlinie das Verhältnis zwischen nutzbarer und zugeführter Leistung wiedergibt. Es ist jedoch sinnvoll, zusätzlich funktionale Aspekte mit einfließen zu lassen. So kann z. B. angenommen werden, dass sich mit steigender Leis-

⁹ Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass der Nutzen beispielsweise durch eine Prioritätsskala quantitativ bestimmt werden kann. Dieser wird in der Mikroökonomie als kardinaler Nutzen bezeichnet [SMS07].

tungsaufnahme der Nutzenzuwachs einer Funktion ändert¹⁰. Der absolute Nutzen wird ebenfalls von externen Anforderungen und Restriktionen sowie inneren Zuständen des Verbrauchers abhängen. Dies bedeutet, dass sich die Nutzenfunktion dynamisch ändern kann. So ist beispielsweise der Betrieb einer Sitzheizung bei niedrigen Temperaturen nützlicher als bei warmem Fahrgastraum. Der Nutzenzuwachs wird außerdem von der erreichten Sitztemperatur abhängen. Bei kaltem Sitz ist der Betrieb mit hoher Leistungsstufe nützlich, während angenommen werden kann, dass bei warmem Sitz der Nutzenzuwachs mit steigender Leistung stärker abnimmt.

Die Nachfragefunktion $x(p)$ leitet sich prinzipiell aus der Nutzenfunktion ab. Dabei haben dynamische Nutzenfunktionen ebenfalls dynamische Nachfragefunktionen zur Folge. Die resultierende Priorität bzw. Funktionsrelevanz des Verbrauchers kann mit dem Freiheitsgrad eines Budgets vorgegeben werden¹¹. Mit steigendem Budget ist der Verbraucher in der Lage, auch bei hohem Warenpreis elektrische Leistung zu beziehen. So kann z. B. der binär schaltbare Verbraucher in Bild 5.3 bis zum Preis p_3 die Leistung x_3 beziehen, während der Verbraucher mit der stufenweisen Leistungsvorgabe seine Leistung hier auf die Menge x_1 reduziert. Eine Vergrößerung des Budgets eines Verbrauchers würde eine Verschiebung der zugehörigen Nachfragefunktion nach rechts bewirken.

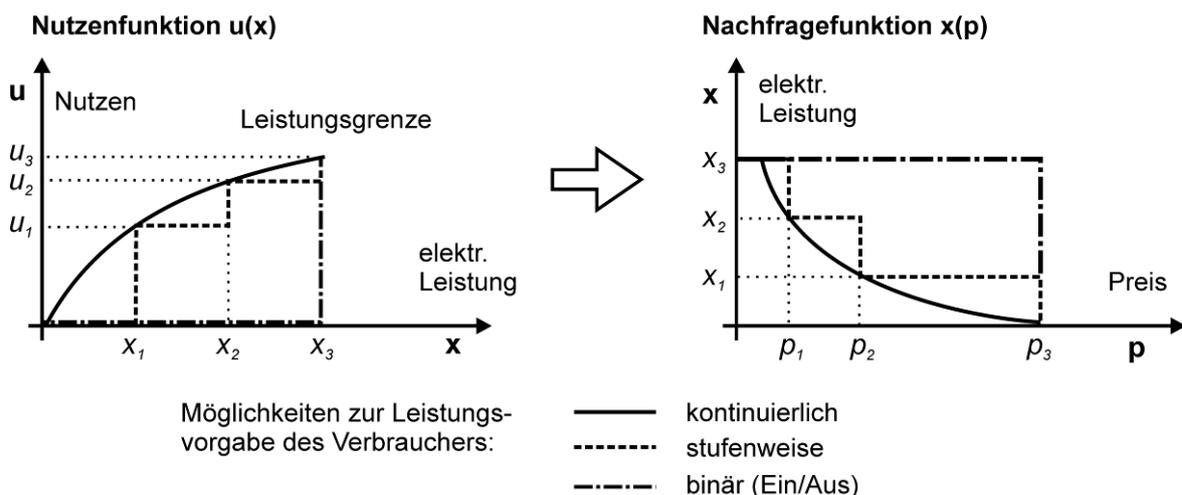


Bild 5.3: Beispiele für Nutzen- und Nachfragefunktionen von Verbrauchern

¹⁰ Der zusätzliche Nutzen einer Gütermengeneinheit wird in der Haushaltstheorie als Grenznutzen bezeichnet. Dies entspricht dem Anstieg der Nutzenfunktion $du(x)/dx$. In der Regel wird von einem positiven, abnehmenden Grenznutzen ausgegangen [SMS07].

¹¹ Es wird angenommen, dass das Budget für die Verbraucher frei verfügbar ist und somit beliebig festgelegt werden kann. In der Theorie der Haushalte werden ebenfalls Probleme der Einkommenserzielung durch Angebot des Produktionsfaktors Arbeit an die Unternehmer untersucht [SMS07]. Dieses ist hier nicht notwendig.

Angebotsfunktion des Generators

Der Generator hat als Anbieter das Ziel, seinen Gewinn G zu maximieren. Dieser berechnet sich allgemein aus dem Erlös E und den Produktionskosten K . Der Erlös ergibt sich dabei aus dem Warenpreis p (je Mengeneinheit) und der Angebotsmenge y an elektrischer Leistung:

$$G_{\max} = \max \{G = E - K = p \cdot y - K\}. \quad (5.2)$$

Zur Bestimmung der Produktionskosten können die Ergebnisse aus Kapitel 4 herangezogen werden. Aus den Effizienzüberlegungen des Erzeugersystems geht hervor, dass der zur Erzeugung elektrischer Energie eingesetzte Kraftstoff nach Gleichungen (4.9) und (4.10) neben der elektrischen Generatorleistung $P_{Gen} = y$ auch vom aktuellen Arbeitspunkt des Verbrennungsmotors (n_{VM} , M_{VM}) abhängig ist. Gleichzeitig ist die maximale Angebotsmenge durch die Motordrehzahl n_{VM} begrenzt. Werden die Produktionskosten auf die notwendige Kraftstoffmenge bezogen¹², ergibt sich die Kostenfunktion zu

$$K = \frac{P_{el,Gen}}{\eta_{ges}(P_{el,Gen}, M_{VM}, n_{VM})} = \frac{y}{\eta_{ges}(y, M_{VM}, n_{VM})}. \quad (5.3)$$

Zur Ermittlung der Angebotsfunktion wird davon ausgegangen, dass der Generator als „Mengenanpasser“ die Angebotsmenge bei gegebenem Verkaufspreis ermittelt¹³. Das Gewinnmaximum kann bei gegebenem Preis durch partielle Differentiation der Gewinnfunktion (5.2) nach dem Angebotszuwachs ermittelt werden:

$$G_{\max} = \frac{\partial G}{\partial y} = p - \frac{\partial K(y, M_{VM}, n_{VM})}{\partial y} = 0. \quad (5.4)$$

Um sicherzustellen, dass es sich um ein Gewinnmaximum handelt ist es notwendig, dass die Steigung der so genannten Grenzkostenkurve $GK = \partial K / \partial y$ positiv ist:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} &= -\frac{\partial^2 K(y, M_{VM}, n_{VM})}{\partial y^2} = -\frac{\partial GK}{\partial y} < 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial GK}{\partial y} &> 0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

Für den Generator lohnt es sich so viel Leistung abzugeben, bis die Grenzkosten den gegebenen Preis p erreicht haben. Bis dahin liegt der Erlös jeder zusätzlich verkauften Leistungsmenge über den Kosten dieser Menge, d. h. sie bringt zusätzlichen Gewinn. Die

¹² Da angenommen wird, dass die Produktionsfaktoren (z. B. Generatortyp, Kraftstoffpreise, ...) nicht variabel sind, wird auf die Herleitung der Kostenfunktion aus Produktionsfunktionen verzichtet. In der Theorie der Unternehmen geht die Kostenfunktion aus der Minimalkostenkombination fixer und variabler Produktionsfaktoren hervor [SMS07].

¹³ Da der Generator eigentlich als Monopolist die Marktmacht besitzt, könnte er als „Preissetzer“ seinen Gewinn weiter steigern. Dies hätte jedoch negative Auswirkungen auf die Marktversorgung. Das Marktergebnis wäre nicht effizient im Sinne der Pareto-Optimalität (siehe Abschnitt 5.3.2). Bei bekannter Preis-Absatzfunktion und Kostenfunktion ergibt sich die optimale Absatzmenge des Monopolisten am Schnittpunkt von Grenzerlös und Grenzkosten (Augustin Cournot, 1838) [SMS07].

inverse Angebotsfunktion $p(y)$ resultiert demzufolge aus dem ansteigenden Abschnitt der Grenzkostenkurve [SMS07].

In Bild 5.4 sind die Kosten- und Angebotsfunktionen des Generators für drei verschiedene Motordrehzahlen veranschaulicht. Um die Abhängigkeit mit einer Kurvenschar darstellen zu können, bleibt der Einfluss des Lastbetriebspunktes M_{VM} auf den Kraftstoffeinsatz unberücksichtigt. Die Kostenfunktionen entsprechen damit den Willans-Kennlinien des Generators (vgl. Bild 4.11)¹⁴. In Abhängigkeit der Motordrehzahl ist die Angebotsmenge begrenzt. Da bei hohen Drehzahlen und wachsender Generatorauslastung der Wirkungsgrad sinkt, nehmen die Kosten hier stärker zu. In Bild 5.4 ist angedeutet, dass in der Angebotsfunktion durch Überlagerung von Kennlinien für verschiedene Leerlaufdrehzahlen die Möglichkeit einer Anhebung der Drehzahl im Motorleerlauf integriert werden kann (vgl. Abschnitt 3.2.1). Die Grenzkostenkurven resultieren aus den Anstiegen der zugehörigen Kostenfunktion. Da ihr Anstieg stets positiv ist, entsprechen sie im gesamten Bereich den inversen Angebotsfunktionen¹⁵ $p(y)$. Die direkten Angebotsfunktionen $y(p)$ in Bild 5.4 werden aus der Umkehrung der Grenzkostenfunktionen gebildet.

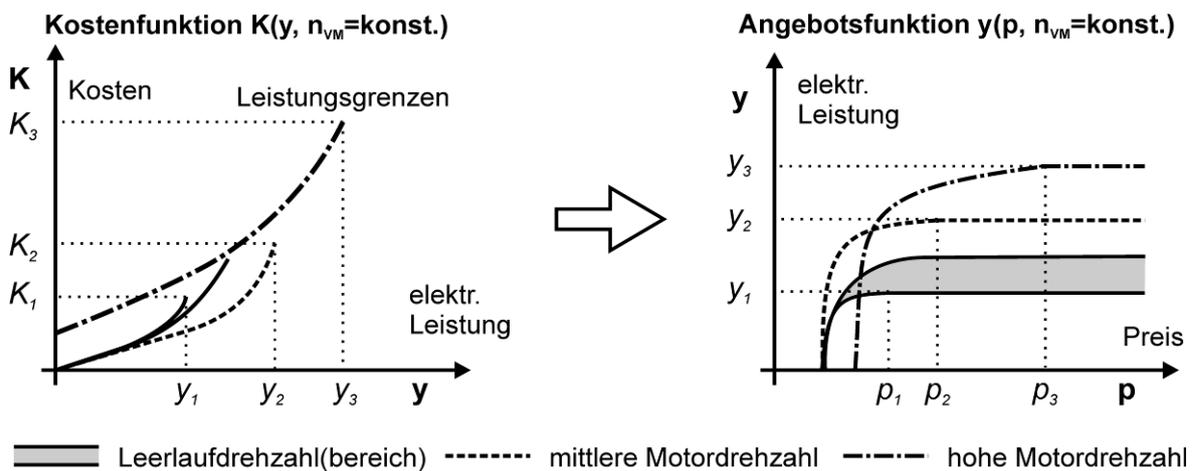


Bild 5.4: Kosten- und Angebotsfunktion des Generators für verschiedene Motordrehzahlen (ohne Berücksichtigung des Lastpunktes vom Verbrennungsmotor)

Im besonderen Fall einer Bremsenergierückgewinnung kann bei aktiver Schubabschaltung des Verbrennungsmotors elektrische Leistung ohne Kosten bereitgestellt werden. Wie in Bild 5.5 dargestellt, ist hier die Angebotsmenge nur durch die aktuelle Motordrehzahl begrenzt.

¹⁴ In Bezug zur Darstellung in Bild 4.11 müssen die inversen Kennlinien verwendet werden.

¹⁵ Da die Grenzkostenfunktionen die differentielle Abhängigkeit der Kostenfunktionen $K(y, \dots)$ nach der Angebotsmenge y darstellen, ergeben sich die inversen Angebotsfunktionen $p(y)$.

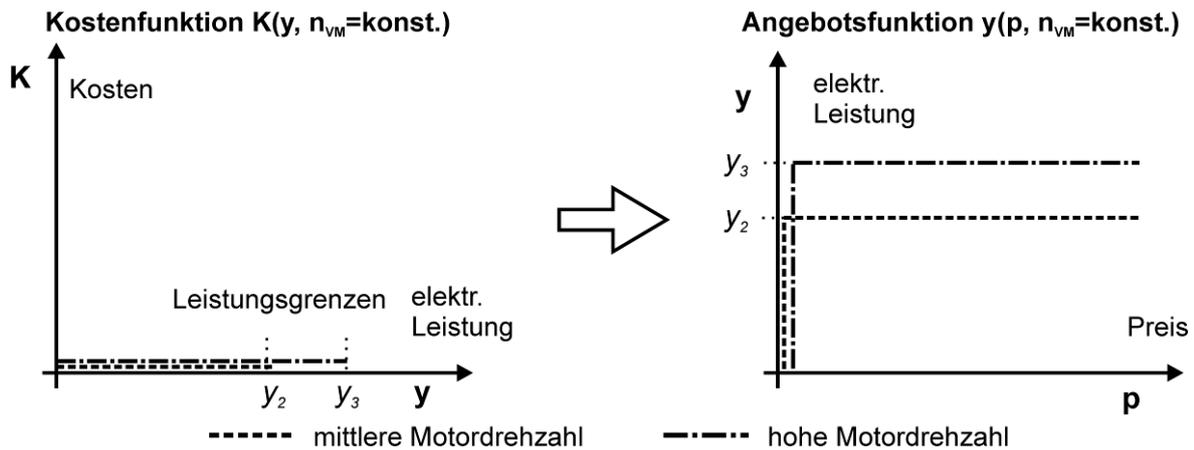


Bild 5.5: Kosten- und Angebotsfunktionen des Generators bei aktiver Schubabschaltung des Verbrennungsmotors

Angebots- und Nachfragefunktion der Batterie

Die Batterie als Energiespeicher kann sowohl als Anbieter als auch als Nachfrager auf dem Energiemarkt agieren. In der herkömmlichen Bordnetztopologie ist ihr Leistungsfluss jedoch direkt von der Generatorleistung abhängig. Deshalb ist es sinnvoll, ihre Angebots- und Nachfragefunktionen mit denen des Generators zu verknüpfen.

Die Leistungsnachfrage der Batterie zum Laden ist von ihrem Ladezustand (SOC) bzw. ihrem Leistungsaufnahmevermögen abhängig. Eine Steigerung der Leistungsaufnahme z. B. während einer Bremsenergieerückgewinnung wird durch Erhöhen der Generatorspannung erreicht. Mit Hilfe des Batteriemonitorings ist es möglich, die aktuelle Nachfragemenge der Batterie zu bestimmen (vgl. Abschnitt 2.4.3). Da sie durch keine weiteren Stellglieder beeinflusst werden kann, ist sie als preisunabhängige Nachfragemenge auf dem Energiemarkt zu berücksichtigen¹⁶ (Bild 5.6). Die Angebotsfunktion der Batterie wird von ihrem Leistungsvermögen (SOF) bestimmt. Der Preis steigt mit steigender Angebotsmenge, da die Energiereserve mit steigender Belastung stark sinkt. Weiterhin wird dadurch einer zyklischen Belastung entgegengewirkt. Der Mindest-Angebotspreis p_0 richtet sich im einfachsten Fall nach dem Generator-Angebotspreis, bei dem der Generator aktuell seine maximale Leistung erreicht. Alternativ kann eine zusätzliche Anpassung von p_0 nach den Ergebnissen der Effizienzbetrachtungen aus Abschnitt 4.2.3 erfolgen. Um eine Energieabgabe der Batterie bereits im Teillastbereich des Generators zu ermöglichen, muss die Generatorspannung abgesenkt werden.

Bei Motorstillstand ist die Batterie einziger Anbieter am Energiemarkt. Der Mindest-Angebotspreis sollte sich in diesem Fall nach der Energiereserve bzw. dem Ladezustand richten, damit ein sicherer Motorstart gewährleistet werden kann. Mit sinkendem Ladezustand ist der Mindest-Angebotspreis zu erhöhen.

¹⁶ Bleibt die Nachfragemenge der Batterie unberücksichtigt, können die Verbraucher über die gesamte Leistungsmenge des Generators verfügen. Eine Batterieladung erfolgt dann nur, wenn ein Leistungsüberschuss vorhanden ist.

Erst wenn die Möglichkeit einer eigenen Steuerung der Leistungsflüsse besteht, kann der Energiespeicher als unabhängiger Händler am Energiemarkt agieren. Im Anhang A6.1 wird eine Möglichkeit gezeigt, wie der zeitliche Aspekt der Spekulation integriert werden könnte.

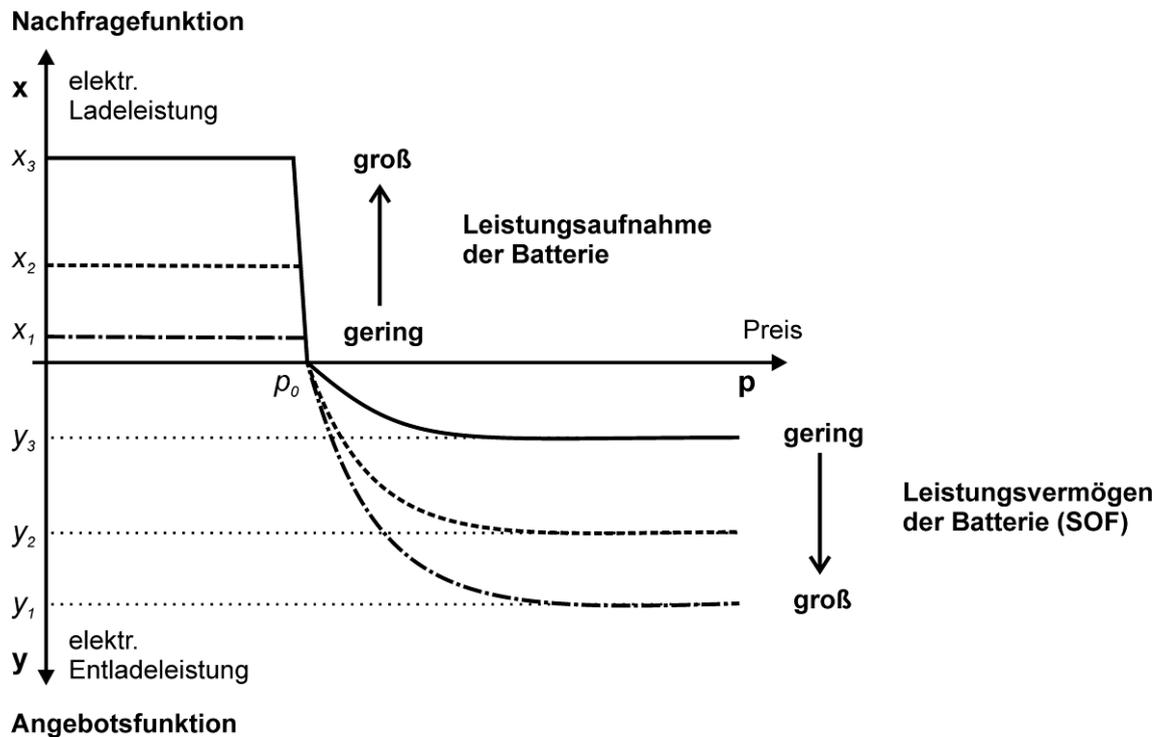


Bild 5.6: Nachfrage- und Angebotsfunktionen der Batterie in Abhängigkeit ihres Leistungsvermögens

5.3.2 Marktgleichgewicht

Treffen auf dem Energiemarkt sämtliche Anbieter und Nachfrager aufeinander, ergibt sich anhand der individuellen Nachfrage- bzw. Angebotsfunktionen bei einem bestimmten Warenpreis ein Marktgleichgewicht. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass die zusammengesetzte Gesamtnachfrage der n aktiven Verbraucher mit der Gesamtangebotsmenge der m Erzeuger und Speicher übereinstimmt:

$$\sum_{i=1}^n x_i(p) = \sum_{j=1}^m y_j(p). \quad (5.6)$$

Bild 5.7 zeigt beispielhaft, wie das Marktgleichgewicht grafisch ermittelt werden kann. Die Aggregation¹⁷ der Nachfragefunktionen aller aktiven Verbraucher erfolgt durch vertikale Addition der individuellen Nachfragemengen. In Abhängigkeit des Einschaltzustands von Verbraucher 1 ergeben sich die beiden unterschiedlichen Gesamtnachfragekurven. In ähnlicher Weise werden die aktuellen Angebotskurven von Generator und Batterie grafisch

¹⁷ Damit wird in der Mikroökonomie das Zusammensetzen der individuellen Preis-Mengen-Funktionen bezeichnet [SMS07].

addiert. Am Schnittpunkt der beiden Kurven existiert ein Gleichgewicht. Angebots- und Nachfragemenge sind identisch, der Markt wird „geräumt“.

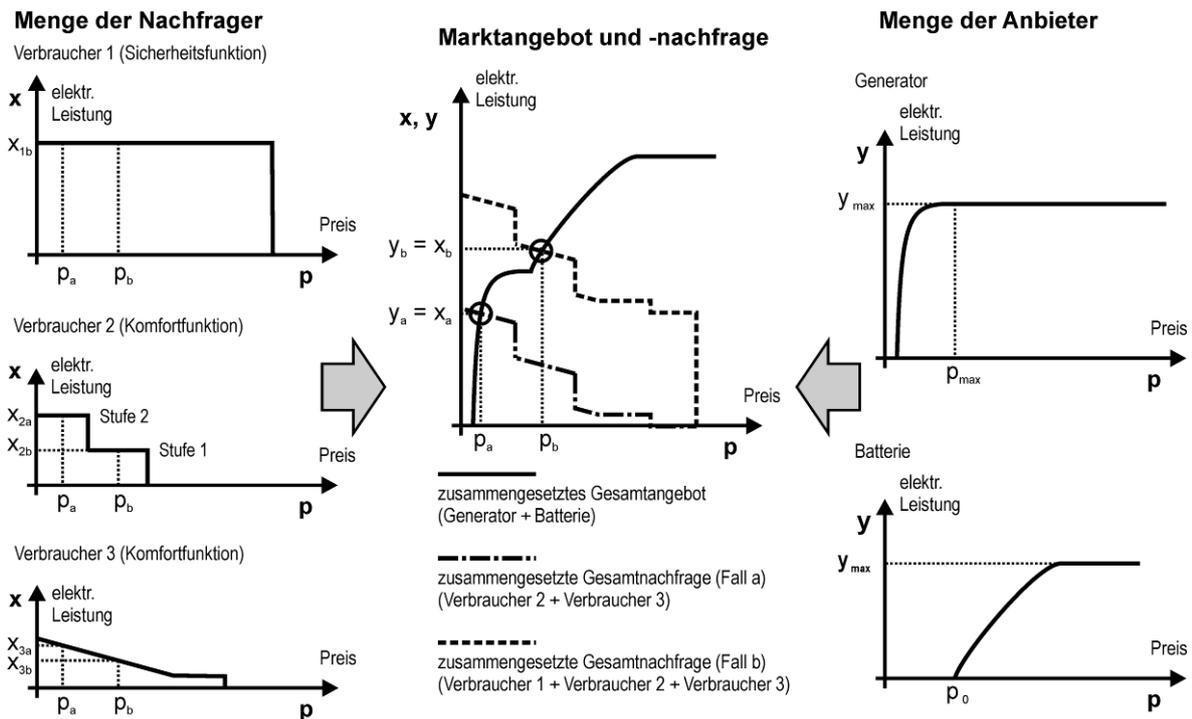


Bild 5.7: Grafische Ermittlung des Marktgleichgewichts an einem Beispiel

Ist im Fall a der Verbraucher 1 nicht aktiv, entsteht ein Gleichgewicht am Marktpreis p_a . Beide Komfortverbraucher können vom Generator mit ihrer gewünschten Leistung x_{2a} und x_{3a} versorgt werden. Schaltet sich im Fall b der sicherheitsrelevante Verbraucher 1 bei nicht geänderter Angebotslage dazu, reicht die Generatorleistung gerade nicht mehr aus. Der Marktpreis findet sein Gleichgewicht bei dem Wert p_b . Der Verbraucher 1 erhält seine gewünschte Leistungsmenge, da er über ein höheres Budget verfügt. Die Verbraucher 2 und 3 passen sich dem neuen Marktpreis an, indem sie ihre Leistung auf die Werte x_{2b} und x_{3b} reduzieren.

Existenz und Stabilität

In der Markttheorie wird der Anpassungsprozess zum Gleichgewicht durch allmähliches Herantasten beschrieben. Léon Walras entwickelte 1874 die modellhafte Vorstellung, dass von einem kostenlos arbeitenden Auktionator die Angebots- und Nachfragemengen bei einem bestimmten Preis zusammengetragen werden. Um das Marktgleichgewicht zu finden, wird vom Auktionator bei einem Nachfrageüberschuss ($x > y$) der Preis angehoben bzw. bei einem Angebotsüberschuss ($x < y$) der Preis gesenkt. Damit kein Handel zu falschen Preisen erfolgt, findet ein Austausch der Güter erst im Anschluss an die iterative Gleichgewichtssuche statt [SMS07].

Um die Existenz und Stabilität des Marktgleichgewichts zu gewährleisten, müssen Anforderungen an die Monotonie und Stetigkeit der Nachfrage- und Angebotsfunktionen gestellt

werden [SMS07], [Var06]. Während sich die Monotonie aus den typischen Verläufen der Nutzen- und Kostenfunktionen ergibt¹⁸, können häufig Unstetigkeiten z. B. durch Leistungssprünge bei stufenweiser Leistungsvorgabe von Verbrauchern auftreten. Deshalb ist es notwendig, in den Preis-Leistungsmengen-Funktionen die Leistungssprünge durch steile Gradienten zu ersetzen (Bild 5.8). Sind die einzelnen Verbraucher bezüglich des Gesamtmarktes relativ klein, wird sich der Verlauf der aggregierten Gesamtnachfragekurve einer stetigen Funktion annähern [Var06]. Für die Existenz des Schnittpunktes von Angebot und Nachfrage ist es weiterhin erforderlich, dass die Nachfragefunktionen durch einen maximalen Preis begrenzt werden, während die Angebotsfunktionen im Definitionsbereich (Preis) nicht begrenzt werden dürfen¹⁹.

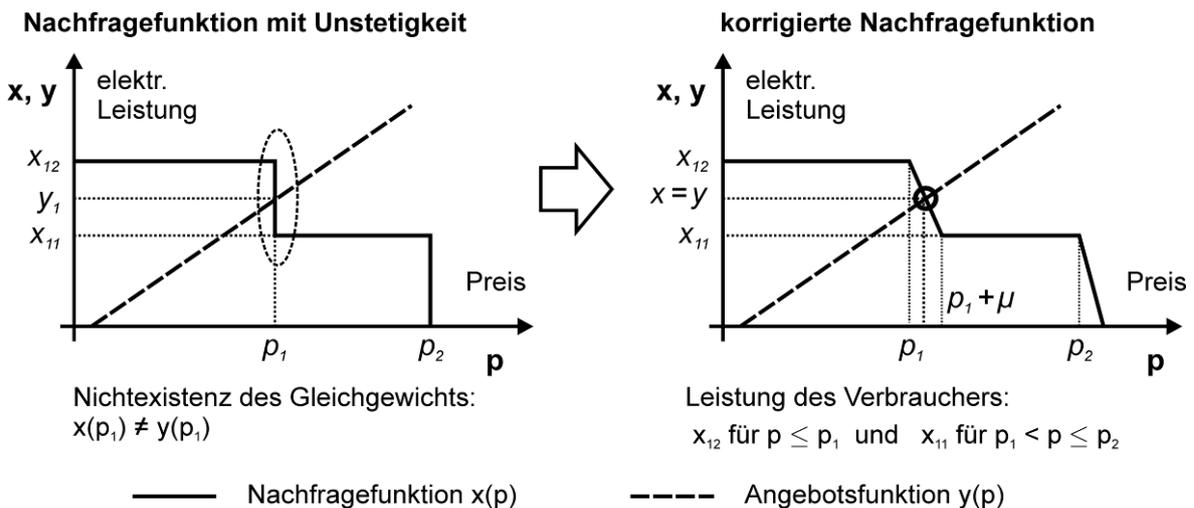


Bild 5.8: Behebung von Unstetigkeiten in der Preis-Leistungsfunktion

Effizienz und Wohlfahrt

Wird das Marktgleichgewicht nach den Regeln der vollständigen Konkurrenz ermittelt, stellt es nach der neoklassischen Markttheorie eine effiziente Lösung dar. Der Effizienz-begriff ist dabei eng mit der Pareto-Optimalität²⁰ verknüpft. Bezogen auf die Problemstellung besagt die Eigenschaft einer solchen Lösung, dass [Lin93]:

- jede Komponente im Energiesystem ihre Zielgröße (Nutzen, Gewinn) bei gegebenem Preissystem maximiert (Anbieter verhalten sich dabei als „Mengenanpasser“),
- die Erzeugung elektrischer Energie effizient und den Knappheitssignalen entsprechend ohne Verschwendung erfolgt (Zuweisung der Bereitstellung auf die Erzeuger und Speicher mit den geringsten Kosten),

¹⁸ Daraus resultieren die monoton fallenden Verläufe bei Nachfragefunktionen sowie die monoton steigenden Verläufe bei Angebotsfunktionen.

¹⁹ Die Angebotsmenge eines Erzeugers oder Speichers ist dabei nach der Beschränkung durch ihre arbeitspunktabhängige Maximalleistung vollkommen unelastisch [Man04], d.h. mit zunehmendem Preis steigt die Angebotsmenge nicht mehr.

²⁰ Benannt nach dem Sozialwissenschaftler und Ökonomen Vilfredo Pareto (1848-1923).

- kein Verbraucher seinen Nutzen vergrößern kann, ohne den Nutzen wenigstens eines anderen Verbrauchers zu reduzieren (Zuweisung der Leistung an die Verbraucher, welche mit ihren Funktionen im aktuellen Betriebszustand den größten Nutzen erzeugen bzw. die wichtigsten Energiedienstleistungen bereitstellen).

In diesem Sinne stellt das Marktgleichgewicht für das Allokationsproblem eine optimale Lösung bei den vorgegebenen Kosten-/Nutzenfunktionen der einzelnen Komponenten dar. Umgekehrt kann für jedes Pareto-Optimum bei geeigneter Wahl der „Erstausrüstung“ über das Budget der Nachfrager (Verbraucher) ein entsprechendes Marktgleichgewicht gefunden werden (Hauptsätze der Wohlfahrtstheorie) [SMS07]. Die Gestaltung der Preise kann deshalb sowohl als *Index relativer Knappheit* der Ressource Energie als auch als *Schlüssel zur Verteilung* der Energie auf die verschiedenen Verbraucher dienen (vgl. [Var06]).

Wie bereits in Abschnitt 5.3.1 ausgeführt, wird die Lösung des Verteilungsproblems der Energie auf die Verbraucher über den Freiheitsgrad des Budgets beeinflusst. Bei der Gestaltung des Budgets der einzelnen Verbraucher müssen die zusammengesetzte Angebotsfunktion (unter Beachtung möglicher Betriebszustände) sowie die Relevanz der Verbraucher zur Ausführung bestimmter Funktionen berücksichtigt werden. Ziel ist es dabei, den Gesamtnutzen im Energiesystem zu maximieren. Dafür ist eine *Nutzenanalyse* der Verbraucher innerhalb einzelner Szenarien notwendig, welche ein entsprechendes Expertenwissen voraussetzt. Als Maß des gesamtwirtschaftlichen Nutzens werden in der Mikroökonomie so genannte gesellschaftliche Wohlfahrtsfunktionen W eingeführt. Diese ordnen jeder Kombination des individuellen Nutzens der Verbraucher einen Gesamtnutzen zu. Sind im speziellen Fall die Nutzenfunktionen der Verbraucher voneinander unabhängig, dann kann für die Nutzenanalyse beispielsweise die individuelle Wohlfahrtsfunktion nach Samuelson²¹ [Var06] als Summenfunktion verwendet werden:

$$W = W(u_1(x_1), \dots, u_n(x_n)) = \sum_{i=1}^n u_i(x_i). \quad (5.7)$$

5.3.3 Integration in ein elektrisches Energiemanagement

Unter den in Abschnitt 5.1 genannten Bedingungen für das technische System kann die idealtypische Marktform der vollständigen Konkurrenz im EEM-Koordinator umgesetzt werden. In Anlehnung an die Börse als Marktplatz mit nahezu vollständiger Konkurrenz „in Reinkultur“ [SMS07] werden bereits in [Gra04], [Bou05b], [Eng05] so bezeichnete Börsenmodelle zur Koordination der Energie im Fahrzeug vorgestellt²².

²¹ Benannt nach dem Ökonomen Paul Samuelson (*1915).

²² In diesen Veröffentlichungen wird im Wesentlichen die Idee einer Energiekoordination mit einem Börsenmodell skizziert und dessen Funktion anhand von Simulationsergebnissen gezeigt. Eine Auseinandersetzung der wirtschaftswissenschaftlichen Modelle mit ihren mathematischen Werkzeugen sowie eine detaillierte Diskussion der Analogiebetrachtung des Marktmodells in Hinblick auf eine Energiekoordination fehlen.

In Anlehnung an Bild 2.17 zeigt Bild 5.9 den Aufbau der Funktionsstruktur zur Integration des Marktmodells in ein EEM. Die Allokation der Energie erfolgt mit einem Auktionator, welcher das Marktgleichgewicht durch numerisches Lösen der Gleichung (5.6) ermittelt. Das Maklermodul hat die Aufgabe, aus den Preis-Leistungs-Funktionen die aggregierten Angebots- und Nachfragemengen zu bestimmen. Zur Bestimmung des Gleichgewichts ist es von Vorteil, wenn dem Makler die Preis-Leistungsfunktionen der aktiven Bordnetzkomponenten bekannt sind. Dadurch wird der Kommunikationsaufwand zwischen den einzelnen Schnittstellenmodulen und dem Energiekoordinator erheblich verringert. Vom Auktionator muss der gefundene Gleichgewichtspreis mitgeteilt werden. Umgekehrt ist von den Komponenten anhand ihres Analysemoduls und ihrer EEM-Funktionen dem Makler ihre aktuelle Preis-Leistungsfunktion zu übertragen. Ein Stellmodul ist notwendig, um die zugewiesene Leistung der Komponente über die entsprechenden Stellglieder anzuordern. Aus der Abbildung erkennt man, dass die Integration der komponentenbezogenen Softwaremodule sowohl zentral im EEM als auch dezentral in den jeweiligen Bordnetzkomponenten erfolgen kann (vgl. Zielstellung aus Abschnitt 2.4.4).

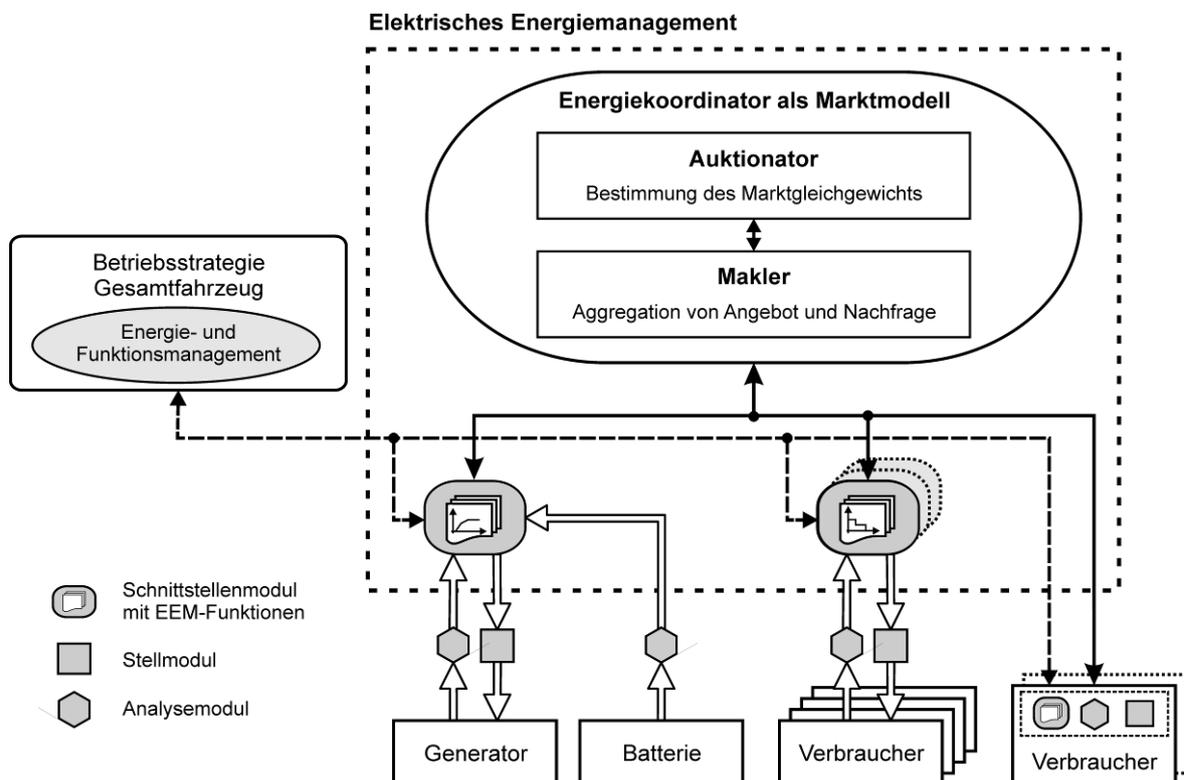


Bild 5.9: Aufbau der Funktionsstruktur eines EEM mit einem Marktmodell

Eine Umsetzung des Marktmodells mit Maklermodul und Auktionator ist in Bild 5.10 dargestellt. Die Aggregation von Angebot und Nachfrage erfolgt anhand der aktuellen Angebots- und Nachfragefunktionen der Bordnetzkomponenten mit dem Handelspreis \tilde{p} . Dieser wird vom Auktionator in einer iterativen Schleife mit einem Integrator als Regelglied so angepasst, bis kein (positiver oder negativer) Nachfrageüberschuss mehr auftritt. Ist der Gleichgewichtspreis p^* bestimmt, steht er für die Allokation der Energie im Bordnetz zu Verfügung.

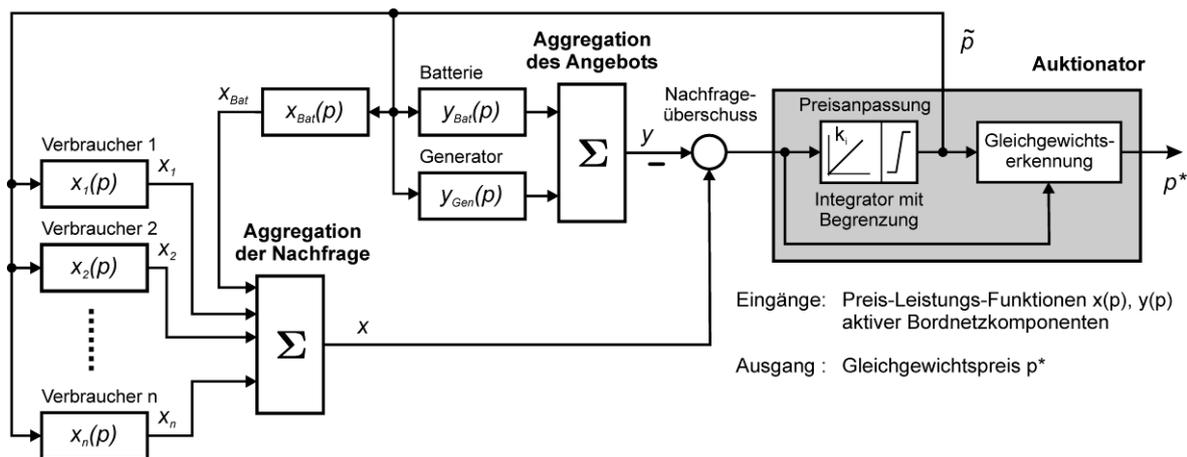


Bild 5.10: Umsetzung des Marktmodells mit Makler und Auktionator zur Bestimmung des Marktgleichgewichts nach Walras

Bewertung

Das Marktmodell mit dem Walras-Auktionator als Allokationsmechanismus bietet innerhalb des EEM die Möglichkeit, sowohl die Aspekte einer effizienten Energieversorgung als auch eine Verteilung auf die einzelnen Verbraucher nach ihrer Priorität bzw. Funktionsrelevanz zu berücksichtigen. Das Ergebnis der Allokation stellt bei den gegebenen Angebots- und Nutzenfunktionen eine effiziente Lösung dar: Es erfolgt eine kraftstoffoptimale Bereitstellung elektrischer Energie unter Berücksichtigung notwendiger Energiedienstleistungen nach ihrer Relevanz für das Fahrzeug. Durch die offene Funktionsstruktur lässt es sich in ein ganzheitliches Energiemanagementsystem (vgl. Abschnitt 2.4) integrieren.

Damit keine Schaltverzögerungen an den Bordnetzkomponenten auftreten, muss die Lösung des Allokationsproblems mit der iterativen Gleichgewichtssuche eine sehr hohe Dynamik besitzen. Der Kommunikationsaufwand zwischen den Schnittstellenmodulen und dem Energiekoordinator ist sehr hoch.

Zur Lösung des Verteilungsproblems bietet die neoklassische Markttheorie mit den Nutzenfunktionen sowie der aggregierten Wohlfahrtsfunktion eine Möglichkeit, die Relevanz der einzelnen Verbraucher bzw. Funktionen zu charakterisieren. Um den Gesamtnutzen zu maximieren, ist eine individuelle Nutzenanalyse der Verbraucher notwendig. Dafür ist eine quantitative Bewertung des Nutzens anhand einer einheitlichen Bewertungsskala notwendig.

Die Effizienz und Leistungsbeschränkung von Erzeuger und Speicher kann mit den Kostenfunktionen ausgedrückt werden. Die Willans-Kennlinien bieten hierfür eine geeignete Ausgangsbasis. Wegen der engen Kopplung der Leistungsflüsse von Generator und Batterie ist es sinnvoll, ihre Preis-Leistungs-funktionen miteinander zu verknüpfen.

5.4 Auktionstheorie

Obwohl Auktionen einen bereits sehr lange in der Menschheitsgeschichte praktizierten Allokationsmechanismus darstellen, fanden sie als wirtschaftswissenschaftlichen Untersuchungsgegenstand für eine relativ lange Zeit keiner besonderen Beachtung. In der Literatur wird die auf der Spieltheorie basierende Abhandlung von Vickrey²³ (1961) als Ursprung der Auktionstheorie genannt. Die praktische Bedeutung von Auktionen in ihrer Anwendung z. B. von Regierungen zur Vergabe von Förderlizenzen für potentielle Rohstoffgebiete und zum Verkauf von Nutzungsrechten für Funkfrequenzen oder auch die Verbreitung von Internet-Auktionen verstärkten in den letzten Jahrzehnten das wissenschaftliche Interesse auf diesem Gebiet [Kle04]. Im Folgenden soll untersucht werden, inwiefern im Rahmen eines EEM die Modelle der Auktionstheorie zur Allokation der Energie genutzt werden können. Dafür werden in diesem Abschnitt die theoretischen Grundlagen kurz umrissen.

5.4.1 Spezialisierungen

„What is an auction? An auction is a market institution with an explicit set of rules determining resource allocation and prices on the basis of bids from the market participants“. Diese Definition nach [AfMi87] unterstreicht die wirtschaftswissenschaftliche Bedeutung von Auktionen als Preisfindungsmechanismus²⁴. In der Auktionstheorie können mit Hilfe unterschiedlicher Auktionsarten sehr verschiedene Markt- bzw. Handelsformen beschrieben werden (Bild 5.11). Der Begriff Auktion wird damit deutlich über den Rahmen einer Versteigerung hinaus erweitert. Im Folgenden wird in einer kurzen Übersicht auf die wesentlichen Kriterien zur Unterscheidung der speziellen Auktionsarten eingegangen.

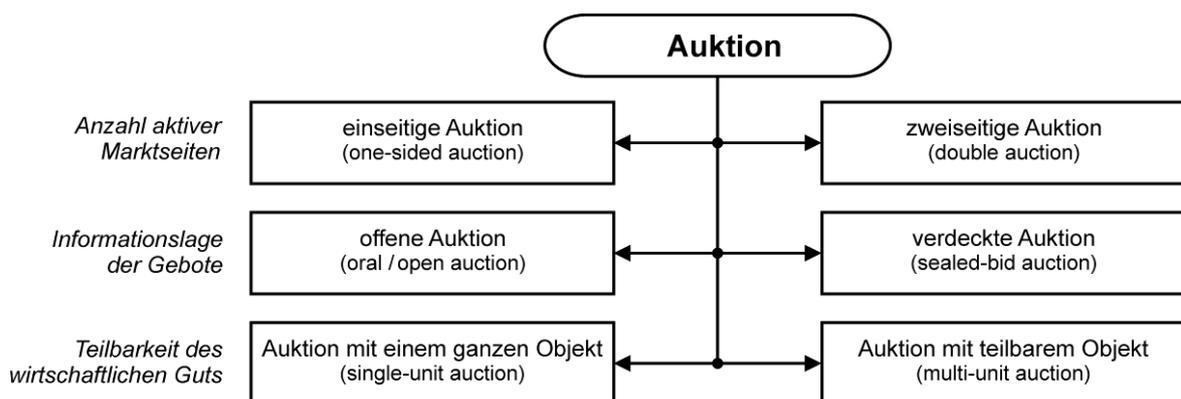


Bild 5.11: Wesentliche Eigenschaften zur Einteilung von Auktionsarten

²³ William S. Vickrey (1914-1996), Ökonom.

²⁴ Auktionen werden in der Praxis häufig dann eingesetzt, wenn der Marktwert (Preis) eines Objekts unbekannt ist, so z. B. für Kunstgegenstände, Wein oder Immobilien. Der Monopolist kann wegen dieser fehlenden Information nicht den optimalen Preis (nach Cournot) festsetzen. Umgekehrt können Auktionen also dazu verwendet werden, den aktuellen Marktwert eines wirtschaftlichen Gutes zu bestimmen [Mil92].

Bei der klassischen einseitigen Auktion bzw. Versteigerung steht ein Angebotsmonopolist vielen Nachfragern gegenüber²⁵, die als Bieter konkurrierende Gebote für das Objekt²⁶ abgeben. Aus den Geboten wird sowohl der Preis als auch der Vertragspartner bestimmt. Charakteristisch für Auktionen ist, dass der Allokationsmechanismus an feste Regeln gebunden ist, die im Vorfeld vom Verkäufer festgelegt werden. Zu den wichtigen Eigenschaften zur Charakterisierung von Auktionen zählen:

- *Die Informationslage der Gebote während des Auktionsablaufes:*
Bei einer offenen Auktion werden die Gebote bzw. die Nichtabgabe von Geboten fortlaufend bekanntgegeben. Bei einer verdeckten Auktion gibt jeder Bieter das Gebot (die Anzahl ist zumeist auf ein Gebot begrenzt) beim Auktionator ab, ohne dass es öffentlich bekanntgegeben wird. Den Bietern sind somit die Gebote der anderen Auktionsteilnehmer unbekannt.
- *Die Art des Auktionsobjektes:*
Zumeist wird bei einer Auktion um ein einzigartiges, nichtteilbares Objekt gehandelt. Andernfalls wird von einer Auktion mit teilbaren Objekten gesprochen. Zum Beispiel kann der deregulierte Energiemarkt als Auktion mit einem beliebig teilbaren homogenen Gut interpretiert werden [Kle04]²⁷. Auch Verteilungsprobleme können auf diese Weise in die Auktionstheorie übertragen werden.
- *Die Anzahl der aktiven Marktseiten:*
Im Standardfall der einseitigen Auktion gibt die eine Marktseite die Auktionsform vor, während von der anderen Marktseite für das Auktionsobjekt aktiv Gebote abgegeben werden. Umfasst die Auktion auf beiden Marktseiten mehrere Auktionsteilnehmer, welche Gebote²⁸ abgeben können, wird von einer zweiseitigen Auktion gesprochen. Insbesondere zählen Aktienbörsen und Finanzmärkte zu den zweiseitigen Auktionen²⁹. Da diese Auktionsart dem in Abschnitt 5.3.2 zur Auffindung des Marktgleichgewichts vorgestellten Walras-Auktionators ähnelt³⁰, wird die enge Verbindung der Auktionstheorie zur Markttheorie deutlich [AfMi87].

²⁵ Ebenso können Ausschreibungsverfahren als Auktion verstanden werden, bei dem ein Nachfragemonopolist vielen Anbietern gegenübersteht (Monopsom) [Bor03], [AfMi87]. Im Folgenden wird von einem Angebotsmonopolisten ausgegangen. Weiterhin wird zwischen dem Verkäufer (Anbieter) und dem Auktionator unterschieden. Letzterer stellt die neutral ausführende Instanz während des Auktionsablaufs dar.

²⁶ In der Auktionstheorie wird zumeist allgemein von Auktionsobjekten gesprochen. Diese stellen zumeist ein wirtschaftliches Gut dar.

²⁷ In [Feh04] werden die Ergebnisse von deregulierten Energiemärkten anhand einer einseitigen, verdeckten Auktion (Ausschreibung) mit teilbaren Objekten untersucht.

²⁸ In der englischsprachigen Literatur werden zur Unterscheidung die Nachfragegebote mit „bids“ und die Angebotsgebote als „asks“ bezeichnet.

²⁹ Hinweise zu weiterführender Literatur sind in [AfMi87] zu finden.

³⁰ Der statische Preisfindungsmechanismus des Walras-Auktionators kann als zweiseitige, Auktion mit einem teilbaren Gut aufgefasst werden. Die Bildung der aggregierten Nachfrage- und Angebotskurven erfolgt durch jeweilige Sortierung der mengenabhängigen Gebote von Anbietern und Nachfragern [AfMi87]. Der in Abschnitt 5.3.3 vorgestellte Preisfindungsmechanismus kann deshalb als zweiseitige Auktion interpretiert werden.

Aus der Praxis sind sehr verschiedene Auktionsformen bekannt. Das Regelwerk der vier Standardauktionsformen: Englische Auktion, Holländische Auktion, Höchstpreis-Auktion und Vickrey-Auktion wird im Anhang A6.3 beschrieben. Für eine weiterführende Darstellung der einzelnen Auktionsarten mit ihren Spezialisierungen und Eigenschaften wird auf die Literatur [Kle04], [AfMi87], [Bor03], [Bec99], [Var06] verwiesen.

5.4.2 Strategisches Gleichgewicht

Zur Analyse des Verhaltens der Auktionsteilnehmer werden in der Auktionstheorie die Methoden der Spieltheorie benutzt. Diese versucht, das strategische Verhalten von Entscheidungsträgern (Spielern) mit Hilfe von mathematisch-stochastischen Modellen zu analysieren und Lösungen für verschiedene Konfliktsituationen zu entwickeln. Dabei ist die wechselseitige Beziehung der einzelnen Spieler, insbesondere in Bezug auf unterschiedliche Interessen- und Informationslagen³¹ von entscheidender Bedeutung. Die Lösungskonzepte der Spieltheorie stützen sich dabei auf strategische Gleichgewichte³² zwischen den Spielern (vgl. Anhang A6.3) [Hol03].

Auktionen lassen sich als zweistufige Spiele interpretieren. In der ersten Stufe legt der Verkäufer die Auktionsform fest. Der Auktionsablauf mit der Abgabe von Geboten der einzelnen Bieter wird im Anschluss mit der zweiten Stufe beschrieben. Bei der Frage der Gestaltung einer Auktion müssen vom Verkäufer folgende beiden Aspekte berücksichtigt werden:

- *Zielsetzung der Auktion:*
Aus Sicht des Verkäufers hat eine Auktion zumeist das Ziel, den Auktionserlös zu maximieren. Als zweites Ziel könnte eine effiziente Lösung im Sinne der Pareto-Optimalität stehen. Dies bedeutet, dass der Bieter mit der höchsten Wertschätzung für das Objekt den Zuschlag erhalten soll [Var06].
- *Eigenschaften der Bieter:*
Zur Beurteilung des Bieterverhaltens und damit des Auktionsergebnisses werden die Eigenschaften der Bieter mit Hilfe von Auktionsmodellen beschrieben. Die wichtigste Eigenschaft charakterisiert die Art und Weise, in welcher die Bieter ihre Bewertung des Auktionsobjektes vornehmen. Weiterhin können zwischen den Bietern Asymmetrien hinsichtlich ihrer Risikoeinstellung, Informationsgrad und privater Vorlieben auftreten [Bor03], [AfMi87].

Die strategische Gleichgewichtslösung zwischen den Bietern ist neben der Auktionsform von den Eigenschaften der Bieter abhängig. Eine ausführliche Zusammenstellung der Effizienz- und Erlöseigenschaften der vier Standardauktionsformen im strategischen Gleichgewicht in Abhängigkeit verschiedener Bietereigenschaften ist in [Bor03] und [AfMi87] dargestellt.

³¹ In den Wirtschaftswissenschaften als Asymmetrien bezeichnet.

³² In der Spieltheorie werden solche Lösungen als Gleichgewichte bezeichnet, bei denen alle Spieler ihre Strategieentscheidung nicht mehr ändern möchten [Hol03].

5.5 Energiemanagement als einseitiges Auktionsmodell

Für die Energieverteilung in einem EEM kann die einseitige Auktion in Form einer Versteigerung als Allokationsmechanismus eingesetzt werden. Dabei wird das vom Generator und der Batterie angebotene teilbare Objekt „elektrische Leistung“ von den elektrischen Verbrauchern als Bieter kontinuierlich nachgefragt. Die Bietstrategie der Verbraucher kann ihre aktuelle Priorität bzw. Funktionsrelevanz berücksichtigen. Bei der Gestaltung der Auktion ist das Effizienzziel vorgegeben. Damit wird eine Zuteilung der Energie auf die Verbraucher gewährt, welche den höchsten Nutzen für das Fahrzeugsystem und Insassen darstellen.

5.5.1 Gestaltung der Versteigerung

Wegen der Eigenschaften des technischen Systems gelten bei der Gestaltung des Auktionsmodells ebenfalls die Vereinfachungen aus Abschnitt 5.1. So kann davon ausgegangen werden, dass neben der Angebotsmenge dem Auktionator mit den Geboten die wahren Wertschätzungen der einzelnen Verbraucher zur Verfügung stehen. Somit ist die Lösung der besten Auktionsform trivial: Der Bieter mit dem höchsten Gebot erhält den Zuschlag. Da der Gewinn für die Effizienz-Forderung keine Bedeutung hat, spielt der zu zahlende Betrag keine Rolle [Var06]. Bei der Versteigerung handelt es sich um eine Auktion mit einem teilbaren Objekt. Die Gebote der Verbraucher werden mit der zugehörigen Nachfragemenge dem Auktionator mitgeteilt. Beginnend mit dem höchsten Gebot teilt dieser den einzelnen Verbrauchern die angeforderten Leistungsmengen zu, bis die zur Verfügung stehende Gesamtleistungsmenge aufgebraucht ist³³.

Ermittlung der Angebotsmenge

Die Ermittlung der zur Verfügung stehenden Angebotsmenge an elektrischer Leistung von Generator und Batterie kann im einfachsten Fall direkt aus den Werten des Generator- und Batteriemonitorings erfolgen. Damit ist der elektrische Leistungsverbrauch auf die maximale Bereitstellungsmenge des Energiesystems begrenzt. Sollen zusätzlich Aspekte der Energieeffizienz Berücksichtigung finden, muss die Angebotsmenge künstlich begrenzt werden. Dies kann zum einen direkt durch Reduzierung der Versteigerungsmenge in Abhängigkeit des aktuellen Zustands des Erzeugersystems geschehen. Dadurch wird jedoch die elektrische Leistung auch dann eingeschränkt, wenn ein höherer Leistungsbedarf z. B. durch sicherheitskritische Verbraucher vorliegt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Einführung „virtueller Verbraucher“, wie in [Sch07b] für eine Energiekoordination mit einer Ranglisten-Tabelle vorgeschlagen wird. Nehmen diese an der Versteigerung teil, wird der Leistungsverbrauch scheinbar erhöht und damit die Angebotsmenge indirekt verkleinert. Der Vorteil besteht in der freien Gestaltung ihrer Gebote (Preis und Menge). Auf diese Weise kann z. B. auch in kritischen Zuständen die gesamte Energiereserve des

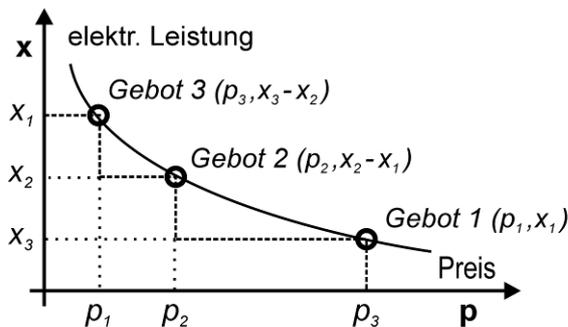
³³ Bei dieser simultanen Auktion sind im Gegensatz zur sequentiellen Auktionsform für die Verteilung der teilbaren Angebotsmenge je Auktionszeitpunkt nicht mehrere Auktionsdurchläufe notwendig. Somit steht das aktuelle strategische Gleichgewicht bereits nach einem Rechenschritt fest [Bis07].

Erzeugersystems genutzt werden. Die erforderliche Ladeleistung der Batterie kann ebenfalls als zusätzlicher Verbraucher abgebildet werden.

Bietstrategie der Verbraucher

Die Verbraucher handeln nach einer dominanten Strategie, d. h. das Bieterverhalten anderer Verbraucher bleibt in ihrer Strategie unberücksichtigt. Sie teilen dem Auktionator ihre individuelle Wertschätzung in Form eines Gebotspreises mit, welcher an eine Nachfrageleistungsmenge verknüpft ist. Das Gebot leitet sich aus der Nutzen- bzw. Nachfragefunktion ab (vgl. Abschnitt 5.3.1). Besteht die Möglichkeit einer stufenweisen Leistungsvorgabe, geben die Verbraucher gleichzeitig mehrere Gebote ab³⁴. Bei Verbrauchern mit kontinuierlicher Leistungsvorgabe können ebenfalls durch Diskretisierung der Nachfragefunktion mehrere Gebote gebildet werden (Bild 5.12).

Gebote (p, x) eines Verbrauchers mit stufenweiser bzw. kontinuierlicher Leistungsvorgabe



Gebot (p, x) eines Verbrauchers ohne Möglichkeit zur Leistungsreduzierung

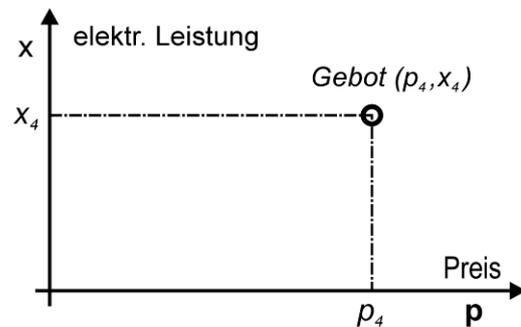


Bild 5.12: Ermittlung der Gebote aus den Nachfragefunktionen der Verbraucher

5.5.2 Integration in ein elektrisches Energiemanagement

Bild 5.13 zeigt in Anlehnung an Bild 2.17 den Aufbau der Funktionsstruktur zur Integration des Versteigerungsmodells in ein EEM. Die Allokation der Energie erfolgt mit einem Auktionator, welcher die Gebote der einzelnen Verbraucher miteinander vergleicht und anhand der zur Verfügung stehenden Angebotsmenge den Auktionspreis ermittelt. Die aktuelle Angebotsmenge von Generator und Batterie wird vom zugehörigen Schnittstellenmodul anhand der Analysemodule und verschiedener EEM-Funktionen bestimmt. Weiterhin werden von diesem Modul die Gebote der virtuellen Verbraucher festgelegt. Die aktiven Verbraucher teilen dem Auktionator ihre Gebote für bestimmte Leistungsmengen mit. Anhand dieser Angaben kann der Auktionator den Preis festlegen, bis zu welchem die Gebote einen Zuschlag erhalten. Auf diese Weise ist eine einheitliche Schnittstelle zwischen den Verbrauchern und dem Energiekoordinator gegeben. Aus der Abbildung erkennt

³⁴ Diese Erweiterung wird beispielsweise bei den Untersuchungen in [Feh04] eingeführt. In [Sch07b] wird diese Methode ebenfalls zur Integration von Verbrauchern mit variabler Leistungsvorgabe in das Ranglistenmodell verwendet.

man, dass die Integration der verbraucherbezogenen Softwaremodule nach der Zielstellung aus Abschnitt 2.4.4 ebenfalls dezentral erfolgen kann.

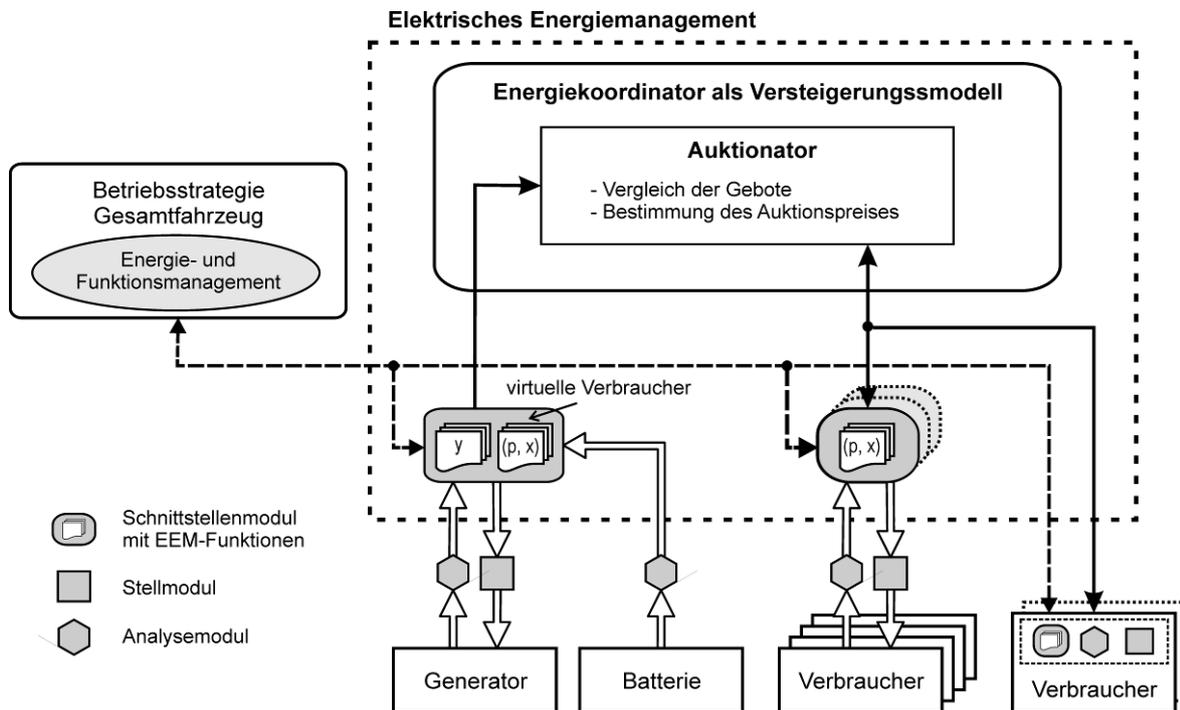


Bild 5.13: Aufbau der Funktionsstruktur eines EEM mit einem Versteigerungsmodell

Eine Umsetzung des Versteigerungsmodells zur Bestimmung des Auktionspreises durch den Auktionator ist in Bild 5.14 gezeigt. Aus der graphischen Darstellung wird deutlich, dass der Auktionspreis dem Gleichgewichtspreis zwischen der aggregierten Nachfrage-Gebotskurve und einer konstanten Angebotskurve entspricht³⁵.

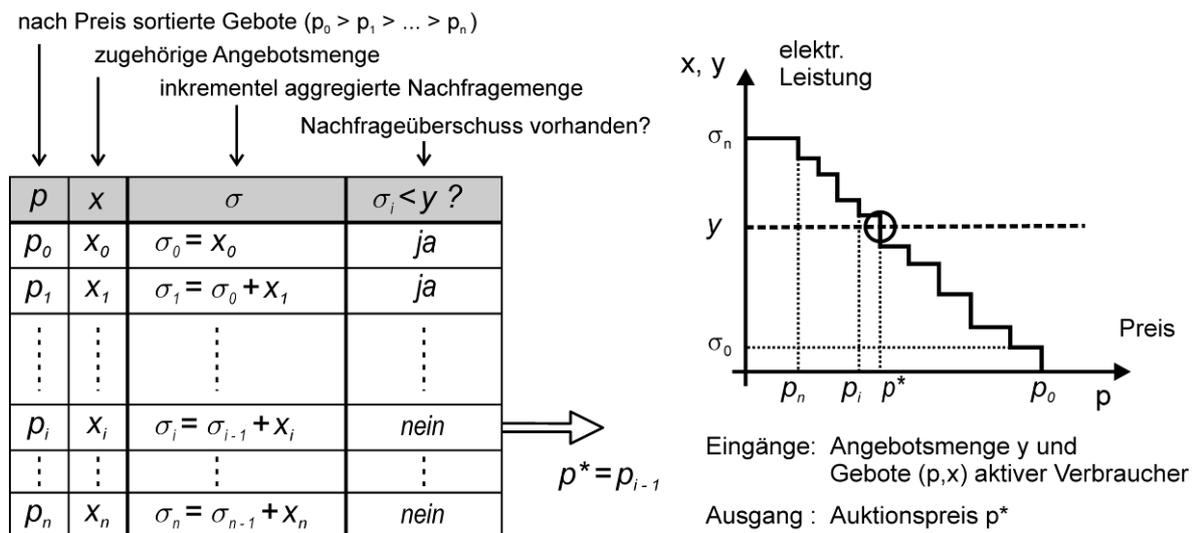


Bild 5.14: Umsetzung des Versteigerungsmodells zur Bestimmung des Auktionspreises

³⁵ Der Sonderfall einer vollkommen unelastischen Angebotskurve liegt im Marktmodell bei aktiver Schubabschaltung vor (vgl. Bild 5.5), da keine Kosten zur Energiebereitstellung vom Generator entstehen.

Wegen der diskreten Nachfragekurve kann die Gleichgewichtssuche nach der in der Abbildung gezeigten Tabelle erfolgen. Liegen die Gebote nach ihrem Gebotspreis sortiert vor, dann entspricht der Auktionspreis dem Preis, bei dem gerade kein Angebotsüberschuss mehr existiert.

Bewertung

Das Versteigerungsmodell als Allokationsmechanismus bietet innerhalb des EEM die Möglichkeit, die begrenzte Angebotsmenge elektrischer Leistung auf die Verbraucher unter Berücksichtigung ihrer Priorität bzw. Funktionsrelevanz zuzuteilen. Neben den Aufgaben eines Verbrauchermanagements können durch eine künstliche Begrenzung der Angebotsmenge ebenfalls Aspekte der Energieeffizienz indirekt berücksichtigt werden.

Bei der Gestaltung der Gebote der realen und virtuellen Verbraucher können prinzipiell die Methoden der neoklassischen Markttheorie mit den Nutzen- und Kostenfunktionen verwendet werden. Das Auffinden des Auktionspreises gestaltet sich wegen der diskreten Gebote und der konstanten Angebotsmenge sehr einfach und kann ohne Verzögerung erfolgen. Trotzdem ist ein hoher Kommunikationsaufwand zwischen den Schnittstellenmodulen und dem Energiekoordinator notwendig.

Der Ansatz des einseitigen Auktionsmodells weist starke Ähnlichkeiten zu dem in [Sch07b] vorgestellten Ranglistenmodell auf. Beide Ansätze lassen sich prinzipiell ineinander überführen. Darüber hinaus lassen sich enge Verknüpfungen zur kombinatorischen Optimierung herstellen, wie in [Bis07], [Büc07] anhand der Darstellung des Verbrauchermanagements als so genanntes „Rucksackproblem“ gezeigt wird.

5.6 Vergleich der Modelle

Werden die beiden vorgestellten Modelle des Marktes bzw. der Energiebörse und der Versteigerung miteinander verglichen, so weisen sie große Ähnlichkeiten auf. Sie besitzen beide das Potential eines Allokationsmechanismus, welcher den Anforderungen nach Skalierbarkeit, Flexibilität und Dynamik im Rahmen eines EEM genügt.

Dabei wird jeweils der Preis als Schlüssel zur Verteilung der Energie auf die verschiedenen Verbraucher verwendet. Das Versteigerungsmodell bietet jedoch zunächst den Vorteil einer geringeren Komplexität und ist für ein Verbrauchermanagement vorzuziehen. Steht die zusätzliche Forderung, ein Erzeugermanagement mit den Aspekten einer effizienten Energieversorgung in das Modell zu integrieren, kann dies durch Beeinflussung der Angebotsmenge erfolgen. Dadurch entsteht jedoch im Vergleich zum Marktmodell eine ähnliche Modellkomplexität. Lediglich die Herangehensweise unterscheidet sich dadurch, dass die Energiebereitstellungskosten indirekt durch die Beschränkung der Angebotsmenge berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu sind beim Marktmodell die Kosten direkt mit dem Marktpreis verknüpft. Dies kann wiederum als Vorteil des Marktmodells betrachtet werden.

Die Gleichgewichtsfindung zwischen Angebot- und Nachfragemenge im Allokationsmechanismus kann bei beiden Modellen zum einen mit einer iterativen Nullstellensuche oder über die Berechnung des Nachfrageüberschusses für jeden Preis erfolgen. Die Genauigkeit der Lösung ist dabei von den Diskretisierungsschritten der Preis-Leistungs-Kurven abhängig. Bei relativ grober Diskretisierung erscheint dabei die punktuelle Nachfrageüberschussberechnung von Vorteil, da auf die Iterationsschleife verzichtet werden kann. Wegen der konstanten Angebotsfunktion gestaltet sich das Auffinden des Auktionspreises beim Versteigerungsmodell etwas einfacher.

Aus den Analogien der Mikroökonomie wird in diesem Kapitel deutlich, dass für den Entwurf eines EEM allgemein zwei Gesichtspunkte eine entscheidende Rolle besitzen: der *Nutzen* von Verbraucherfunktionen mit ihrer Energiedienstleistung aus Sicht des Fahrzeugsystems und der Insassen sowie die *Kosten* der Erzeuger und Speicher zur Bereitstellung der Endenergie. Bei der Anwendung beider ökonomischer Modelle gilt es, sowohl Kosten als auch den Nutzen in *einer* gemeinsamen kardinalen Nutzeneinheit zu vereinen. Während eine quantitative Bewertung der Kosten durch technische Parameter wie z. B. Kraftstoffverbrauch oder Lebensdauer erfolgen kann, ist eine Bestimmung des quantitativen Nutzens weitaus schwieriger. Neben technischen Gesichtspunkten des Fahrzeugsystems müssen zusätzlich subjektive Anforderungen der Insassen berücksichtigt werden. Als wichtiges Kriterium kann beispielsweise die Wahrnehmung von Funktionen herangezogen werden (vgl. [Gae05]).

6 Experimentelle Untersuchungen am Bordnetzprüfstand

Die Systemsimulation ist zu einem unverzichtbaren Werkzeug im Entwicklungsprozess für Fahrzeugfunktionen geworden. Zum Entwurf und zur Erprobung von Funktionen für ein elektrisches Energiemanagement (EEM) und zur Modellbildung von Bordnetzkomponenten wurde im Rahmen dieser Arbeit mit Unterstützung studentischer Arbeiten und der Institutswerkstatt ein Bordnetzprüfstand aufgebaut. Mit ihm besteht die Möglichkeit, das Zusammenwirken von EEM-Funktionen mit realen Komponenten zu beurteilen. Auf diese Weise können aufwendige Fahrzeugtests in eine spätere Entwicklungsphase verschoben werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, in einfacher Weise neuartige Bordnetzarchitekturen nachzubilden. Der Prüfstand ist modular konzipiert, so dass eine Verschiebung der Hardware-Software-Grenze in einem bestimmten Rahmen möglich ist. Damit kann das komplexe System an verschiedenen Stellen aufgetrennt werden. Es ergeben sich vielseitige Einsatzgebiete aus dem Bereich der Modellbildung von Bordnetzkomponenten [Mor06b] und dem Rapid Prototyping von EEM-Funktionen.

In diesem Kapitel sind das Konzept und der Aufbau des Bordnetzprüfstands beschrieben. Anschließend werden experimentelle Untersuchungen zur intelligenten Steuerung von Lastwechseln und die Integration von EEM-Funktionen vorgestellt.

6.1 Hardware-in-the-Loop-Bordnetzprüfstand als Testumgebung

Die Struktur des Bordnetzprüfstands, welcher nach einem Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulationskonzept realisiert wurde, ist in Bild 6.1 schematisch dargestellt. Das reale technische System ist über Schnittstellen mit Softwaremodulen verknüpft, welche auf einer Echtzeitplattform implementiert sind.

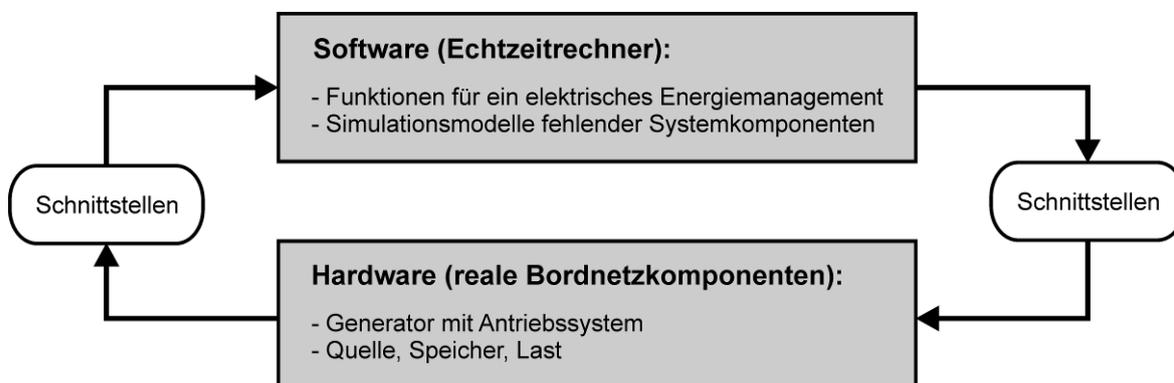


Bild 6.1: Schematische Struktur der HiL-Simulation am Bordnetzprüfstand [Köh04]

Auf diese Weise ist ein geschlossener Regelkreis bzw. eine vollständige Steuerkette gegeben und es können sowohl Softwarefunktionen als auch Hardwarekomponenten getestet werden. Stehen die realen technischen Komponenten nicht vollständig zur Verfügung, ist es ebenfalls möglich, einzelne Teilsysteme über Softwaremodelle in Echtzeit zu simulieren und durch entsprechende Aktorik ein reales Systemverhalten nachzubilden. Im Folgenden wird der HiL-Bordnetzprüfstand in Kurzform vorgestellt. Die Kenndaten wichtiger Komponenten sind im Anhang A7.1 aufgelistet. Ausführliche Beschreibungen zur Konstruktion und Aufbau sind in [Büc06a], [Köh04], [Usp04] und [Stol05] dokumentiert.

6.1.1 Übersicht zur Struktur und zum Aufbau

In Bild 6.2 ist der strukturelle Aufbau des Prüfstands dargestellt. An einem Stromschienensystem können zwei verschiedene Bordnetzpotentiale nachgebildet werden. Damit ist eine einfache Realisierung verschiedener Bordnetzarchitekturen möglich. Neben der Versorgung mit einem realen Kfz-Generator kann die Einspeisung auch mit einer elektronisch geregelten Stromversorgung erfolgen. Die Simulation erfolgt auf einer Echtzeitplattform der Firma dSPACE. Die Erstellung der Simulationsmodelle, die Codegenerierung und Steuerung des Programmablaufs kann über entsprechende Softwarepakete vorgenommen werden. Die Informationsübertragung zu den einzelnen Komponenten erfolgt über Analogsignale, serielle Schnittstellen (RS232) sowie über die beiden seriellen Bussysteme CAN und Bit-Serielle Datenschnittstelle (BSD).

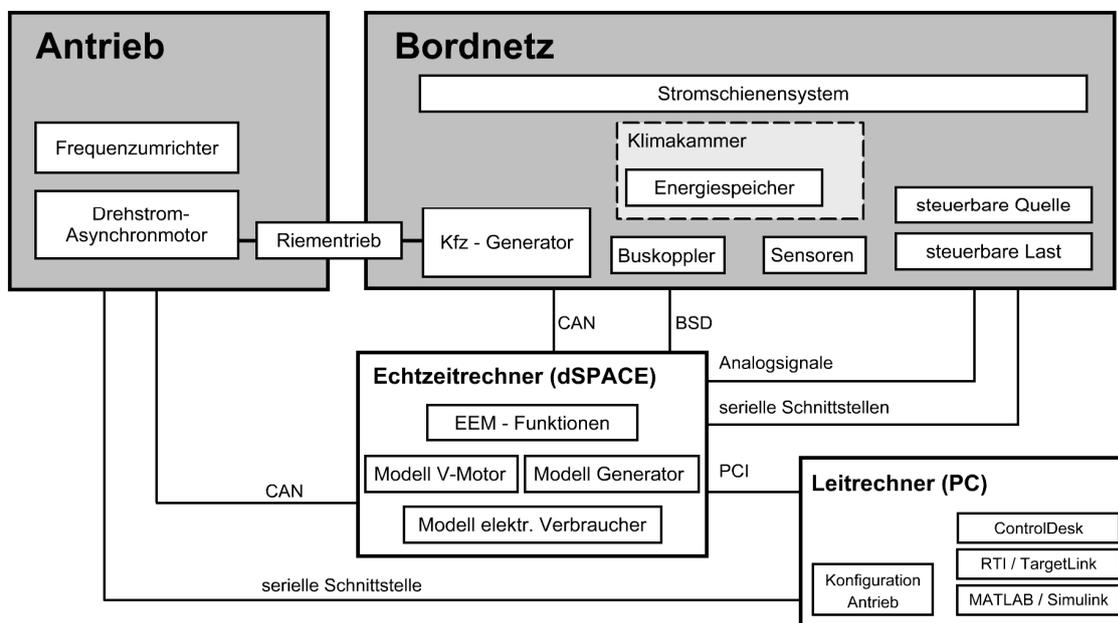


Bild 6.2: Struktureller Aufbau des HiL-Bordnetzprüfstands

Als Grundlage der Prüfstandskonstruktion dient ein Labortisch. Auf diesem ist ein Profilrahmen befestigt, welcher das Stromschienensystem und drei Nutenprofile zur Aufnahme von Blindplatten trägt (Bild 6.3). Dadurch ist eine hohe Modularität und Erweiterbarkeit

des Prüfstands gegeben. Die Stromschienen sind durch Abdeckungen vor Berühren geschützt. Unterhalb des Tisches befindet sich das Maschinenbett mit dem Generatorantrieb, welches von einer fahrbaren, akustisch gedämmten Umhausung eingeschlossen ist. Von vorne schützt eine Plexiglasscheibe vor dem Zugriff auf rotierende Teile, hinten ist die Umhausung zwecks Belüftung der Maschinen offen. Auf der Umhausung ist die Batterie untergebracht. Ein 19“-Schrank enthält neben verschiedenen Stromversorgungen für die Messtechnik die elektronisch regelbaren Quelle und Last, einen Feldbuskoppler zur Integration weiterer Messstellen (z. B. Thermomessfühler) sowie den Echtzeitrechner mit einem Einschub zur analogen Signalanpassung. Frequenzumrichter und Bremswiderstand sind an einer Wand des Raumes angebracht. Wenn erforderlich, steht zur Temperierung von Energiespeichern eine Klimakammer zur Verfügung.

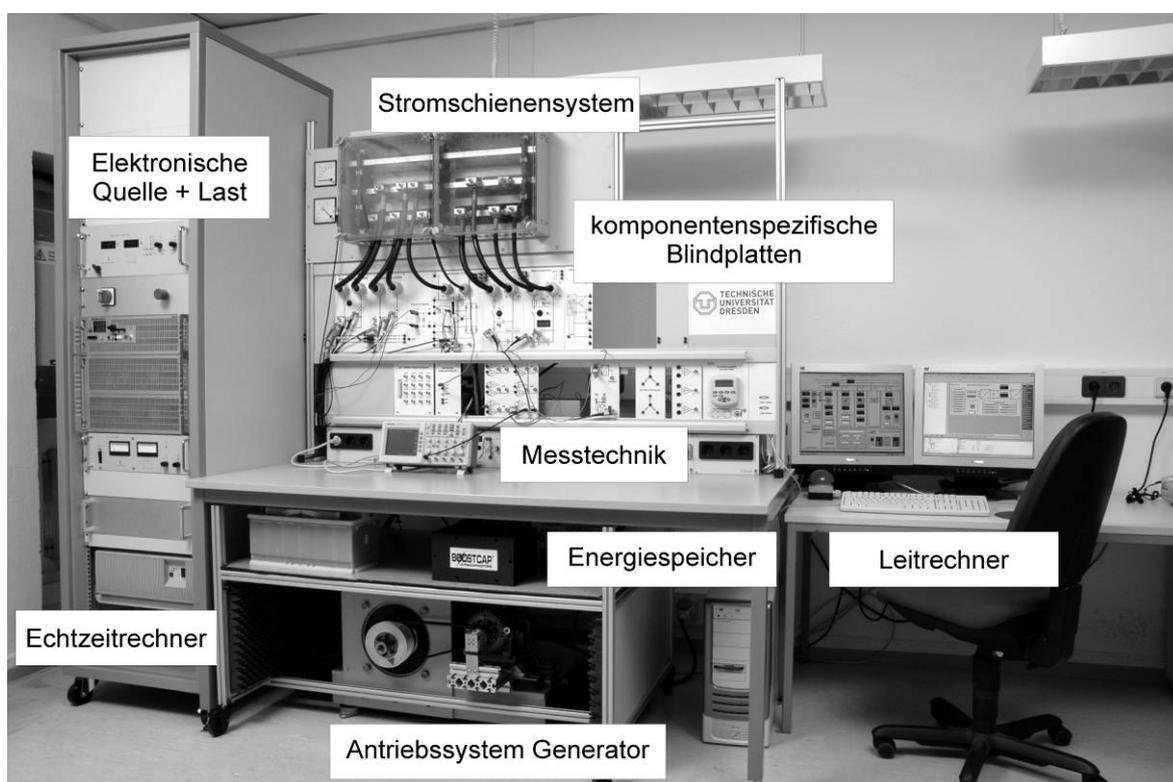


Bild 6.3: Foto des Hardware-in-the-Loop Bordnetzprüfstands

Zur Erfassung von elektrischen Spannungen werden Differenzverstärker eingesetzt. Da am Prüfstand unterschiedliche Messbereiche auftreten, kommen unterschiedliche Verstärkungen zum Einsatz. Die Messung elektrischer Ströme erfolgt mit Halleffekt-Kompensationswandlern. Die internen Regelgrößen von Quelle und Last stehen ebenfalls als Analogsignale zur Verfügung. Für jede Komponente existiert eine spezifische Blindplatte (Bild 6.4). Daran sind frontseitig Bedienelemente und BNC-Buchsen für Mess- und Steuersignale angebracht. Auf der Rückseite befinden sich neben der Messtechnik notwendige Anschlüsse von Steuerkabeln bzw. Sensleitungen zu den Komponenten.

Die Funktion des BSD-Masters wird am Prüfstand mit einer digitalen Signalprozessor-Einsteckkarte zusammen mit einer einfachen Hardwareschaltung emuliert. Die Übertragung der Botschaften erfolgt zyklisch mit einem festen Timing [Köh04]. Die Echtzeitplattform verfügt über mehrere CAN-Knoten. Am Prüfstand wird ein High-Speed Bus mit 500 kbit/s eingesetzt. An diesem sind das Antriebssystem und der Feldbuskoppler angeschlossen.

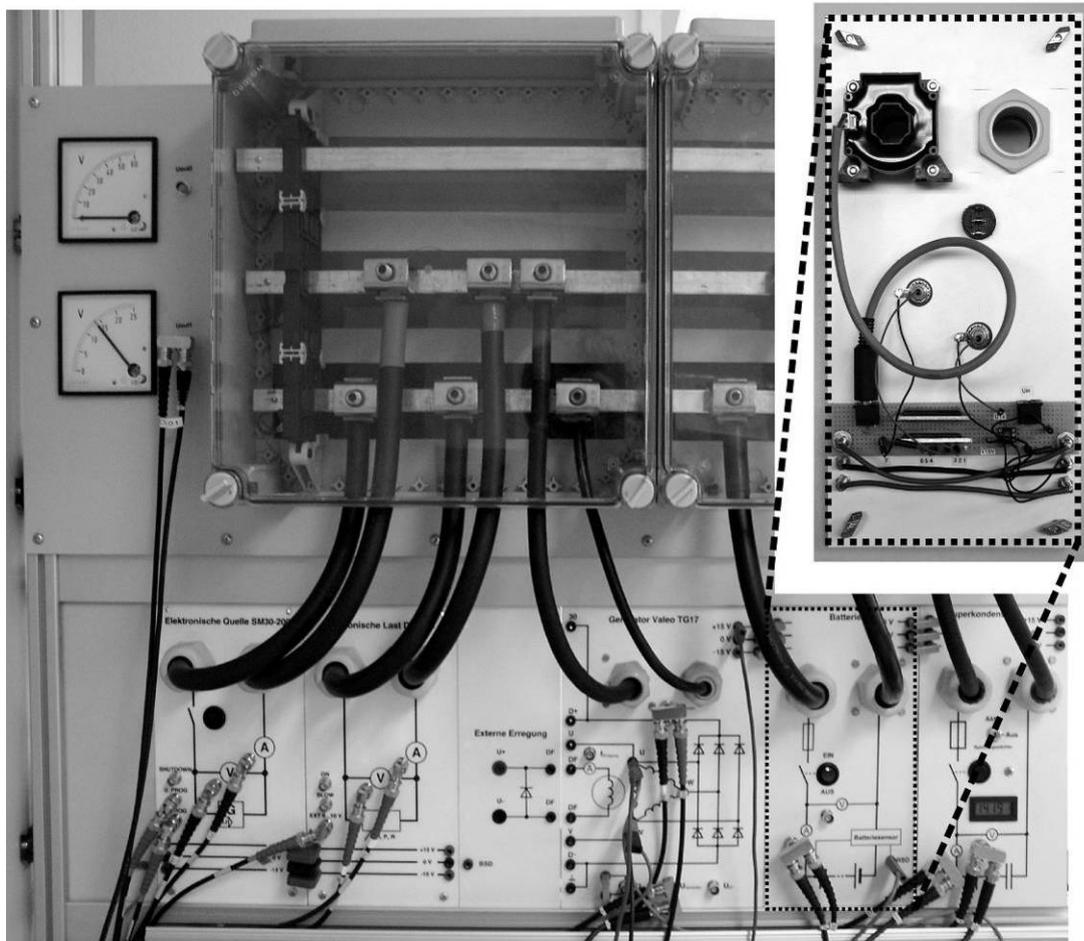


Bild 6.4: Detailansicht des Stromschienensystems sowie der komponentenspezifischen Blindplatten mit dem Beispiel einer Rückseite

6.1.2 Nachbildung des Kfz-Bordnetzes

Der Bezugspunkt des nachgebildeten Bordnetzes ist das Stromschienensystem. An dieses werden entsprechend der gewählten Bordnetztopologie alle elektrischen Komponenten angeschlossen. Zwei Stromschienen stellen die zwei im Kfz vorhandenen Potentiale an den Batterieklemmen dar. Die dritte Stromschiene könnte eine zweite Spannungsebene tragen, um ein Mehrspannungsbordnetz nachzubilden. In diesem Abschnitt werden die Bordnetzkomponenten beschrieben, die zur Nachbildung eines herkömmlichen 14V-Bordnetzes benötigt werden.

Elektrische Energieerzeuger

Für das Bordnetz sind zwei Arten der Energieeinspeisung möglich. Für Simulationszwecke steht eine elektronisch geregelte Quelle ($U_{\max} = 30 \text{ V}$, $I_{\max} = 200 \text{ A}$) zur Verfügung. Ebenso ist der Einsatz eines realen Kfz-Generators möglich. Für Testzwecke steht ein Generator der Firma Valeo vom Typ TG17 mit mehreren Thermomessstellen bereit. Der Generatorregler besitzt einen Anschluss für den BSD (vgl. Tabelle 2.3 und Bild 2.6). Das Antriebssystem für den Generator besteht aus Frequenzumrichter, Elektromotor und Riemtrieb. Der Drehstrom-Asynchronmotor mit einer Nennleistung von 15 kW und einer Maximaldrehzahl von 7500 min^{-1} besitzt mit zwei Polpaaren ein geringes Trägheitsmoment für maximale Dynamik. Der Frequenzumrichter steuert den Motor mit einer feldorientierten Mehrgrößen-Vektorregelung an. Er besitzt mit seinen 30 kW Nennleistung genügend Leistungsreserve für einen hochdynamischen Betrieb im gesamten Drehzahlbereich¹. Der Generatorantrieb erfolgt wie im Fahrzeug über einen Keilrippenriemen. Dafür ist an der Welle des Elektromotors eine Riemenscheibe mit einem Spannsatz befestigt. Der Generator ist auf einem Spannschlitten aufgesetzt, welcher aus Nutenprofilen konstruiert wurde. Die Linearbewegung läuft auf Gleitschienen und weist eine hohe Steifigkeit auf. Die vielseitigen Befestigungsmöglichkeiten gewährleisten zugleich die Montage unterschiedlicher Generatorbauformen. Die Riemenspannung kann mittels Stellschraube vorgegeben werden. Das Antriebssystem befindet sich auf einem Maschinenbett, welches mit Schwingungsdämpfern auf dem Fußboden steht (Bild 6.5).

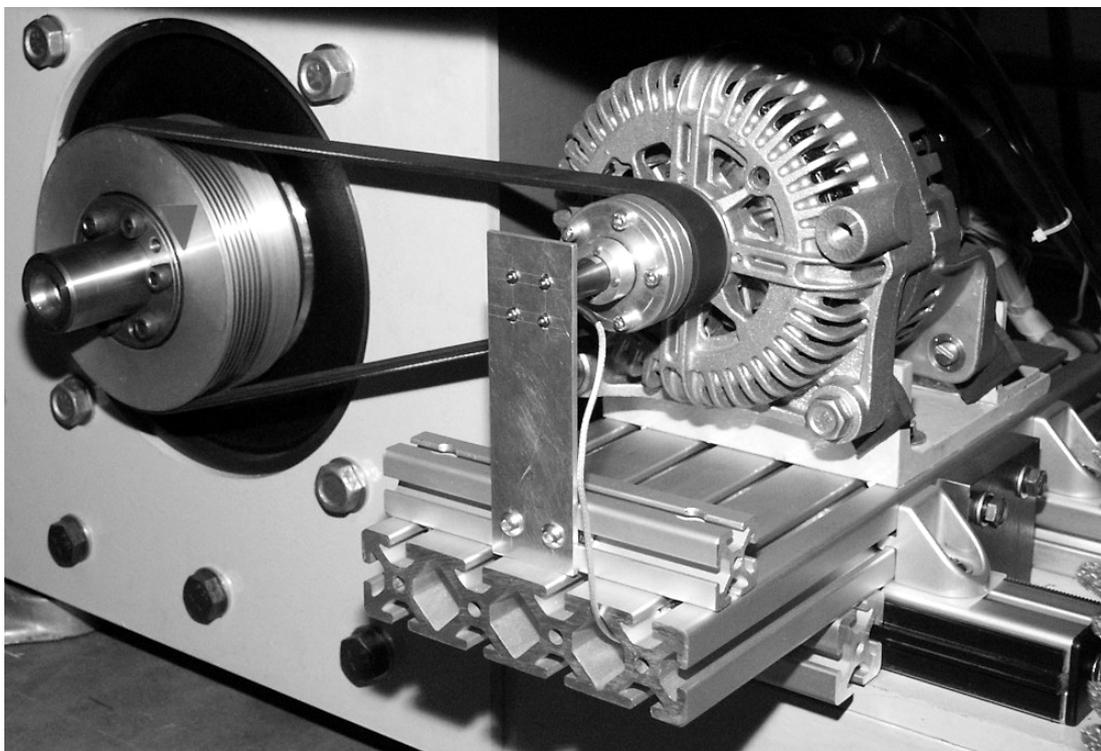


Bild 6.5: Foto des Antriebssystems zum Betrieb des Kfz-Generators

¹ Die Auslegung des Antriebssystems würde ebenfalls einen dynamischen Betrieb eines Starter-Generators mittlerer Leistung (bis ca. 12 kW) ermöglichen [Büc06a].

Um die mechanische Leistungsaufnahme des Generators zu bestimmen, ist es notwendig, seine Drehzahl sowie das Drehmoment zu erfassen. Dafür wurde eine spezielle Riemenscheibe mit einer Messnabe gefertigt, auf welcher eine DMS-Vollbrücke appliziert wurde. Für die Sensorsignalverstärkung, telemetrische Übertragung und Auswertung wird ein industrielles Messsystem verwendet. Dabei wird die Brückenspannung auf eine hochfrequente Trägerfrequenz aufmoduliert. Zur Ermittlung der Messverstärkung steht eine Kalibriereinrichtung mit definierten Drehmomenten in Ruhelage zur Verfügung. Die Generator-drehzahl wird durch Auswertung der Frequenz einer verketteten Strangspannung des Generators mit einem Frequenz-Spannungs-Wandler gemessen.

Elektrische Energiespeicher

Am Prüfstand werden 12V Blei-Akkumulatoren als elektrische Energiespeicher eingesetzt. Die Batterie ist manuell mit einem Gleichstromschütz zuschaltbar und durch eine Schmelzsicherung vor Kurzschluss abgesichert. An der Minusklemme ist ein intelligenter Batteriesensor (IBS) installiert (siehe Tabelle 2.4). Dessen Informationen werden über den BSD übertragen.

Elektrische Verbraucher

Eine exakte Nachbildung des Energiebordnetzes mit seinem stark verzweigten Kabelbaum zu den einzelnen Schaltmodulen und Verbrauchern ist nur sehr schwer möglich. Weiterhin bringt die Integration realer Verbraucher zahlreiche Probleme mit sich, da im Labor zusätzlich realistische Belastungsbedingungen umgesetzt werden müssten. Die Belastung des Bordnetzes am Prüfstand erfolgt deswegen mit einer elektronisch steuerbaren Last ($U_{\max} = 60 \text{ V}$, $I_{\max} = 500 \text{ A}$, $P_{\text{el,max}} = 7,2 \text{ kW}$). Die Berechnung des Laststroms basiert auf Simulationsmodellen, welche anhand dynamischer Messungen der Verbraucherleistungen im Fahrzeug parametrisiert wurden [Büc06a], [Bis07]. Um die Vielzahl elektrischer Komponenten im Kraftfahrzeug mit geringem Aufwand nachbilden zu können, wurden zunächst Grundmodelle für unterschiedliches transientes Schaltverhalten und ein Erwärmungsverhalten erstellt. Diese berücksichtigen unter anderem:

- den Einfluss der Bordnetzspannung auf die Leistungsaufnahme (geregelt bzw. unregelt Verbraucher [Büc05b]),
- die Leistungsvorgabe der Verbraucher (binär, stufenweise, kontinuierlich) mit dem entsprechenden Ansteuerverfahren (z. B. bei getakteten Verbrauchern),
- den charakteristischen Strombedarf von Verbrauchern mit zeitlich zyklischen Profilen (z. B. Blinker, Scheibenwischer),
- den Stromabfall durch Erwärmung der Verbraucher bei Stromdurchfluss.

Jedes Verbrauchermodell lässt sich aus einem oder der Überlagerung mehrerer Grundmodelle entwickeln. Eine Übersicht der Grundmodelle und Beispiele für parametrisierte Verbrauchermodelle befinden sich im Anhang A7.2.

6.1.3 Bedienung und Steuerung

Die Echtzeitplattform der Firma dSPACE ist ein Multiprozessorsystem mit mehreren Einsteckkarten. Der Hauptprozessor des Gesamtsystems ist ein IBM PowerPC 750FX (800 MHz). Er ist für die Kommunikation mit den anderen Schnittstellenkarten und mit dem Leitrechner (Host-PC) verantwortlich. Weitere Einsteckkarten dienen als Co-Prozessoren und zur Kommunikation mit der Hardware. Die zu entwickelnden Softwarefunktionen sind am einfachsten auf der Basis von Signalflussmodellen in Matlab/Simulink zu entwerfen. Vom Codegenerator werden zahlreiche Blockbibliotheken unterstützt. Die Konfiguration des Echtzeitrechners mit den Einsteckkarten und die Verknüpfung mit dem Signalfluss erfolgt ebenfalls mit speziellen Blöcken in Matlab/Simulink. Über den Codegenerator wird der Quellcode generiert und mit dem entsprechenden Compiler der Target-Code erzeugt. Dieser wird in den Flash-Speicher des Echtzeitrechners geladen und dort ausgeführt.

Die Bedienung und Beobachtung des Prüfstandes erfolgt mit der Software ControlDesk. Der Nutzer steuert die HiL-Simulation, kann online Prozessvariablen verfolgen und Modellvariablen verändern. Dafür können grafische Bedienoberflächen frei gestaltet werden (Bild 6.6). Zum Automatisieren von Experimenten ist es möglich, Makros einzubinden. Auf diese Weise können Steuerungsschritte von der Software selbstständig durchgeführt werden. Mit Hilfe eines graphischen Editors können definierte Zeitprofile für Simulationsvariable eingebunden werden. ControlDesk bietet ebenfalls die Möglichkeit, beliebige Variable aufzuzeichnen und als Messdateien abzuspeichern.

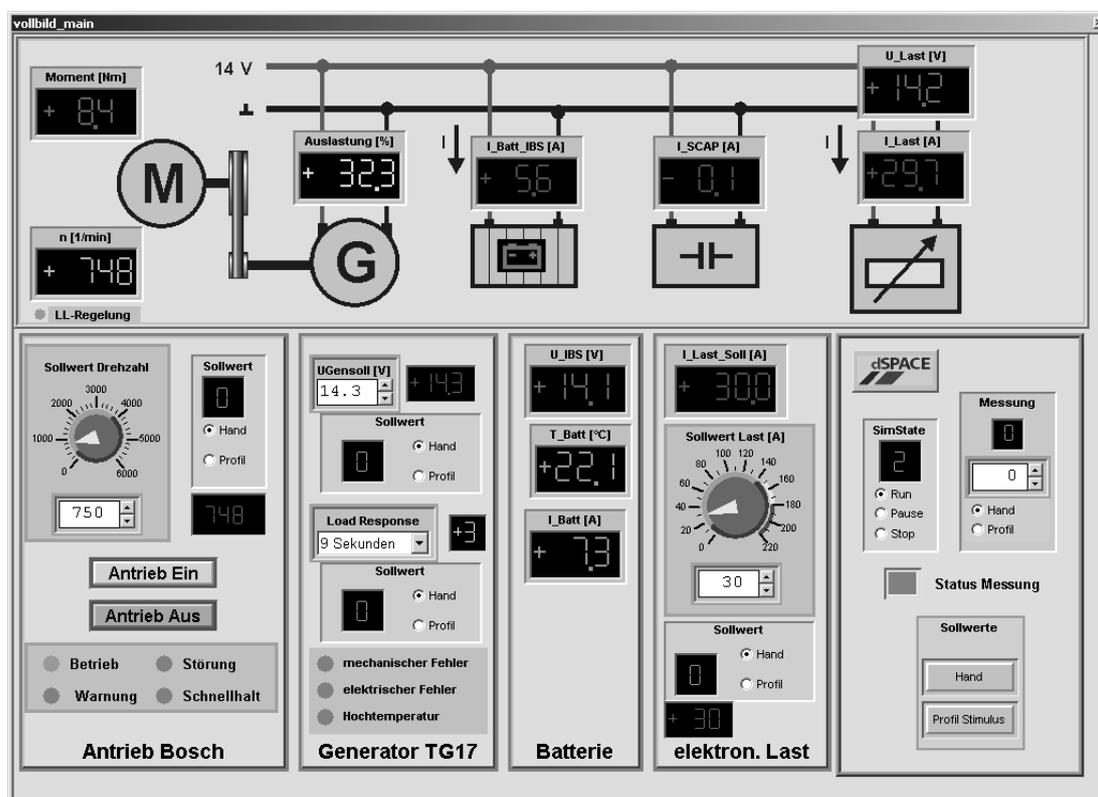


Bild 6.6: Grafische Bedienoberfläche in ControlDesk (Hauptfenster)

6.2 Untersuchungen zu dynamischen Lastwechseln

Die in Abschnitt 3.3 vorgestellte Wirkungskette bei Lastwechseln im elektrischen Bordnetz wurden am Bordnetzprüfstand experimentell untersucht. Damit ist es möglich, einige der genannten Maßnahmen näher zu bewerten.

6.2.1 Aufbau und Durchführung der Experimente

Der Versuchsaufbau am HiL-Bordnetzprüfstand ist in Bild 6.7 skizziert. Als Grundlage für die Untersuchungen dient ein herkömmliches 14V-Energiebordnetz, welches optional um ein SuperCap-Modul ($C_{SCAP} = 110 \text{ F}$, $U_{SCAP,max} = 16 \text{ V}$) erweitert werden kann. Der Anschluss des Generators ist mit einem Kfz-Originalkabel ausgeführt, um den Spannungsabfall zwischen Generator und Batterie näherungsweise nachzubilden (vgl. Bild 3.6). Vom Echtzeitrechner werden die Sollgrößen über festgelegte Profile und interne Modelle von elektrischen Verbrauchern und der Leerlaufdrehzahlregelung vorgegeben sowie die Messgrößen der Bordnetzkomponenten aufgezeichnet.

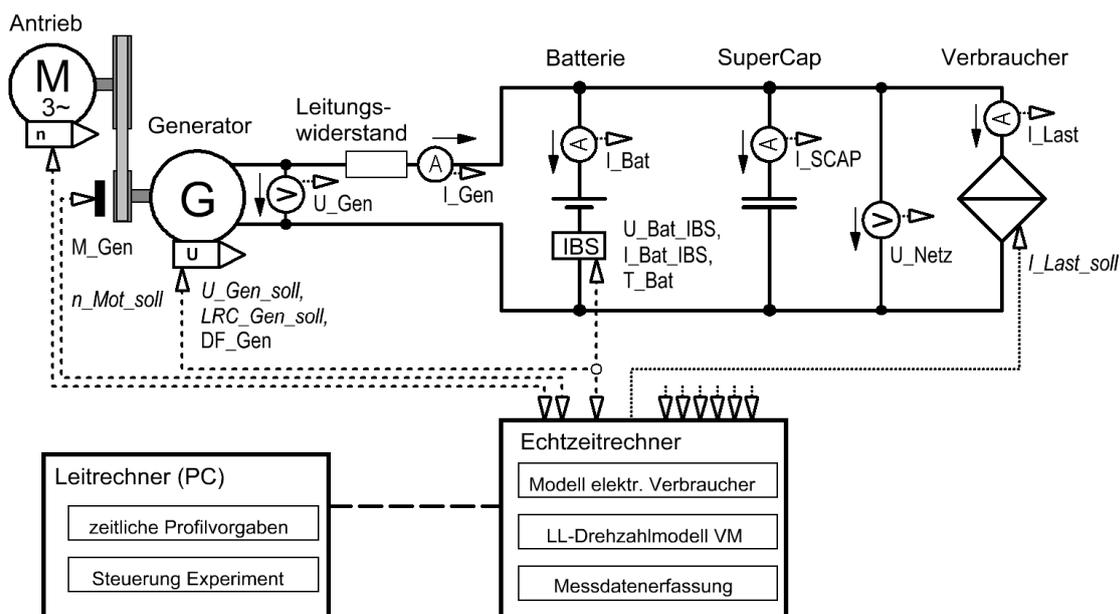


Bild 6.7: Versuchsaufbau zur experimentellen Untersuchung von Lastwechseln

Leerlaufdrehzahlmodell

Zur Bestimmung des Leerlaufdrehzahlverhaltens steht ein Modell zur Verfügung, welches den Verbrennungsmotor und den LL-Drehzahlregler beschreibt [Usp07]. Das Mittelwertmodell des Motors umfasst die mathematische Beschreibung des Luft- und Kraftstoffpfades, der Drehmomenterzeugung und der Rotationsdynamik der Kurbelwelle (Bild 6.8). Das gemessene Lastmoment des Generators wird dem Motormodell als Störgröße aufgeschaltet. Aus dem berechneten Drehzahlverhalten werden im LL-Drehzahlregler die Stellgrößen

Versuchsdurchführung

Tabelle 6.1 zeigt die Komponenten und deren Parameter für die durchgeführten Messungen. Die einzelnen Messungen unterscheiden sich in der Verwendung des SuperCap-Moduls, in der Temperierung der Energiespeicher und dem Parameter der Load-Response-Control (LRC) des Generators. Die Batterie wurde vor jeder Messung auf den vorgegebenen Ladezustand konditioniert [Sal08]. Die Profilvergabe für den Laststrom setzt sich aus mehreren Verbrauchern zusammen (siehe Bild 6.9).

Tabelle 6.1: Parameterspezifikation der durchgeführten Messungen

Bezeichnung	Typ / Wert
Generator	Valeo TG17
Batterie	AGM, $Q_{Bat} = 70 \text{ Ah}$, moderat gealtert
SuperCap-Modul	nicht verwendet / Maxwell BMOD 0110 P016
$\vartheta_{Bat}, \vartheta_{SC}$	Raumtemperatur (25 °C) / kalte Temperatur (-20 °C)
$SOC_{Bat}(t = 0 \text{ s})$	hoch (90 %) / niedrig (70 %)
$U_{Gen,soll}$	14,3 V
LRC_{Gen}	aktiv (9 s) / inaktiv (0 s)
$n_{VM,soll}$	Leerlaufdrehzahl 550 min^{-1}
$I_{Last,soll}$	zeitliche Profilvergabe nach Bild 6.9

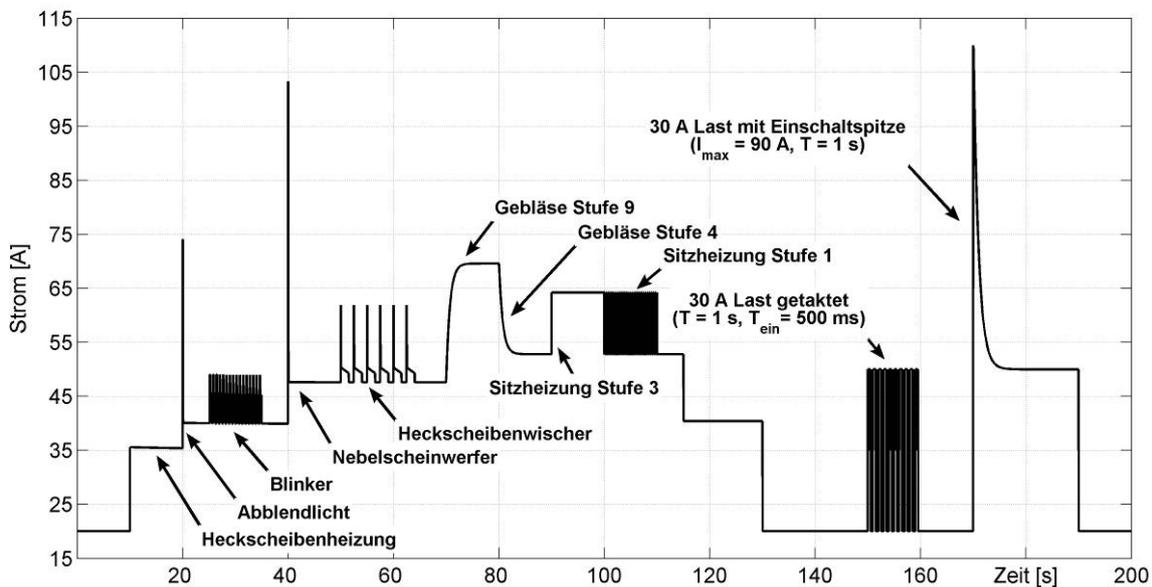


Bild 6.9: Stromprofilvorgabe einer Lastwechselmessung bei konstanter Bordnetzspannung von 14,3 V und einem Grundlaststrom von 20 A

6.2.2 Ergebnisse und Auswertung

Die Ergebnisse der zehn durchgeführten Messungen zum Lastwechselverhalten für unterschiedliche Parameterspezifikationen sind im Anhang A.8 dargestellt. Dabei sind jeweils die Messungen nur mit Batterie und dem zusätzlichen Einsatz eines SuperCap-Moduls als Energiespeicher zur Leistungspufferung zum Vergleich nebeneinandergestellt. Als Variation werden der Einfluss des Batterie-Ladezustands, der Energiespeicher-Temperatur und der Anstiegsbegrenzung des Generators gezeigt.

Als Referenz ist die Messung mit der gut geladenen AGM-Batterie bei Raumtemperatur und aktiver LRC (jeweils linke Seite von Bild 6.10 und Bild A8.1) zu sehen. Man erkennt sehr deutlich den Einfluss der Lastwechsel des Verbraucherprofils auf Batteriestrom, Bordnetzspannung und Motordrehzahl. Wegen der LRC steigt der Generatorstrom bei Lastsprüngen rampenförmig an, die Batterie übernimmt während dieser Zeit einen Teil der Energieversorgung (vgl. Bild 3.5). Daraus resultieren Schwankungen in der Bordnetzspannung. Beim Einsatz des SuperCap-Moduls zeigt sich, dass dieser einen großen Teil der dynamischen Leistungspufferung übernimmt. Die Bordnetzspannung bricht bei Lastsprüngen kaum ein. Gleichzeitig glättet der Kondensator die vom Generator verursachten Oberwelligkeiten im Bordnetz.

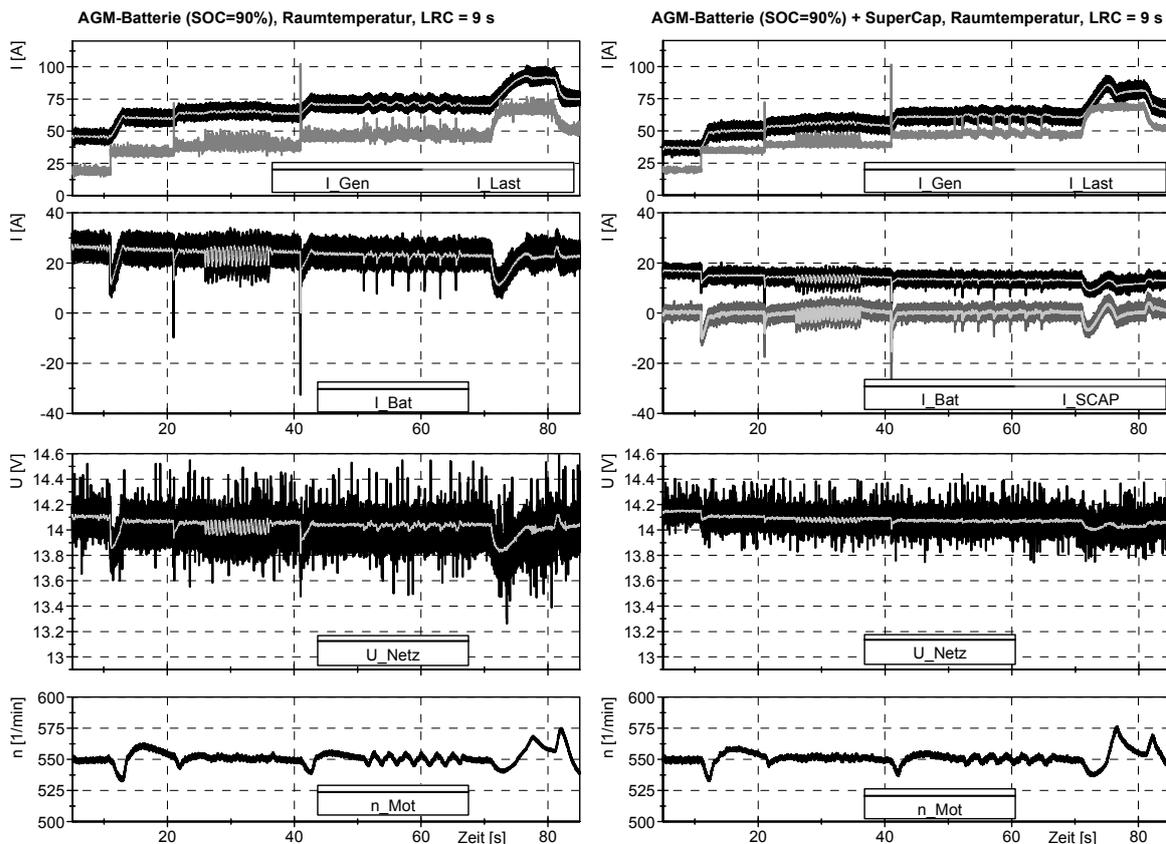


Bild 6.10: Ausschnitt des gemessenen Lastwechselverhaltens am Bordnetzprüfstand unter Vorgabe des elektrischen Lastprofils bei Raumtemperatur; Vergleich mit und ohne SuperCap-Modul¹

Der Unterschied tritt bei kalten Temperaturen noch stärker hervor (Bild A8.2, Bild 6.11). Während die Leistungsfähigkeit der Batterie bei kalten Temperaturen sehr stark eingeschränkt ist, besitzt das SuperCap-Modul auch in diesem Fall ein gutes Verhalten gegenüber dynamischen Leistungsanforderungen. Die Bordnetzspannung besitzt dadurch deutlich geringere Einbrüche.

Während der Generator bislang nur in Teillast betrieben wurde, ist er bei niedrigem Batterieladestrom wegen des deutlich höheren Ladestroms während der gesamten Messung bei maximaler Leistungsabgabe (Bild A8.3). Da der Generator in diesem Fall als Konstantstromquelle arbeitet, verhalten sich der Batteriestrom und damit die Bordnetzspannung nahezu proportional zum Laststrom. Steigt der Verbraucherstrom an, verringert sich somit die Spannung im Bordnetz. Beim Einsatz des SuperCap-Moduls kann dieser Spannungsabfall nicht verhindert werden, jedoch fallen die Spannungsgradienten bei Lastwechseln durch die zusätzliche Energiebereitstellung wesentlich geringer aus.

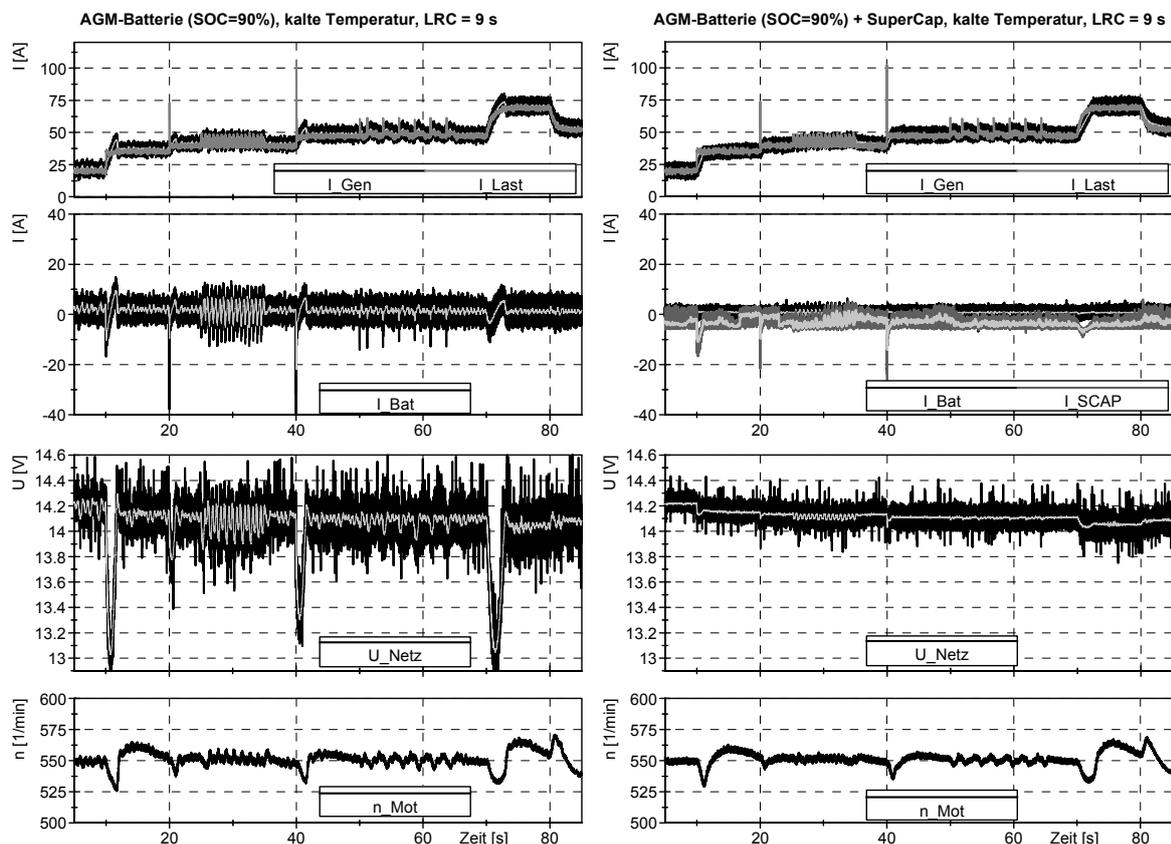


Bild 6.11: Ausschnitt des gemessenen Lastwechselverhaltens am Bordnetzprüfstand unter Vorgabe des elektrischen Lastprofils bei kalter Temperatur der Energiespeicher; Vergleich mit und ohne SuperCap-Modul³

Die Auswirkungen der LRC auf das Bordnetz und den Antriebsstrang werden mit den Messungen aus Bild A8.4 und Bild A8.5 deutlich. Ist die LRC nicht aktiv, kann der Gene-

³ Zur besseren Interpretation der Verläufe sind die Ströme I_{Gen} , I_{Bat} , I_{SCAP} und die Bordnetzspannung U_{Netz} zusätzlich als gefilterte Signale in die Messaufzeichnung dargestellt (hellere Kurvenfarbe).

rator wesentlich schneller auf Lastsprünge reagieren. Zwar sind die Spitzenströme aus der Batterie im Vergleich zur aktiven LRC etwa gleich groß, jedoch ist die Zeitdauer der Leistungspufferung geringer. Dadurch fallen die Spannungseinbrüche im Bordnetz etwas geringer aus und die Batterie wird nicht so stark zyklisch belastet. Dafür ist wegen der steileren Drehmomentgradienten des Generators am Antriebsstrang ein wesentlich unruhigeres Leerlaufverhalten zu beobachten. Dies tritt vor allem bei getakteten Verbrauchern und kalter Batterie auf. Beim Einsatz des SuperCap-Moduls kann nochmals die Spannungsqualität gegenüber der Messung mit LRC etwas verbessert werden (vgl. Bild A8.1). In Bezug auf das Drehzahlverhalten des Verbrennungsmotors ist hier jedoch kaum eine Verbesserung festzustellen. Hinzu kommt, dass bei hohen Generatorauslastungen Schwingungen im System zu beobachten sind. Dabei bleibt offen, ob diese Instabilität durch den Generatorregler oder das LL-Drehzahlmodell des Verbrennungsmotors verursacht wird.

Zusammenfassung

Mit den Messungen ist die Bedeutung des Energiespeichers und der Einfluss der LRC des Generators in der Lastwechselkette gezeigt worden (vgl. Bild 3.4). Wie erwartet hat die Leistungsfähigkeit der Batterie großen Einfluss auf die Bordnetzstabilität. Durch den Einsatz des SuperCap-Moduls in direkter Parallelschaltung zur Batterie kann die Spannungsqualität im Bordnetz erheblich verbessert werden. Da der SuperCap im Gegensatz zur Batterie auch bei kalten Temperaturen noch eine gute Leistungsfähigkeit besitzt, zeigt sich in diesem Fall der Unterschied sehr deutlich. Die Verwendung eines SuperCap-Moduls als weiteren Energiespeicher im Kfz-Bordnetz stellt daher eine interessante Möglichkeit, dynamischen Leistungsanforderungen von Verbrauchern gerecht zu werden (vgl. Abschnitt 2.3.3). Im Gegenzug könnte sich Konstruktion und Dimensionierung der Batterie vorzugsweise nach Gesichtspunkten der Energiedichte orientieren. Die Messungen zeigen weiterhin, dass mit einer LRC die Leerlaufunruhe reduziert wird. Insbesondere bei großen positiven Lastsprüngen kann der Drehzahleinbruch erheblich verringert werden. Bei guter Leistungsfähigkeit der Batterie fallen die Auswirkungen auf die Bordnetzspannung eher gering aus.

6.3 Integration eines elektrischen Energiemanagements

Als Ergebnis der Untersuchungen aus den Kapiteln 3 und 4 ist am Beispiel des 14V-Energiebordnetzes ein Energiemanagement entworfen worden. Die Funktionen wurden in die Prüfstandsumgebung eingebunden und konnten dadurch experimentell bewertet werden [Bis07]. Die am Prüfstand umgesetzten Funktionen orientieren sich an der Struktur eines modernen Energiemanagements (vgl. Bild 3.2). Die EEM-Funktionen zur Energieversorgung enthalten Maßnahmen zur Vermeidung von Leistungsdefiziten, zur Erhöhung der Bordnetzstabilität bei Lastwechseln sowie eine bevorzugte Erzeugung elektrischer Energie in günstigen Betriebspunkten. Die Koordination der Verbraucherleistungen ist mit einer prioritätsgesteuerten Zuteilung der elektrischen Energie unter den Gesichtspunkten der Bordnetzstabilität und effizienten Energienutzung realisiert.

6.3.1 Funktionen zur Energieversorgung

Die EEM-Funktionen für eine zuverlässige und effiziente Energieversorgung setzen eine Zustandserfassung der Batterie und des Generators voraus (vgl. Abschnitt 2.4.3). Für das Batteriemonitoring werden die Daten des Batteriesensors genutzt. Die Ladezustandsbestimmung ist vereinfacht mit einer Ladebilanzierung von einem vorgegebenen Anfangsladezustand $SOC_{Bat}(t_0)$ umgesetzt worden. Der Ladezustand bezieht sich dabei auf die Nennkapazität Q_{Bat} der Batterie. Bei der Berechnung des Batteriestromintegrals [Bäk98]

$$SOC_{Bat}(t_{end}) = SOC_{Bat}(t_0) + \frac{1}{Q_{Bat}} \int_{t_0}^{t_{end}} I_{Bat}(t) - I_{Bat,V}(t) dt \quad (6.1)$$

werden zusätzlich mit der näherungsweise Berechnung des temperatur- und spannungsabhängigen Gasungsstroms $I_{Bat,V}$ die Ladungsverluste berücksichtigt [Bul-02]. Bei Motorstillstand wird in der Batteriediagnose zusätzlich die Leistungsfähigkeit der Batterie überwacht. Als Bewertungskriterium dient die Batteriespannung in Abhängigkeit des Entladestroms und der Temperatur. Das Generatormonitoring stützt sich vereinfacht auf die gemeldete Generatorauslastung (DF) des Generatorreglers sowie auf die Maximalstromkennlinie (Bild A2.1)⁴. Auf Grundlage der Aussagen von Kapitel 4 kommen zwei weitere binäre Statusinformationen über den Antriebsstrang hinzu: Zum einen ein Signal, welches während der Schubabschaltung des Verbrennungsmotors gesetzt ist. Zum anderen wird anhand des aktuellen Arbeitspunktes des Erzeugersystems signalisiert, wenn eine elektrische Energieerzeugung nicht effizient ist. Dieses Zustandsbit ist während des Motorleerlaufs, bei hoher Auslastung des Verbrennungsmotors (z. B. beim Anfahren) und bei hohen Motordrehzahlen gesetzt. Auf Grundlage dieser Informationen wurden folgende EEM-Funktionen zur Energieversorgung am Prüfstand integriert [Bis07]:

- *Erhöhung der Generatorausgangsleistung durch Spannungsanhebung:*
Zur Bremsenergieerückgewinnung wird während der Schubabschaltung die Sollspannung des Generators angehoben. Die Anhebung erfolgt sowohl in Abhängigkeit des Batteriezustands als auch unter Berücksichtigung der Anforderung aktiver Verbraucher an die Spannungsversorgung. Absolutwert und der Spannungsgradient werden beschränkt. Diese Maßnahme ermöglicht, ohne Erweiterung der Bordnetztopologie den Kraftstoffbedarf zur Bereitstellung elektrischer Energie zu verringern [Chr06].
- *Anhebung der Leerlaufdrehzahl:*
Bei ungenügender Leistungsreserve des Generators wird die Leerlaufdrehzahl stufenweise angehoben. Damit wird Leistungsdefiziten im Bordnetz entgegengewirkt und eine erhöhte Batteriebelastung verhindert.

⁴ In [Fab06] wird gezeigt, dass mit Kenntnis des Erregerstroms die Temperaturabhängigkeit bei der Bestimmung der Leistungsreserve des Generators mit einbezogen werden kann. Weiterhin wird die Spannungsabhängigkeit des maximalen Generatorstroms mit einer quadratischen Funktion genähert. Auf diese Weise kann das Generatormonitoring deutlich verbessert werden.

- *Anpassung der Load-Response-Control (LRC):*
Der Parameter der LRC wird in Abhängigkeit des Batterieladezustands angepasst. Bei geringen Ladezuständen der Batterie wird die Reaktionszeit des Generators stufenweise verkürzt, um die Bordnetzstabilität nicht zu gefährden. Mit dieser Funktion wird versucht, einen Kompromiss zwischen Bordnetzstabilität und LL-Drehzahlverhalten zu erreichen [Büc03].
- *Anpassung der Generatorspannung zur optimalen Batterieladung:*
Die Generatorausgangsspannung wird so nachgeführt, dass der stromabhängige Spannungsabfall des Ladekabels kompensiert wird. Die Vorgabe der Ladespannung an der Batterie erfolgt in einem Toleranzband auf Grundlage ihres Ladezustands und der Batterietemperatur. Auf diese Weise kann eine verbesserte Batterieladung erreicht werden. Eine Gasung auf Grund von Überladung wird vermindert.

6.3.2 Funktionen zur Energieverteilung

Der Zuteilungsmechanismus der verfügbaren Leistung auf die Verbraucher erfolgt nach einer statischen Rangliste, in welcher die Verbraucher nach ihrer Priorität geordnet sind⁵. Dadurch wird die Funktionsverfügbarkeit von Komfortverbrauchern in Abhängigkeit von ihrer Relevanz und der verfügbaren Leistung im Bordnetz vorgegeben. Die zugehörige Struktur ist in Bild 6.12 dargestellt. Ausgehend von der verfügbaren Leistung wird der benötigte Leistungsbedarf der einzelnen Verbraucher abgezogen. Dabei sind die Verbraucher nach ihrer Priorität angeordnet. Steht für einen Verbraucher nicht mehr genügend Leistung für die angeforderte Schaltfunktion zur Verfügung, wird er abgeschaltet bzw. in seiner Leistung reduziert. Die jeweilige Verbraucherleistung wird zusätzlich durch folgende individuelle EEM-Funktionen beeinflusst [Bis07]:

- *Berücksichtigung von Umweltdaten:*
Steigt die Relevanz einer Verbraucherfunktion bei bestimmten Umweltbedingungen, wird die Leistung unabhängig der Leistungsreserve immer bereitgestellt.
- *Lastpunktabenkung bei ineffizienter Energiebereitstellung:*
Die Leistung von Verbrauchern mit hoher Funktionsträgheit wird dann reduziert, wenn im aktuellen Arbeitspunkt eine Energiebereitstellung nicht effizient ist. Es erfolgt eine Überwachung des Funktionszustands, um eine minimale Funktionsverfügbarkeit zu gewährleisten.
- *Berücksichtigung verbraucherabhängiger Schaltstrategien:*
Zu den individuellen EEM-Funktionen gehören das Ausschalten elektrischer Komponenten nach einer bestimmten Betriebszeit bzw. Leistungsaufnahme (Heckscheibenheizung), die wechselseitige Ansteuerung von getakteten Verbrauchern (Sitz-

⁵ Die statische Rangliste kann als stark vereinfachtes Versteigerungsmodell betrachtet werden, in der die Nachfrager mit festen Geboten an der Versteigerung teilnehmen [Bis07]. Eine Erweiterung des Modells nach den in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnissen konnte aus Zeitgründen nicht mehr umgesetzt werden.

heizungen) und die Funktionskopplung voneinander abhängiger Verbraucher (Abblendlicht und Nebelscheinwerfer).

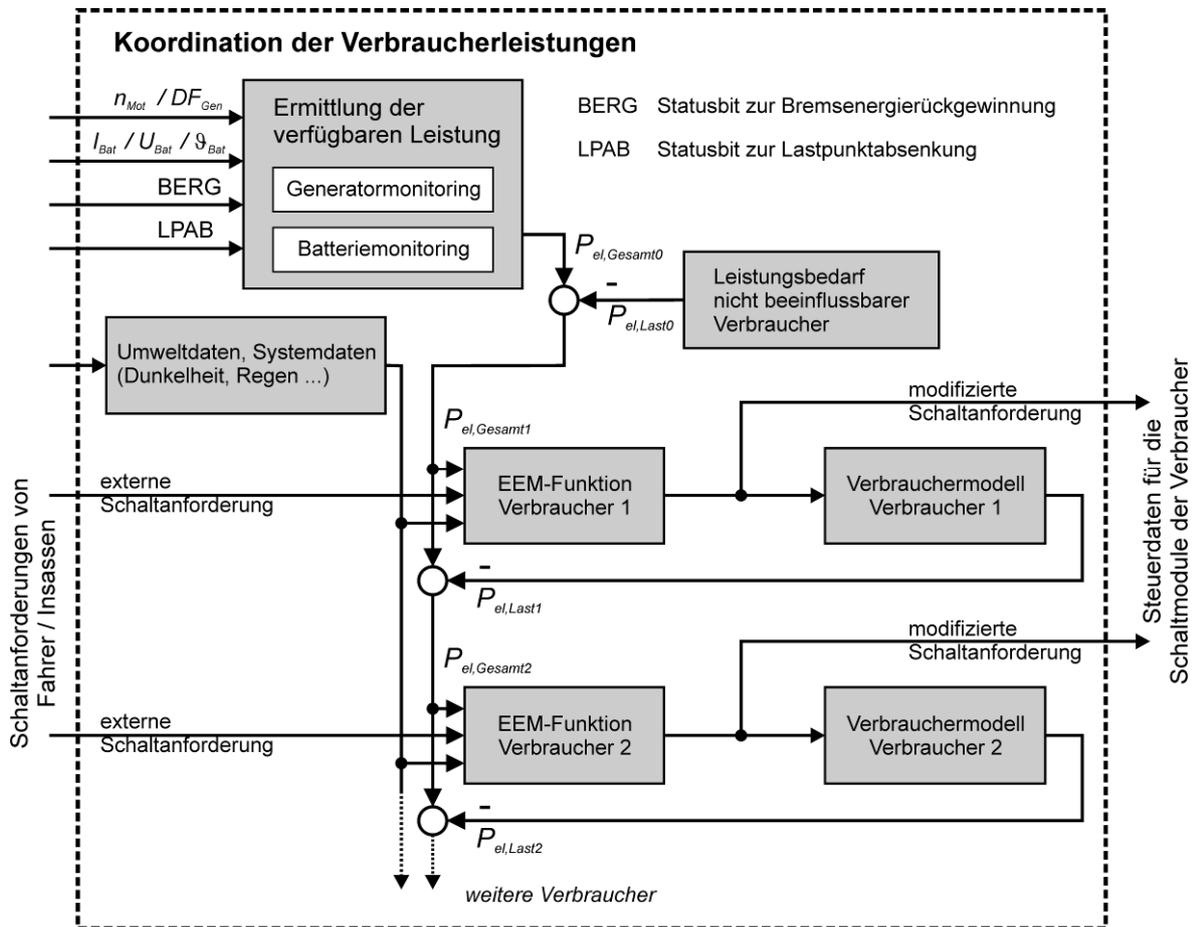


Bild 6.12: Struktur zur Koordination der Verbraucherleistungen im realisierten EEM

6.3.3 Erprobung und Bewertung

Zur Erprobung der EEM-Funktionen am HiL-Bordnetzprüfstand wurde der Versuchsaufbau nach Bild 6.7 mit den Bordnetzkomponenten des Versuchsfahrzeugs genutzt. Dafür wurde die Softwarestruktur im Echtzeitrechner um die EEM-Funktionen erweitert (Bild 6.13). Die Vorgaben der Drehzahl- und Lastanforderungsprofile erfolgen in einem Fahrermodell. Vom EEM werden die Schaltanforderungen der Verbraucher modifiziert und aus den Systemdaten des Energiebordnetzes die Sollwerte für die Generatorspannung, den LRC-Parameter und die Leerlaufdrehzahl bestimmt. Die Schnittstellen zur Prüfstands-Hardware sind in den beiden Funktionsblöcken „Elektrisches Energiebordnetz“ und „Antriebsstrang“ realisiert.

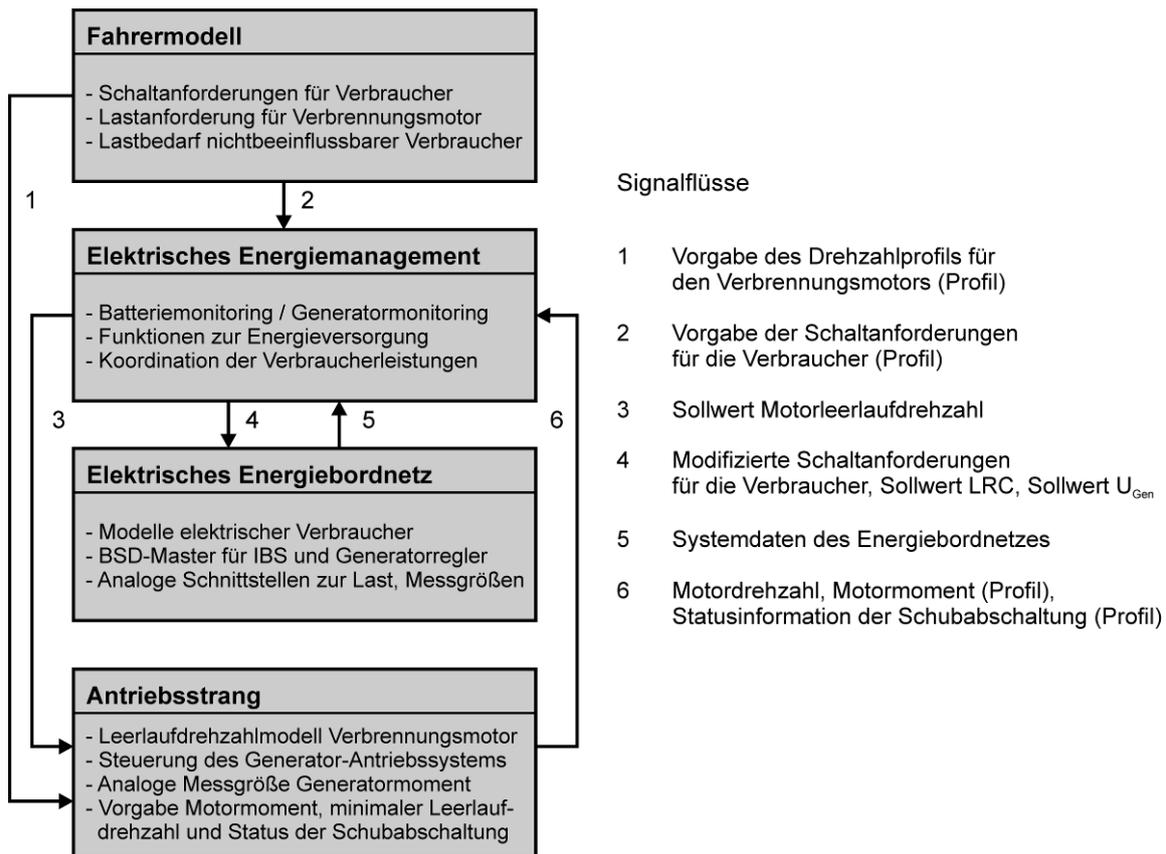


Bild 6.13: Struktur und Signalflüsse des Gesamtmodells in Matlab/Simulink

Die EEM-Funktionen wurden am HiL-Bordnetzprüfstand einzeln getestet. Um anschließend den gesamten Funktionsumfang des realisierten EEM zu bewerten, wurden Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Anforderungsprofilen durchgeführt [Bis07]. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Versuchen mit dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) vorgestellt. Als Eingangsgrößen für dieses gesetzliche Fahrprofil [San97] konnten die Daten aus einer Rollenprüfstandsmessung mit dem Versuchsfahrzeug genutzt werden. Die Vorgabe der Schalteranforderungen für die ausgewählten Verbraucher während des Fahrzyklus ist in Bild 6.14 dargestellt. Die Anordnung der Verbraucher im Bild zeigt gleichzeitig ihre Priorität für die Leistungskoordination im Verbrauchermanagement. Um den Einfluss des EEM auf das Bordnetz und den Antriebsstrang zu bewerten, wurden die Messungen jeweils mit aktiviertem Energiemanagement und ohne durchgeführt. Da der Ladezustand der Batterie einen wesentlichen Einfluss auf viele EEM-Funktionen besitzt, wurde die Batterie vor der Messung auf zwei unterschiedliche Ladezustände konditioniert ($SOC_{Bat}(t_0) = 70\%$ und $SOC_{Bat}(t_0) = 95\%$). Zum Einsatz kam eine Bleibatterie mit einer Nennkapazität von $Q_{Bat} = 110$ Ah.

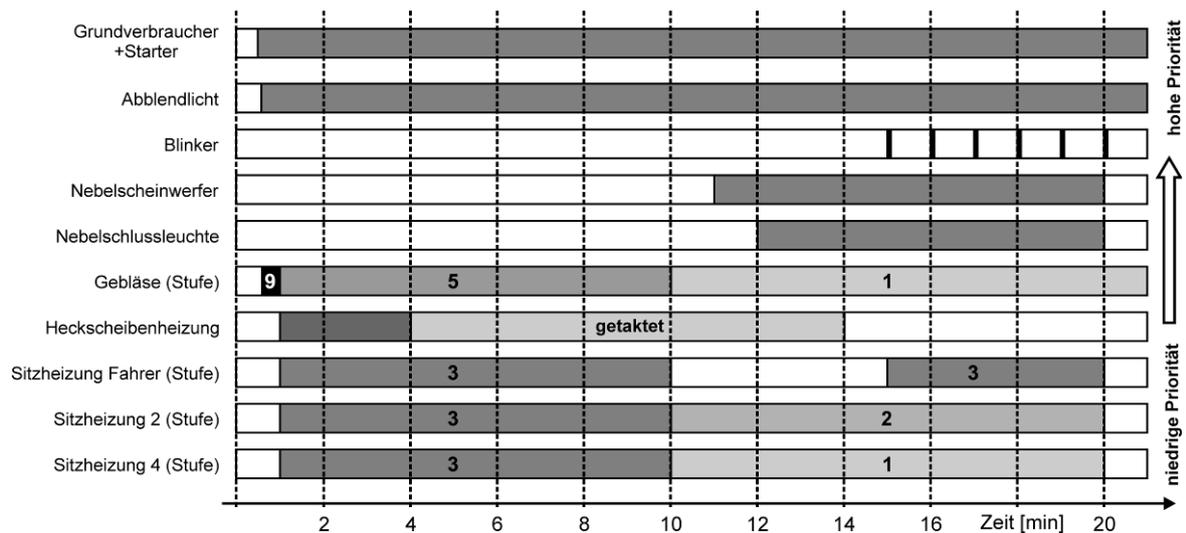


Bild 6.14: Vorgabe der Verbraucher-Schaltanforderungen während des NEFZ-Fahrprofils

Bild 6.15 zeigt den Einfluss des EEM aus den Fahrzyklus-Messungen, wenn die Batterie einen hohen Anfangsladezustand besitzt. Anhand der dargestellten Systemgrößen sind die Auswirkungen der einzelnen EEM-Funktionen zu erkennen:

- Auf Grund des hohen Leistungsbedarfs der Verbraucher nach dem Motorstart wird die Leerlaufdrehzahl erst später auf 550 min^{-1} abgesenkt. Dadurch kann das Entladen der Batterie in den Leerlaufphasen verhindert werden. Die Bordnetzspannung bricht nicht ein und die Auslastung des Generators ist geringer.
- Die Generatorspannung wird in den Schubphasen erhöht, um eine verstärkte Ladung der Batterie zu erreichen. Gleichzeitig ist die Bordnetzspannung im normalen Fahrbetrieb reduziert, um die Batterie nicht zu überladen.
- Unterschiede im Laststrom sind durch die getaktete Ansteuerung der Heckscheibenheizung und das wechselseitige Schalten der Sitzheizungen hervorgerufen.

Besitzt die Batterie zu Fahrtbeginn einen sehr niedrigen Ladezustand, wird zusätzlich die Leistung der Sitzheizungen als Komfortverbraucher bei ungenügender Leistungsreserve reduziert (siehe Bild 6.16). Weiterhin wird die Sollspannung des Generators angehoben, um eine verstärkte Ladung der Batterie zu erreichen. Zur Verbesserung der Bordnetzstabilität wird der LRC-Parameter vom EEM verringert. Damit ist der Generator in der Lage, auf Lastsprünge schnell zu reagieren. Wegen der extrem hohen Generatorauslastung im Motorleerlauf ist dieser Einfluss in der Messung jedoch nicht zu erkennen.

Um Aussagen über den Einfluss des EEM auf den Kraftstoffverbrauch zu erhalten, wurde näherungsweise das gemessene Generatormoment zum Antriebsmoment addiert und der absolute Kraftstoffverbrauch im stationären Verbrauchskennfeld des Verbrennungsmotors über den Fahrzyklus kumuliert [Bis07]. Dabei ist festzustellen, dass zwischen den Messungen mit und ohne EEM nur marginale Unterschiede auftreten. Das zeigt, dass trotz der aktiven Maßnahmen zur Erhöhung der Bordnetzstabilität nicht mehr Kraftstoff eingesetzt werden muss. Dies wird durch eine Effizienzsteigerung bei der Energiebereitstellung durch

Bremsenergierückgewinnung und Lastpunktabsenkung erreicht. Auf diese Weise kann der Kraftstoffmehrverbrauch, welcher z.B. durch das Anheben der Leerlaufdrehzahl im Motorleerlauf entsteht, kompensiert werden.

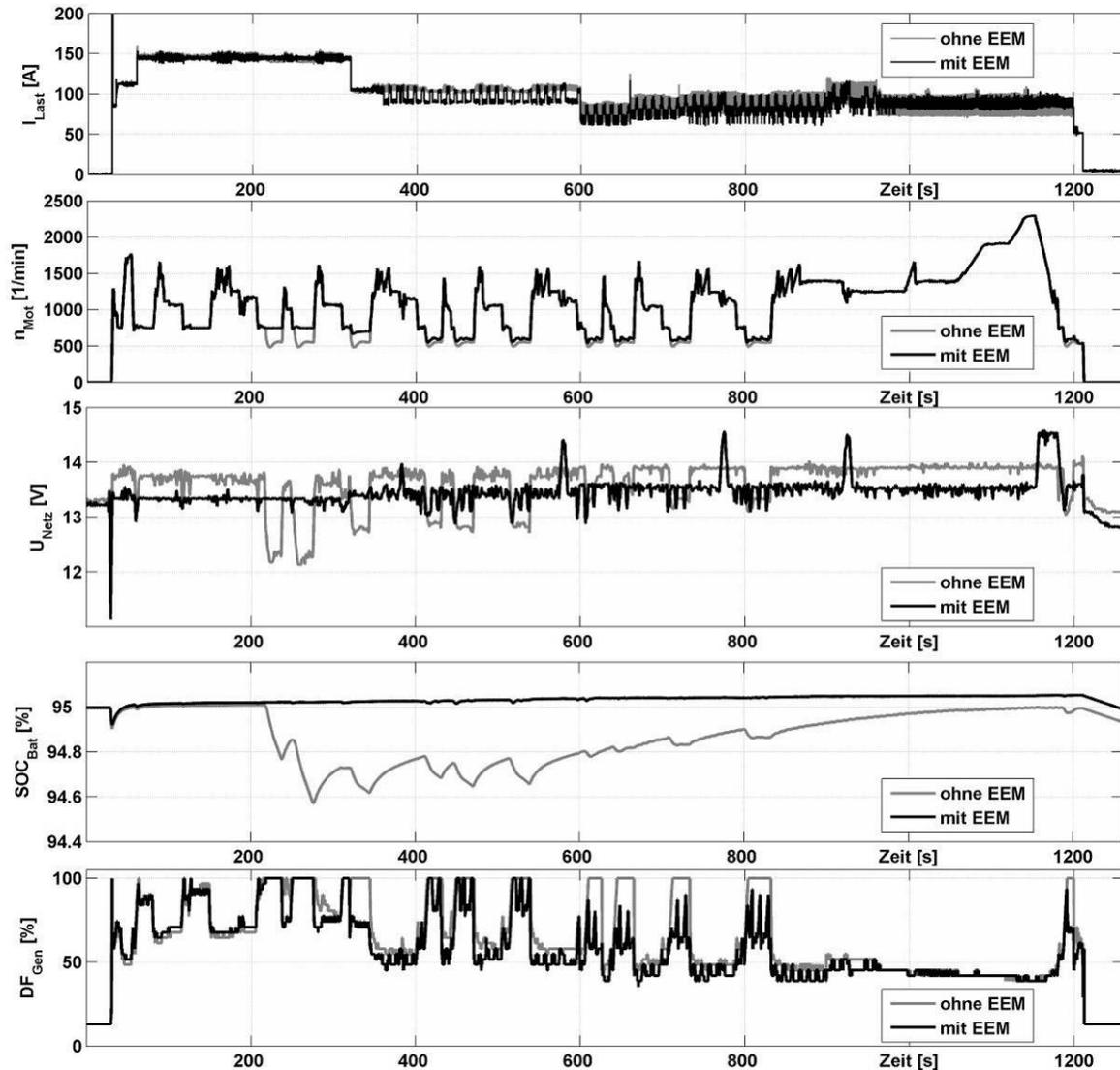


Bild 6.15: Einfluss des EEM auf Verbraucherstrom, Motordrehzahl, Bordnetzspannung, Batterieladezustand und Generatorauslastung bei dem gegebenen Anforderungsprofil und einem Anfangsladezustand der Batterie von $SOC_{Bat}(t_0) = 95\%$

Zusammenfassung

Die Messungen zeigen, dass die verschiedenen EEM-Funktionen die Zuverlässigkeit und Versorgungssicherheit im Bordnetz erhöhen. Gleichzeitig kann durch das EEM die Effizienz der Energiebereitstellung während des Fahrzyklus verbessert werden, so dass dadurch kein Kraftstoffmehrverbrauch entsteht. Das statische EEM ist auf eine möglichst hohe Funktionsverfügbarkeit aller Verbraucher ausgerichtet. Deshalb wird zunächst die Erzeugerleistung erhöht, bevor eine Funktionseinschränkung von Komfortverbrauchern erfolgt. Es ist offensichtlich, dass die vorgestellten EEM-Funktionen hier ein erhebliches

Verbesserungspotential aufweisen. So ist es sicher vorteilhaft, die statische Verbraucherkoordination durch Funktionen zu ersetzen, welche die Dynamik der Systemzustände berücksichtigen. Dies kann beispielsweise mit einer dynamischen Gestaltung der Nachfragefunktionen aus Abschnitt 5.3.1 durchgeführt werden, was in weiterführenden Arbeiten überprüft werden sollte.

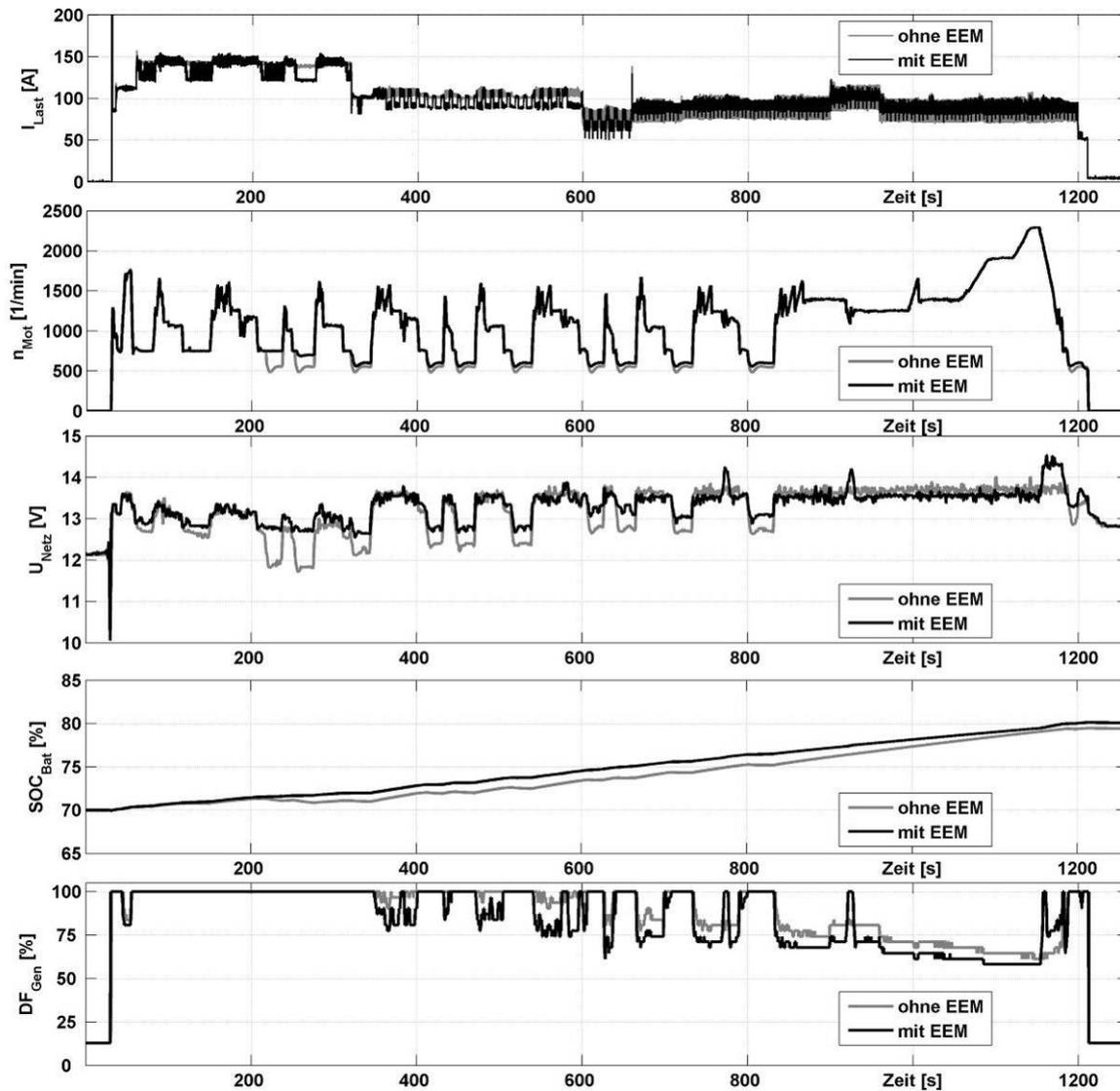


Bild 6.16: Einfluss des EEM auf Verbraucherstrom, Motordrehzahl, Bordnetzspannung, Batterieladezustand und Generatorauslastung bei dem gegebenen Anforderungsprofil und einem Anfangsladezustand der Batterie von $SOC_{Bat}(t_0) = 70 \%$

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die elektrische Energieform gewinnt im Kraftfahrzeug wegen ihrer Nutzungsvielfalt und sehr guten Steuerbarkeit für die Realisierung neuartiger Funktionen zunehmend an Bedeutung. Voraussetzung für ihren Einsatz ist eine zuverlässige und effiziente Bereitstellung durch das Kfz-Energiebordnetz. Diese Arbeit befasst sich mit Strategien, welche diese beiden Entwurfsziele der Zuverlässigkeit und der Effizienz im Rahmen eines elektrischen Energiemanagements (EEM) verfolgen.

Zu Beginn der Arbeit sind die Eigenschaften der Energiebordnetzarchitektur und die Anforderungen an die Energieversorgung näher charakterisiert worden. Dabei wurde herausgestellt, dass die geforderte Versorgungssicherheit wegen der Merkmalsausprägung des Energiebordnetzes als lokales Energiesystem nur mit einem aktiven EEM zu erreichen ist. Mit dieser Arbeit wurde eine systematische Übersicht der einzelnen Strategien innerhalb eines EEM geschaffen, welche die Versorgungssicherheit im Energiesystem erhöhen können. Dabei wurde sich an den Energieflüssen bzw. Wirkungsketten im Energiesystem orientiert. Ein Schwerpunkt der Betrachtung stellte die sichere Beherrschung von Lastwechseln im Bordnetz dar. Mit Messungen an einem Bordnetzprüfstand konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften des Energiespeichers als Leistungspuffer einen entscheidenden Einfluss auf die Bordnetzstabilität besitzen. Die Frage nach geeigneten Speichertechnologien und deren Diagnose bzw. Monitoring wird deshalb eine Schlüsselrolle für die Einführung neuer elektrischer Funktionen im Kraftfahrzeug haben. Aus den Messungen wurde deutlich, dass der Einsatz eines SuperCap-Moduls als zusätzlicher Energiespeicher im Kfz-Bordnetz eine interessante Variante darstellt, um dynamischen Leistungsanforderungen zukünftiger Verbraucher gerecht zu werden. Weiterhin wurde die Idee aufgezeigt, wie mit dem EEM durch eine Berechnung von Vorsteuergrößen für die Leerlaufdrehzahlregelung des Verbrennungsmotors eine Möglichkeit gegeben ist, dessen Leerlaufdrehzahlverhalten weiter zu verbessern. Dies ist in fortführenden Arbeiten durch die Applikation in einer Motorsteuerung nachzuweisen.

Um die Energieeffizienz im Fahrzeug zu verbessern, sind sowohl Maßnahmen zur effizienten Energiebereitstellung als auch eine effiziente Energienutzung durch Fahrzeugfunktionen notwendig. Da aus Gründen der Sicherheit und des Komforts diesbezüglich kaum Eingriffe des EEM bei Fahrzeugfunktionen zugelassen werden können, wurde in dieser Arbeit der Fokus auf Strategien des EEM zur Steigerung der Effizienz bei der Energieversorgung gelegt. Für Aussagen hinsichtlich einer effizienten Erzeugung elektrischer Energie erfolgte eine detaillierte Untersuchung der Energiewandlungskette von Verbrennungsmotor und Generator. Dabei sind für beide Energiewandler zunächst die arbeitspunktabhängigen Einflüsse auf den Wirkungsgrad aufgezeigt worden. Aus den stationären Kennfeldern wurden mit Hilfe der Willans-Kennlinien und der Definition von Delta-Wirkungsgraden

jeweils Aussagen für eine Lastpunktverschiebung getroffen. Die Betrachtung des Gesamt-erzeugungssystems ergab, dass der Wirkungsgrad zur elektrischen Energieerzeugung in Abhängigkeit des Lastpunktes in einem weiten Bereich um ca. 20 % schwankt. Die Variation in den häufigen Betriebsbereichen niedriger bis mittlerer Drehzahlen und bei mittleren Lastmomenten des Verbrennungsmotors sowie mittleren elektrischen Generatorleistungen fällt jedoch mit ca. 4 % relativ gering aus. Nur im Leerlaufdrehzahlbereich werden deutlich geringere Wirkungsgrade erreicht. Niedrige Gesamtwirkungsgrade treten ebenfalls im hohen Drehzahlbereich und bei hohen Lastmomenten des Verbrennungsmotors auf. Da in gesetzlichen Fahrzyklen bei den meisten Fahrzeugen keine hohen Drehzahlen und Lastmomente notwendig sind, bestehen nur sehr geringe Einsparpotentiale durch Lastpunktverschiebung während der Leerlaufanteile. Die Untersuchung zeigte jedoch, dass im praxisrelevanten Fahrbetrieb der Bereich hoher Drehzahlen und Lastmomente beim Anfahren bzw. während einer Fahrzeugbeschleunigung für eine Lastpunktverschiebung interessant ist. Hier könnte zusätzlich die hohe Dynamik des Generators für ein „passives Boosten“ während des Beschleunigungsvorgangs, besonders im niedrigen Drehzahlbereich, ausgenutzt werden.

Anschließend wurde ein Verfahren zur Energieeinsatzoptimierung aus der elektrischen Energieversorgung auf die Problemstellung im Kraftfahrzeug übertragen. Die Herausforderungen einer Energieeinsatzoptimierung für dynamische Betriebsstrategien im Kfz wurden herausgearbeitet. In dieser Arbeit konnte für ein gegebenes zeitliches Leistungsanforderungsprofil die Betriebsstrategie zur Erzeugung elektrischer Energie optimiert werden. Dabei kam ein Optimierungsprogramm zum Einsatz, in welchem evolutionäre Algorithmen als Optimierungsverfahren eingesetzt sind [Hab04]. Die Ergebnisse der Optimierung zeigten, dass mit einer zeitlichen Entkopplung von Erzeugung und Nutzung elektrischer Energie Kraftstoff eingespart werden kann. Es konnte bestätigt werden, dass das größte Einsparpotential durch rekuperatives Bremsen gegeben ist. Die Unterschiede im Kraftstoffeinsatz in den anderen Betriebsbereichen des Verbrennungsmotors fielen relativ gering aus. Dies ist in dem geringen Einfluss des Generators auf das Lastmoment während des Fahrbetriebs begründet. Eine statistische Auswertung der Batterieleistung bestätigte jedoch die Ergebnisse der vorangestellten analytischen Betrachtungen: Die gewonnene Bremsenergie sollte bevorzugt im Vollastbetrieb und während des Motorleerlaufs eingesetzt werden.

Mit der Integration von EEM-Strategien in einen Bordnetzprüfstand konnte gezeigt werden, dass die Zuverlässigkeit der Energieversorgung verbessert wurde. Da mit der Bremsenergieerückgewinnung und Lastpunktverschiebung die Effizienz der Energiebereitstellung während des Fahrzyklus erhöht werden konnte, wurde nicht mehr Kraftstoff verbraucht. Gleichzeitig wurde deutlich, dass der Kompromiss zwischen Funktionsverfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Effizienz mit EEM-Funktionen beschrieben werden sollte, welche die Dynamik der Systemzustände berücksichtigen.

Für die Zustandsüberwachung und die Ansteuerung der Bordnetzkomponenten sind für das EEM Funktionsschnittstellen erforderlich. Der Vorteil einer einheitlichen Schnittstelle zu

einer zentralen Instanz liegt in der einfachen Portierung und Skalierung der EEM-Funktionen für verschiedene Bordnetzarchitekturen. Der Idee, diese Schnittstelle als virtuellen Warenpreis für Leistungspakete über das Angebot- und Nachfrageverhalten mit Hilfe von ökonomischen Modellen zu beschreiben, wurde in der Arbeit intensiv nachgegangen. Dafür wurden die theoretischen Grundlagen aus der Mikroökonomie zusammengetragen und auf die Problemstellungen des Energiemanagements übertragen. Es konnte gezeigt werden, dass durch die freien Gestaltungsmöglichkeiten der jeweiligen Preis-Leistungsfunktionen aus den Kosten- bzw. Nutzenfunktionen der einzelnen Bordnetzkomponenten die beiden Entwurfsziele nach hoher Effizienz und Zuverlässigkeit sehr gut beschrieben werden können. Der virtuelle Warenpreis dient dabei sowohl als Index relativer Knappheit der Ressource Energie als auch als Schlüssel zur Verteilung der Energie auf die verschiedenen Verbraucher. Der Vergleich zwischen dem zweiseitigen Marktmodell bzw. der Energiebörse und dem einseitigen Versteigerungsmodell ergab, dass beide das Potential für einen flexiblen und dynamischen Allokationsmechanismus innerhalb eines EEM aufweisen. Dabei besitzt das Versteigerungsmodell in seiner Grundfunktionalität die geringere Komplexität und ist für ein einfaches Verbrauchermanagement vorzuziehen. Das Marktmodell besitzt hingegen den Vorteil, dass Strategien zur effizienten Bereitstellung direkt mit dem virtuellen Angebotspreis verknüpft werden können. Als Kostenfunktionen der Erzeuger können dabei die zuvor vorgestellten Willans-Kennlinien Verwendung finden.

Aus den Analogien zur Mikroökonomie wurde deutlich, dass für den Entwurf von elektrischen Energiemanagement-Strategien zwei Gesichtspunkte eine entscheidende Rolle besitzen: der Nutzen von Verbraucherfunktionen mit ihrer Energiedienstleistung aus Sicht des Fahrzeugsystems und der Insassen sowie die Kosten der Erzeuger und Speicher zur Bereitstellung der Endenergie. Allgemein gilt es, sowohl Kosten als auch den Nutzen in einer gemeinsamen Bewertungsskala zu vereinen. Dieser Problemstellung sollte in fortführenden Arbeiten nachgegangen werden. Ebenfalls bietet die Umsetzung und Erprobung der entwickelten Funktionsstrukturen in Simulationen und im realen Energiesystem ein großes Potential für zukünftige Forschungsaufgaben.

Die Integration eines EEM ist beim Entwurf zukünftiger Fahrzeugfunktionen zu berücksichtigen. Da häufig Verknüpfungen von Funktionen zu mehreren Bordnetzkomponenten existieren, ist eine Funktionsorientierung der EEM-Strategien vorteilhaft. Eine interessante Perspektive ergibt sich in der Verbindung mit einer funktionsorientierten Diagnose, wie sie in [Ung07] vorgestellt wird. Durch eine Erweiterung dieses Diagnoseansatzes um energetische Anforderungsprofile könnten zum einen EEM-Funktionen beschrieben und zum anderen die energetischen Eigenschaften in Diagnosefunktionen ausgewertet werden.

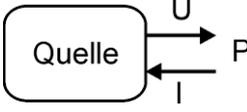
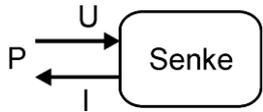
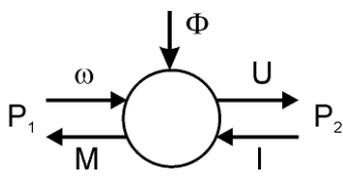
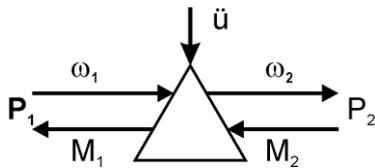
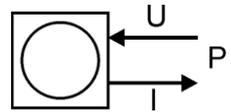
Mit dieser Arbeit wurde versucht, einen Überblick über die Gesamthematik des Energiemanagements zu geben, ohne sich dabei auf spezifische Bordnetzarchitekturen zu fokussieren. Damit ist beabsichtigt, die Anwendung auf andere Energieformen bzw. Übertragung auf andere lokale Energiesysteme anzuregen.

A Anhang

A.1	Symbole der Leistungsflussdiagramme nach Bouscayrol	115
A.2	Kennlinien des 14 V Compact-Klauenpolgenerators	116
A.3	Wirkungsgrade zur Erzeugung elektrischer Energie	118
A.4	Linearisierung der Willans-Kennlinie	120
A.5	Angaben zur Optimierung mit genetischen Algorithmen	121
A5.1	Ablauf des evolutionären Optimierungsalgorithmus.....	121
A5.2	Durchführung der Optimierung.....	123
A5.3	Ergebnisse der Optimierung.....	124
A.6	Anhang zur Anwendung ökonomischer Modelle	130
A6.1	Marktformenschema.....	130
A6.2	Energiespeicher als unabhängige Händler am Energiemarkt.....	130
A6.3	Standardauktionsformen.....	132
A.7	Kenndaten und Modelle des Bordnetzprüfstands	134
A7.1	Kenndaten wichtiger Prüfstandskomponenten.....	134
A7.2	Verbrauchermodelle.....	136
A7.3	Vergleichsmessung zum Leerlaufdrehzahlmodell.....	138
A.8	Messergebnisse zu dynamischen Lastwechseln	139

A.1 Symbole der Leistungsflussdiagramme nach Bouscayrol

Tabelle A1.1: verwendete Symbole für Leistungsflussdiagramme nach Bouscayrol
(Auszug aus [Büc04])

Bezeichnung	Symbol	Größen
Energiequelle		U Potentialgröße I Flussgröße P abgegebene Leistung $P = U \cdot I$
Energiesenke		U Potentialgröße I Flussgröße P aufgenommene Leistung $P = U \cdot I$
Energiewandler (zwei Energieformen)		ω, U Potentialgrößen M, I Flussgrößen Φ Einflussgröße(n) P Leistungen $P_1 = \omega \cdot M, P_2 = U \cdot I$
Energiewandler (eine Energieform)		ω_1, ω_2 Potentialgrößen M_1, M_2 Flussgrößen \ddot{u} Einflussgröße(n) P Leistungen $P_1 = \omega_1 \cdot M_1, P_2 = \omega_2 \cdot M_2$
Energiespeicher (verlustfrei)		U Potentialgröße I Flussgröße P aufgenommene bzw. abgegebene Leistung $P = U \cdot I$
Verlustmodell		U Potentialgröße I Flussgröße P aufgenommene Leistung P_V Verlustleistung $P = P_V = U \cdot I$

A.2 Kennlinien des 14 V Compact-Klauenpolgenerators

Bei dem untersuchten Generator handelt es sich um einen Compact-Generator TG17 der Firma VALEO mit 14 V Nennspannung und 180 A Nennstrom. Er besitzt 8 Polpaare und zwei parallel geschaltete Ständerwicklungen, welche jeweils im Dreieck verkettet sind. Beide Ständerwicklungen speisen jeweils eine 6-Puls-Gleichrichtbrücke mit Leistungszeenerdioden. Der Generator besitzt einen Multifunktionsregler mit BSD-Schnittstelle.

Die folgenden Kennlinien stammen aus Messungen am HiL-Bordnetzprüfstand unter Vorgabe stationärer Arbeitspunkte für Drehzahl und Laststrom. Die Sollspannung wurde mit 14,3 V fest vorgegeben. Die Belastung erfolgte mit Hilfe einer elektronischen Last. Anstelle der Bordnetzatterie diente ein Elektrolytkondensator zur Stabilisierung der Ausgangsspannung. Um den Einfluss der Temperatur gering zu halten, wurde der Generator nach der stationären Belastung elektrisch entregt. Mit Hilfe seiner Eigenkühlung konnte dadurch eine annähernd konstante Ständertemperatur von 50 °C gewährleistet werden. Da das Drehmoment und die Drehzahl direkt an der Riemenscheibe des Generators bestimmt wurden, haben die Verluste im Riemetrieb keinen Einfluss auf die Messwerte [Sal07].

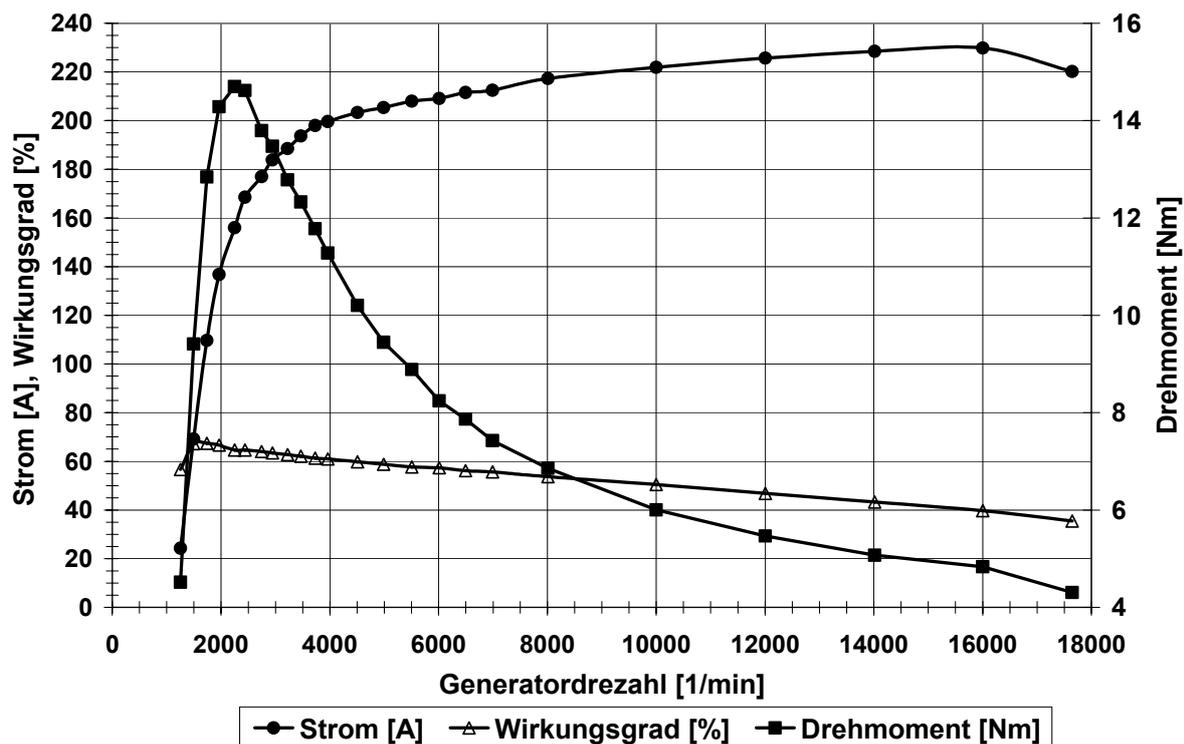


Bild A2.1: Vollastkennlinien VALEO TG17 ($U_{\text{Gen,soll}} = 14,3\text{V}$, ϑ_{Gen} ca. 50°C)

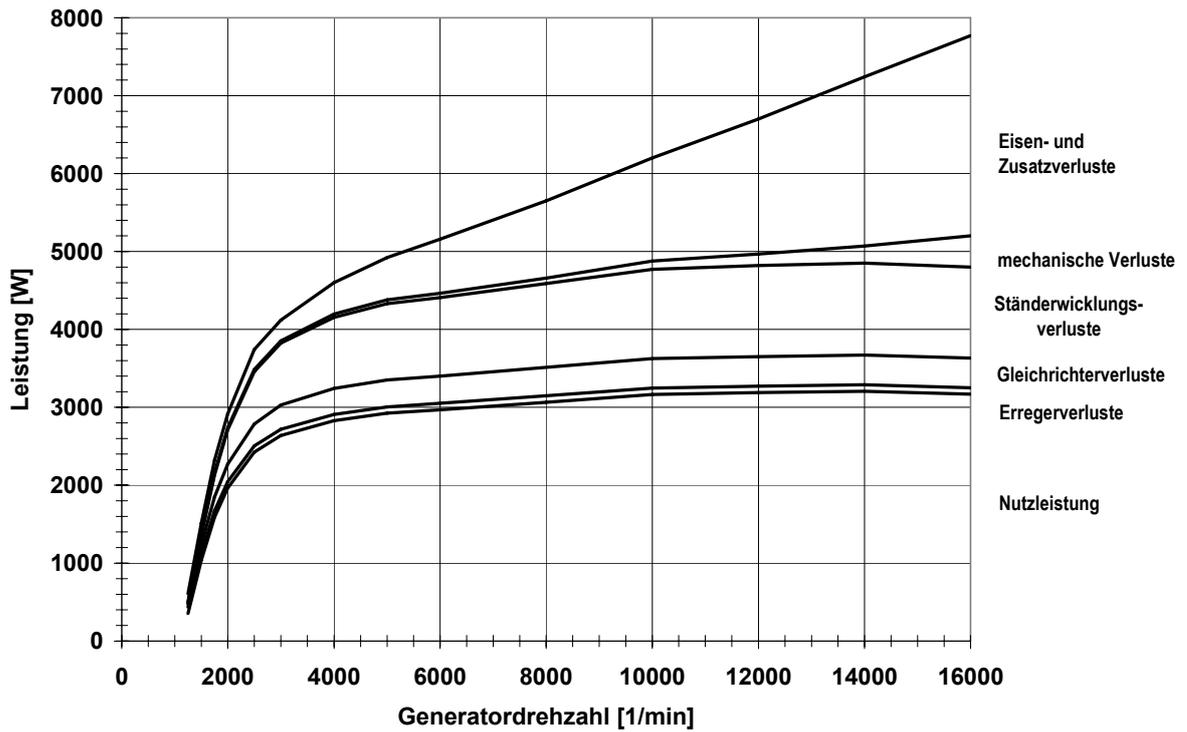


Bild A2.2: Drehzahlabhängige Aufteilung der Verluste

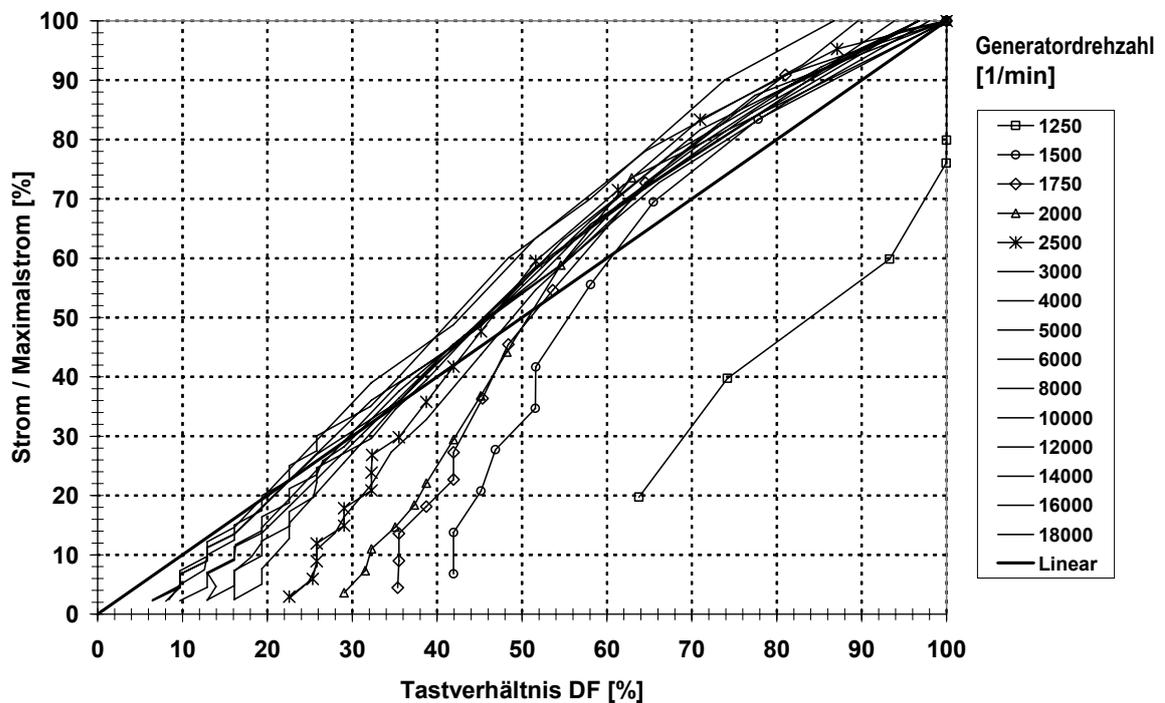


Bild A2.3: Abhängigkeit des Teillaststroms vom Tastverhältnis DF
(Schwankungen ergeben sich u. a. durch die grobe Diskretisierung von DF)

A.3 Wirkungsgrade zur Erzeugung elektrischer Energie

In folgender Tabelle wird der Gesamtwirkungsgrad zur Erzeugung elektrischer Energie in Abhängigkeit von Motordrehzahl, relativer Motorbelastung und Generatorleistung angegeben. Die Wirkungsgrade sind anhand der Kennfelder aus Bild 4.8 und Bild 4.10 gemittelt.

Tabelle A3.1: Wirkungsgrade zur Erzeugung elektrischer Energie

Drehzahl n_{VM}	Verbrennungsmotor		Generator		η_{ges}
	$M_{VM} / M_{VM,max}$	$\Delta\eta$	$P_{el,Gen}$	η_{Gen}	
Leerlauf- drehzahlbereich < 800 min ⁻¹	< 20 %	32 %	<500 W	68 %	22 %
			500-1000 W	74 %	24 %
			1000-2000 W	70 %	22 %
			>2000 W	65 %	21 %
	20-40 %	30 %	<500 W	68 %	20 %
			500-1000 W	74 %	22 %
			1000-2000 W	70 %	21 %
			>2000 W	65%	20 %
	40-60%	23 %	<500 W	68 %	16 %
			500-1000 W	74 %	17 %
			1000-2000 W	70 %	16 %
			>2000 W	65 %	15 %
niedriger Drehzahlbereich 800-2000 min ⁻¹	< 20 %	43 %	<500 W	82 %	35 %
			500-1000 W	80 %	34 %
			1000-2000 W	72 %	31 %
			>2000 W	64 %	28 %
	20-40 %	39 %	<500 W	82 %	32 %
			500-1000 W	80 %	31 %
			1000-2000 W	72 %	28 %
			>2000 W	64 %	25 %
	40-60 %	34 %	<500 W	82 %	28 %
			500-1000 W	80 %	27 %
			1000-2000 W	72 %	24 %
			>2000 W	64 %	22 %
	70-100 %	27 %	<500 W	82 %	22 %
			500-1000 W	80 %	22 %
			1000-2000 W	72 %	19 %
			>2000 W	64 %	17 %

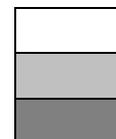
A.3 Wirkungsgrade zur Erzeugung elektrischer Energie

Drehzahl n_{VM}	Verbrennungsmotor		Generator		η_{ges}
	$M_{VM}/M_{VM,max}$	$\Delta\eta$	$P_{el,Gen}$	η_{Gen}	
mittlerer Drehzahlbereich 2000-4000 min ⁻¹	< 20 %	44 %	<500 W	75 %	33 %
			500-1000 W	74 %	33 %
			1000-2000 W	66 %	29 %
			>2000 W	58 %	26 %
	20-40 %	40 %	<500 W	75 %	30 %
			500-1000 W	74 %	30 %
			1000-2000 W	66 %	26 %
			>2000 W	58 %	23 %
	40-60 %	38 %	<500 W	75 %	29 %
			500-1000 W	74 %	28 %
			1000-2000 W	66 %	25 %
			>2000 W	58 %	22 %
	60-100 %	30 %	<500 W	75 %	23 %
			500-1000 W	74 %	22 %
			1000-2000 W	66 %	20 %
			>2000 W	58 %	17 %
hoher Drehzahlbereich >4000 min ⁻¹	< 20 %	42 %	<500 W	45 %	19 %
			500-1000 W	59 %	25 %
			1000-2000 W	55 %	23 %
			>2000 W	47 %	20 %
	20-40 %	37 %	<500 W	45 %	17 %
			500-1000 W	59 %	22 %
			1000-2000 W	55 %	20 %
			>2000 W	47 %	17 %
	40-60 %	33 %	<500 W	45 %	15 %
			500-1000 W	59 %	19 %
			1000-2000 W	55 %	18 %
			>2000 W	47 %	16 %
	60-100 %	28 %	<500 W	45 %	13 %
			500-1000 W	59%	17 %
			1000-2000 W	55 %	15 %
			>2000 W	47 %	13 %

schlechter Gesamtwirkungsgrad (< 20 %):

mittlerer Gesamtwirkungsgrad:

guter Gesamtwirkungsgrad (> 25 %):



A.4 Linearisierung der Willans-Kennlinie

Mit der Willans-Gerade wird der Zusammenhang zwischen Nutzleistung P_{Nutz} und zugeführter Leistung P_{zu} mit folgender Geradengleichung beschrieben [Riz99] (Bild A4.1):

$$P_{Nutz} = e \cdot P_{zu} - P_V. \quad (\text{A.1})$$

Dabei sind mit dem Anstieg e der maximale (innere) Wirkungsgrad und mit P_V die (externen) Verluste des Energiewandlers beschrieben. Diese Herangehensweise wird häufig zur vereinfachten Modellierung in Simulationen oder Optimierungsverfahren verwendet. Die beiden Parameter der Geradengleichung werden dabei zumeist abhängig vom Betriebspunkt (der Potentialgröße Drehzahl, Spannung, ...) vorgegeben. Der Wirkungsgrad η ergibt sich aus

$$\eta = \frac{P_{Nutz}}{P_{zu}} = \frac{e \cdot P_{Nutz}}{P_{Nutz} + P_V}. \quad (\text{A.2})$$

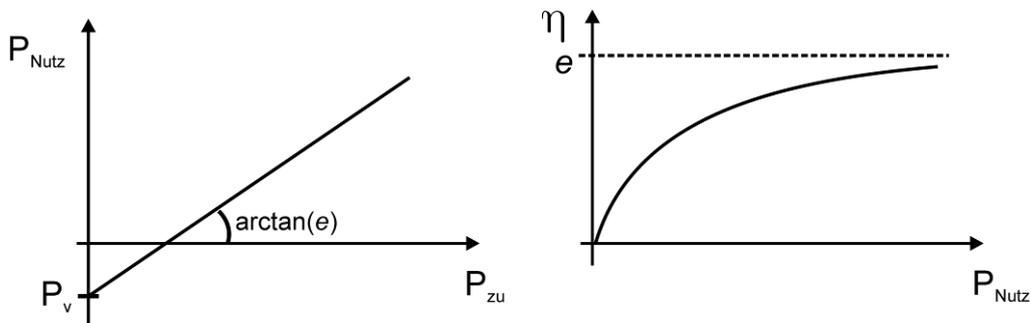


Bild A4.1: Willans-Gerade und Wirkungsgradverlauf

A.5 Angaben zur Optimierung mit genetischen Algorithmen

A5.1 Ablauf des evolutionären Optimierungsalgorithmus

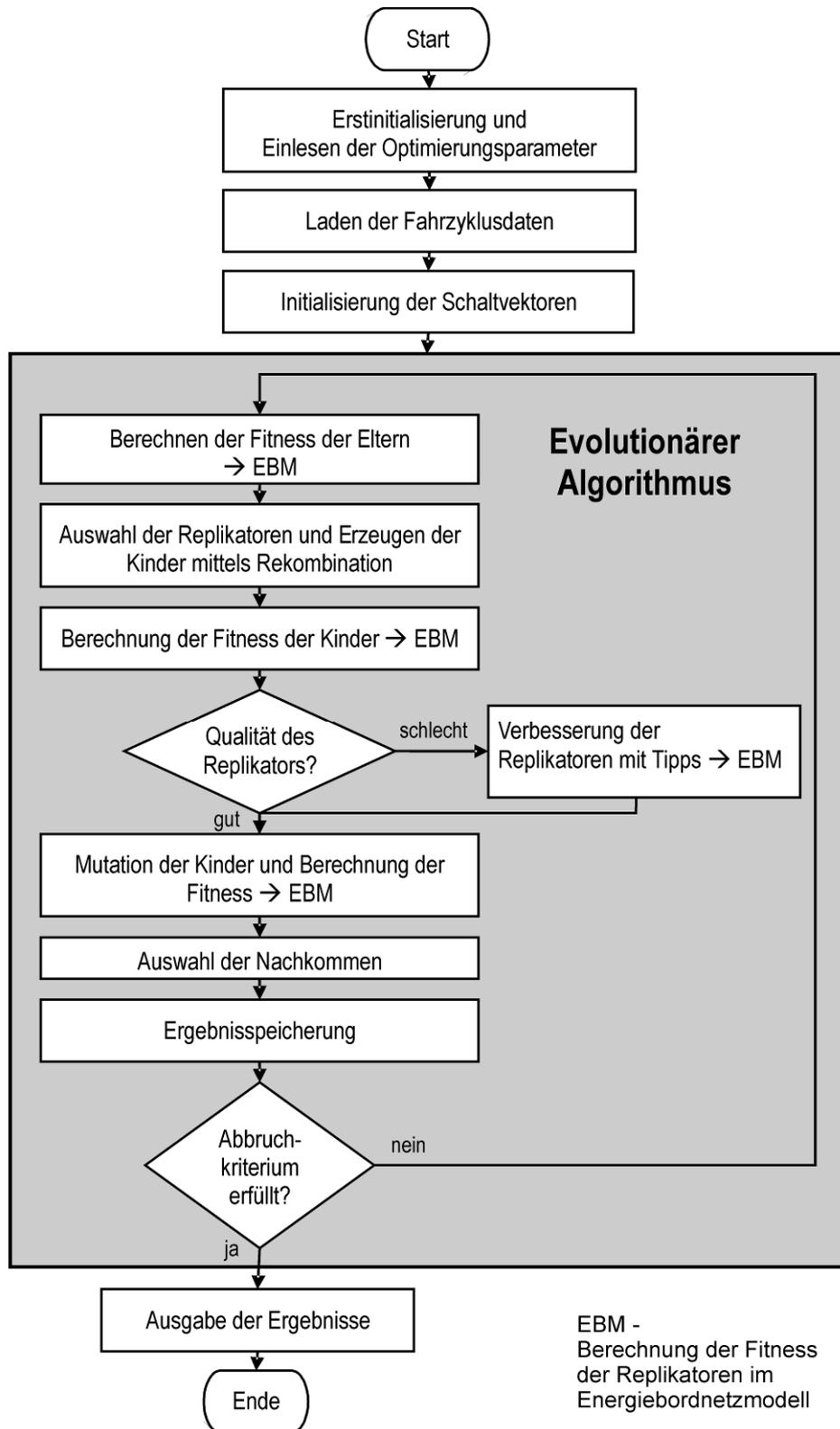


Bild A5.1: Programmablauf des genetischen Optimierungsalgorithmus [Hab04]

Initialisierung

Nach der Initialisierung der Optimierungsparameter, der Strukturvariablen, des Energiesystems und Laden der Leistungsanforderungsprofils (Fahrzyklusdaten) wird die Startpopulation erzeugt. Deren Initialisierung kann entweder rein zufällig oder durch Nutzung von Expertenwissen intelligent erfolgen. Vorteil der intelligenten Initialisierung ist die schnellere Konvergenz der Replikatoren in ein Optimum. Wenn sich jedoch das globale Optimum außerhalb des Initialisierungsbereichs befindet, wird dieses nur schwer gefunden. Im Programm ist eine Kombination beider Varianten mit freier Wahl der Aufteilung zwischen zufälligen und intelligenten Replikatoren möglich.

Genetische Operationen

Ausgehend von einer Elternpopulation erfolgt eine *Rekombination* durch Mischen deren Erbinformationen zur Erzeugung neuer Individuen mit Crossover. Die *Partnerauswahl* (sexuelle Selektion) für die Rekombination erfolgt nach dem „Roulette-Wheel-Verfahren“: Die Wahrscheinlichkeit eines Replikators, ausgewählt zu werden, nimmt mit seinem Platz in der Rangliste (sortiert nach der Qualität bzw. Fitness) nach einer geometrischen Reihe ab. Die Abnahmegeschwindigkeit kann im Programm frei vorgegeben werden. Es werden zwei Crossover-Verfahren zu gleichen Teilen eingesetzt. So werden jeweils die einzelnen Schaltvektoren (Vektorcrossover) oder die gesamte Schaltmatrix (Matrixcrossover) geschnitten. Die Anzahl der Bruchstellen kann frei gewählt werden.

Die entstandenen Kinder-Replikatoren können anschließend repariert bzw. durch „Tipps“ verbessert werden, um z. B. eine unausgeglichene Leistungsbilanz zu verhindern. Dies beschleunigt die Konvergenzgeschwindigkeit des evolutionären Algorithmus deutlich. Anschließend werden einige Elemente der neuen Kinder-Replikatoren durch *Mutation* verändert. Im Programm kann die Mutationswahrscheinlichkeit und die Mutationsbreite (Standardabweichung) vorgegeben werden. Außerdem stehen verschiedene Verfahren zur Weitergabe der Mutationsparameter zur Verfügung. Sie können konstant gehalten, mit den Replikatoren vererbt oder je nach Erfolg angepasst und weitervererbt werden.

Im Anschluss an die Vervielfachung der Population durch das Erzeugen von Kindern erfolgt die natürliche Selektion bzw. *Aussonderung* von Replikatoren für eine neue Elterngeneration, damit die Populationsgröße langfristig konstant bleibt. Dabei gibt es zwei Varianten für die Auswahl der Replikatoren für den neuen Zyklus (nächste Generation):

- Die Auswahl erfolgt nur aus den neu erzeugten Replikatoren (Kindern)
- Die Auswahl erfolgt aus der gesamten Population (Eltern und Kindern)

Im Programm kann mit einem Parameter darüber bestimmt werden, welche Variante verwendet werden soll. Dabei besteht ein Teil der nächsten Generation aus den besten Replikatoren einer sortierten Rangliste ihrer jeweiligen Fitness, ein anderer Teil wird durch zufällige Auswahl bestimmt.

A5.2 Durchführung der Optimierung

Kenngrößen des Batteriemodells

Tabelle A5.1: Wichtige Kenngrößen des Batteriemodells [Win06]

Variable	Bedeutung	Wert
pmaxlad	maximale Ladeleistung der Batterie [W]	1500
pmaxentl	maximale Entladeleistung der Batterie [W]	1000
Eta	Wirkungsgrad (Entladung/Ladung)	0,9
C	nutzbare Kapazität [Ws]: entspricht 30 % der Nennkapazität einer 110 Ah 12V-Batterie	1425600
W(:,1)	Ladezustand zu Beginn des Optimierungszeitraumes [Ws]	712800
Wend	Ladezustand am Ende des Optimierungszeitraumes [Ws]	712800
Kb	Arbeitskosten [EURO/Ws]; Arbeitskosten werden nur auf die Entladung der Batterie berechnet	0,1 / 1000
lambda	Generatormodell: Wichtungsfaktor des Kraftstoffverbrauchs nach Gl. (4.14)	20

Verwendete Parameter des Optimierungsmoduls

Tabelle A5.2: Übersicht der verwendeten Parameter des Optimierungsmoduls [Win06]

Parameter	Bedeutung	Wert
pop	Anzahl der Replikatoren in der Population	1000
gen	Anzahl der Generationen (Zyklen) der Optimierung	variabel
ml	Anzahl der erzeugten Kinder je Replikator	10
mutw	Mutationswahrscheinlichkeit eines Elements	0,002
mutb	Mutationsbreite (Streuung der Verteilung der Mutationsgröße)	0,01
vmut	mutw und mutb bleiben für alle Replikatoren und alle Generationen konstant	1
w	Faktor für fitnessabhängige Wahrscheinlichkeit bei Auswahl	0,9999
cn	Anzahl der Bruchstellen für das Crossover	1
kausw	Auswahlverfahren der Replikatoren für neuen Zyklus: 50 % besteht aus den besten Kindern, 50 % wird aus den restlichen Kindern und Eltern zufällig gewählt	1,5

A5.3 Ergebnisse der Optimierung

Statistische Auswertung der Batterieleistung

Der Leistungsverlauf der Batterie wird in den einzelnen Betriebsbereichen statistisch ausgewertet. Es erfolgt eine Darstellung der Batterieleistung als relative Häufigkeitsverteilung der einzelnen Betriebsbereiche des Verbrennungsmotors. Die Leistungswerte sind dabei jeweils in einem Intervall von 100 W zusammengefasst.

Um die Aussagen zu den einzelnen Betriebsbereichen bezüglich des Schaltvorschlags besser auf ihre Qualität bewerten zu können, wird ein Gütewert aufgestellt. Neben dem arithmetischen Mittelwert wird auch der Median herangezogen. Wird eine Stichprobe der Größe nach sortiert, so entspricht der Median (Zentralwert) bei einer ungeraden Anzahl der Stichprobe dem mittleren Wert. Bei einer geraden Anzahl ist es der Mittelwert der beiden mittleren Werte. Im Gegensatz zum arithmetischen Mittelwert hat der Median den Vorteil, dass er robuster gegenüber Ausreißern ist. Als weiterer Vergleichswert wird der mittlere Anstieg des Ladezustandes der Batterie mit herangezogen. Daraus ergeben sich die Anforderungen an den Gütewert [Win06]:

- geringe Differenz zwischen arithmetischem Mittelwert und Median der Batterieleistung
- großer mittlerer Anstieg des Ladezustandes der Batterie

Bei einem hohen Gütewert hat der Schaltvorschlag des Optimierungsmoduls eine größere Aussagekraft bezüglich der Umsetzung in eine Betriebsstrategie. Er ist wie folgt definiert:

$$\text{Gütewert} := \frac{1}{|\bar{x} - x_{1/2}|} \cdot 10^5 + |\delta_{\text{SOC Bat}}|, \quad (\text{A.3})$$

	\bar{x}	arithmetischer Mittelwert
mit	$x_{1/2}$	Median
	$\delta_{\text{SOC Bat}}$	mittlerer Anstieg des Ladezustands der Batterie

Erster Optimierungsdurchlauf (mit zufälliger Initialisierung)

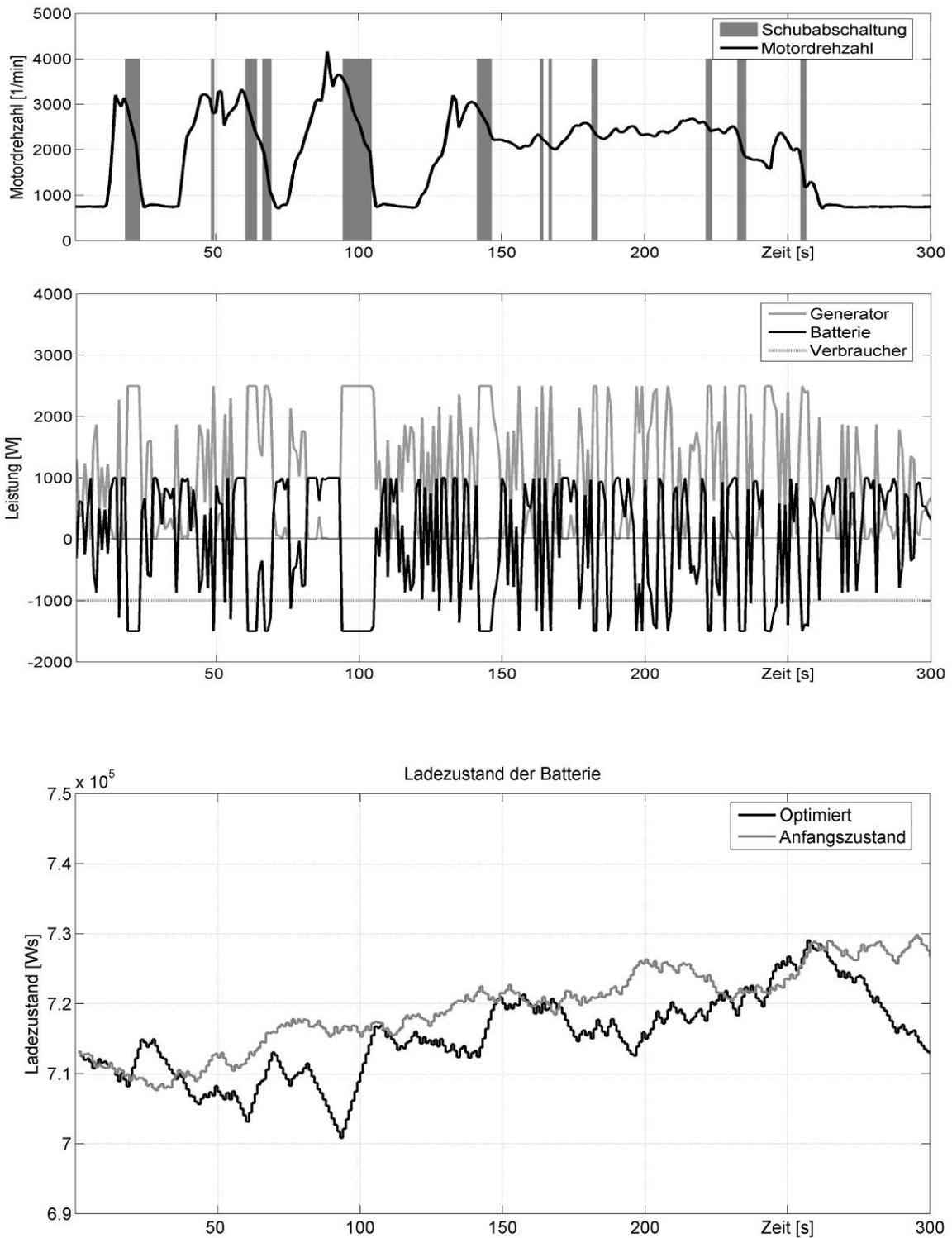


Bild A5.2: Ergebnis des ersten Optimierungsdurchlaufs mit zufälliger Initialisierung: Leistungsverlauf und Batterieladezustand nach dem Schaltvorschlag des besten Replikators

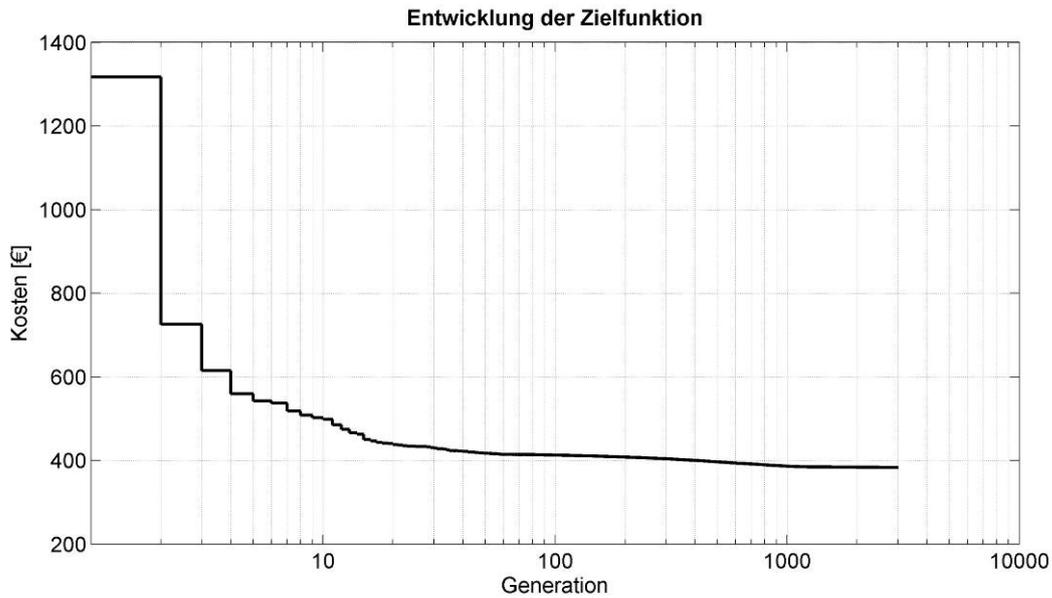


Bild A5.3: Entwicklung der Zielfunktion (Kosten)

Tabelle A5.3: Ergebnisse der Energieeinsatzoptimierung

Energieerzeugung Batterie	-5 500,37	Ws
Energieerzeugung Generator	305 500,37	Ws
Energieverbrauch Verbraucher	-300 000,00	Ws
Energiegewinn GESAMT	0,00	Ws
Kosten Energieerzeugung Batterie	13,02	€
Kosten Nebenbedingung Batterie	0,00	€
Kosten Energieerzeugung Generator	370,17	€
Kosten GESAMT	383,19	€
Kraftstoffverbrauch nur Generator (optimiert)	18,51	g
Kraftstoffverbrauch gesamt (optimiert)	371,87	g
Kraftstoffverbrauch (nicht optimiert)	377,31	g
relative Kraftstoffeinsparung	1,44	%
Rechenzeit pro Generation in Sekunden	20,99	s
Gesamtrechenzeit in Stunden	17,49	h

Tabelle A5.4: Auswertung der Batterieleistung mit statistischen Kenngrößen

Betriebsbereich Verbrennungsmotor	Bereich 1 Leerlauf	Bereich 2 Schubphase	Bereich 3 Teillast, langsam	Bereich 4, Teillast, schnell	Bereich 5 Volllast
Batterieleistung [W]					
arithm. Mittelwert	341,51	-1017,94	66,24	118,27	354,15
Median	597,29	-1500,00	489,54	576,16	1000,00
Ladezustand Batterie: mittlerer Anstieg [Ws/s]	-323,93	764,90	-43,68	-71,57	-305,63
Gütwert nach Gl. (A.3)	715	972	280	290	460

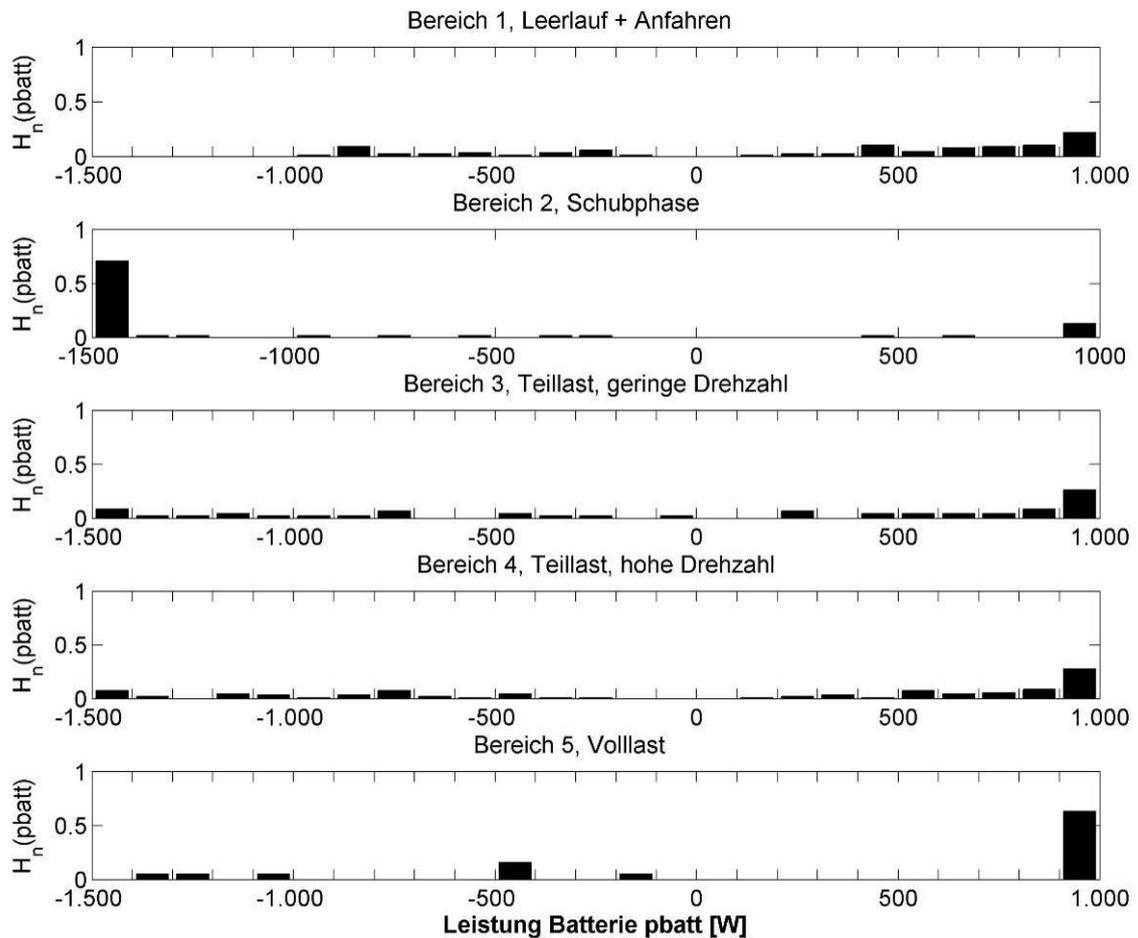


Bild A5.4: Relative Häufigkeitsverteilung der Batterieleistung in den einzelnen Betriebsbereichen des Verbrennungsmotors

Zweiter Optimierungsdurchlauf (mit intelligenter Initialisierung)

- Leistungsverlauf: siehe Bild 4.19.
- Entwicklung der Zielfunktion: siehe Bild 4.20.

Tabelle A5.5: Ergebnisse der Energieeinsatzoptimierung

Energieerzeugung Batterie	-5 587,96	Ws
Energieerzeugung Generator	305 587,96	Ws
Energieverbrauch Verbraucher	-300 000,00	Ws
Energiegewinn GESAMT	0,00	Ws
<hr/>		
Kosten Energieerzeugung Batterie	12,84	€
Kosten Nebenbedingung Batterie	0,00	€
Kosten Energieerzeugung Generator	352,38	€
Kosten GESAMT	365,23	€
<hr/>		
Kraftstoffverbrauch nur Generator (optimiert)	17,62	g
Kraftstoffverbrauch gesamt (optimiert)	370,98	g
Kraftstoffverbrauch (nicht optimiert)	377,31	g
relative Kraftstoffeinsparung	1,68	%
<hr/>		
Rechenzeit pro Generation in Sekunden	20,50	s
Gesamtrechenzeit in Stunden	62,63	h

Tabelle A5.6: Auswertung der Batterieleistung mit statistischen Kenngrößen (Ergebnis des zweiten Optimierungsdurchlaufs)

Betriebsbereich Verbrennungsmotor	Bereich 1 Leerlauf	Bereich 2 Schubphase	Bereich 3 Teillast, langsam	Bereich 4 Teillast, schnell	Bereich 5 Volllast
Batterieleistung [W]					
arithm. Mittelwert	609,94	-1228,35	-160,35	-10,40	907,89
Median (Zentralwert)	690,90	-1500,00	170,35	440,35	1000,00
Ladezustand Batterie: mittlerer Anstieg [Ws/s]	-550,52	997,80	8,64	99,02	-859,60
Gütwert nach Gl. (A.3)	1786	1366	311	321	1945

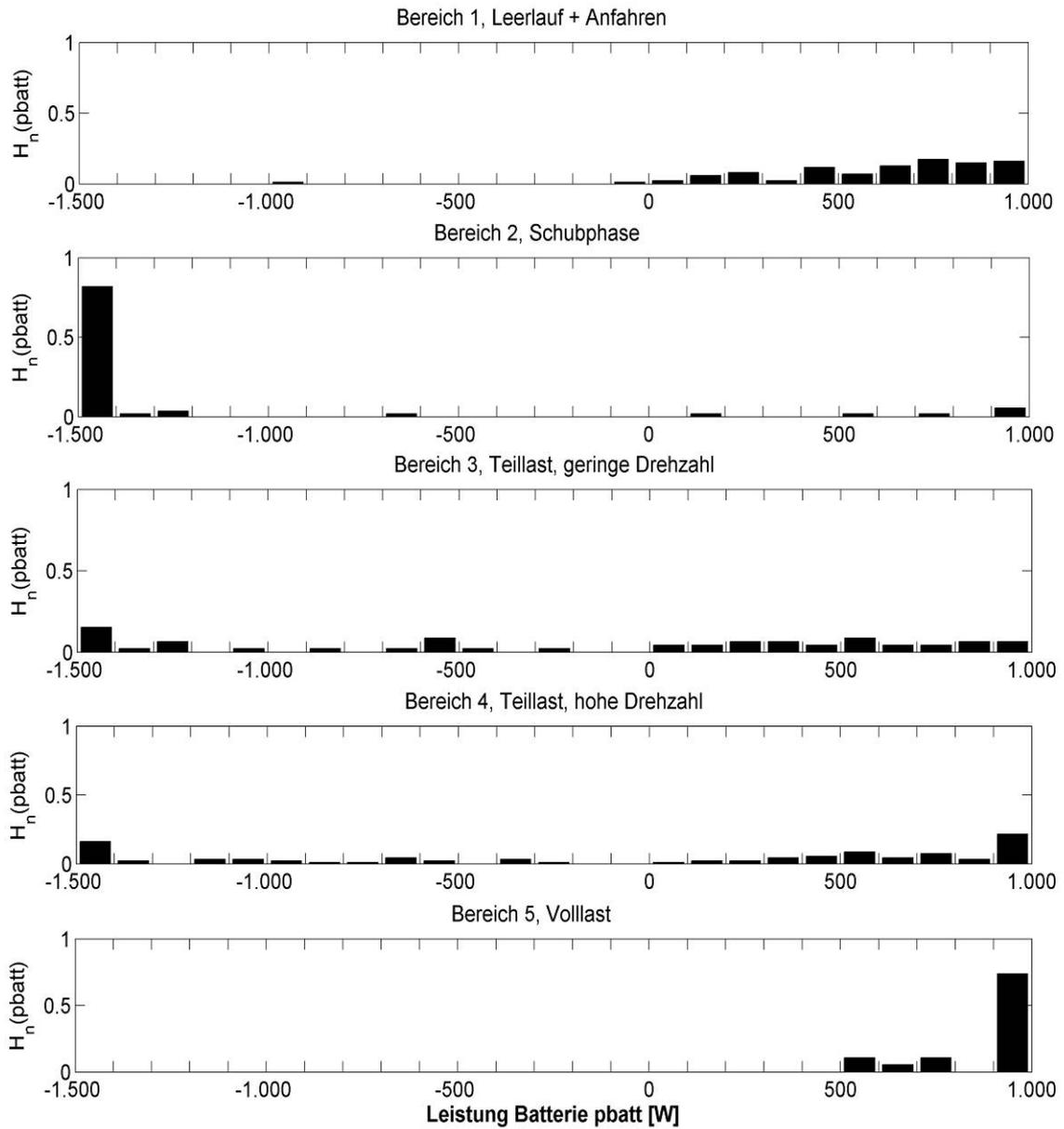


Bild A5.5: Relative Häufigkeitsverteilung der Batterieleistung in den einzelnen Betriebsbereichen des Verbrennungsmotors (zweiter Optimierungsdurchlauf)

A.6 Anhang zur Anwendung ökonomischer Modelle

A6.1 Marktformenschema

Entscheidend für die Abgrenzung der Marktformen sind die Anzahl von Anbietern und Nachfragern und deren relative Größe. In der Preistheorie wird davon ausgegangen, dass die Marktanteile auf der jeweiligen Marktseite von Anbietern und Nachfragern symmetrisch (ungefähr gleich groß) sind. Aus der Kombination beider Marktseiten mit jeweils drei Größenkategorien lassen sich die in Tabelle A6.1 genannten neun Marktformen bilden.

Die Marktstrukturen können anhand weiterer qualitativer Merkmale charakterisiert werden. Darunter zählen Zugangs- und Austrittsbeschränkungen sowie die Eigenschaft über die so genannte Vollkommenheit des Marktes. Damit ist ein Markt gemeint, bei dem einheitliche Güter unter der Maßgabe einer vollständigen Markttransparenz gehandelt werden. Zwischen den Teilnehmern existieren keine gegenseitigen Präferenzen sowie keine zeitlichen oder räumlichen Differenzierungen [WiN04], [SMS07].

Tabelle A6.1: Marktformenschema [WiN04]

		Nachfrager		
		ein großer	wenige mittlere	viele kleine
Anbieter	ein großer	bilaterales Monopol	beschränktes Monopol	Monopol
	wenige mittlere	beschränktes Monopsom	bilaterales Oligopol	Oligopol
	viele kleine	Monopsom	Oligopson	Polypol

A6.2 Energiespeicher als unabhängige Händler am Energiemarkt

Ermöglicht die Bordnetztopologie eine unabhängige Steuerung des Leistungsflusses vom Energiespeicher z. B. mit einem DC/DC-Wandler, dann kann er als unabhängiger Händler am Markt agieren. Das Ziel des Händlers ist eine Gewinnmaximierung in der Hinsicht, zu einem Zeitpunkt t_1 möglichst preiswert die Leistungsmenge x zu kaufen, um zu einem späteren Zeitpunkt t_2 die Menge y gewinnbringend zu verkaufen:

$$G_{\max} = \max \left\{ G = p(t_2) \cdot y - p(t_1) \cdot x - K \quad \left| \int x dt \geq \int y dt \right. \right\}. \quad (\text{A.4})$$

Bei der Erstellung der Nachfrage- und Angebotsfunktionen müssen die zeitlichen Aspekte der Spekulation des Händlers berücksichtigt werden. Im Folgenden wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie neben aktuellen Systemzuständen die zeitlichen Speichergrößen integriert werden können. Die Leistungsnachfrage zum Laden ist neben dem Leistungsaufnahmevermögen des Energiespeichers stark vom aktuellen Marktpreis abhängig. Um einen möglichst hohen Gewinn zu erzielen, wird der Händler bemüht sein, vor allem in Zeiten eines geringen Marktpreises große Energiemengen zu beziehen. Bei niedrigem Marktpreis

und geringem Ladezustand (SOC) wird deshalb seine Leistungsnachfrage steigen. Bei der Erstellung der Angebotsfunktion muss das Leistungsvermögen (SOF) berücksichtigt werden (vgl. Bild 5.6). Hinzu kommen jedoch der Einfluss des aktuellen Einkaufspreises sowie die Kosten K für Speicherverluste und Alterung. Bild A6.1 zeigt einen möglichen Verlauf der Funktionen.

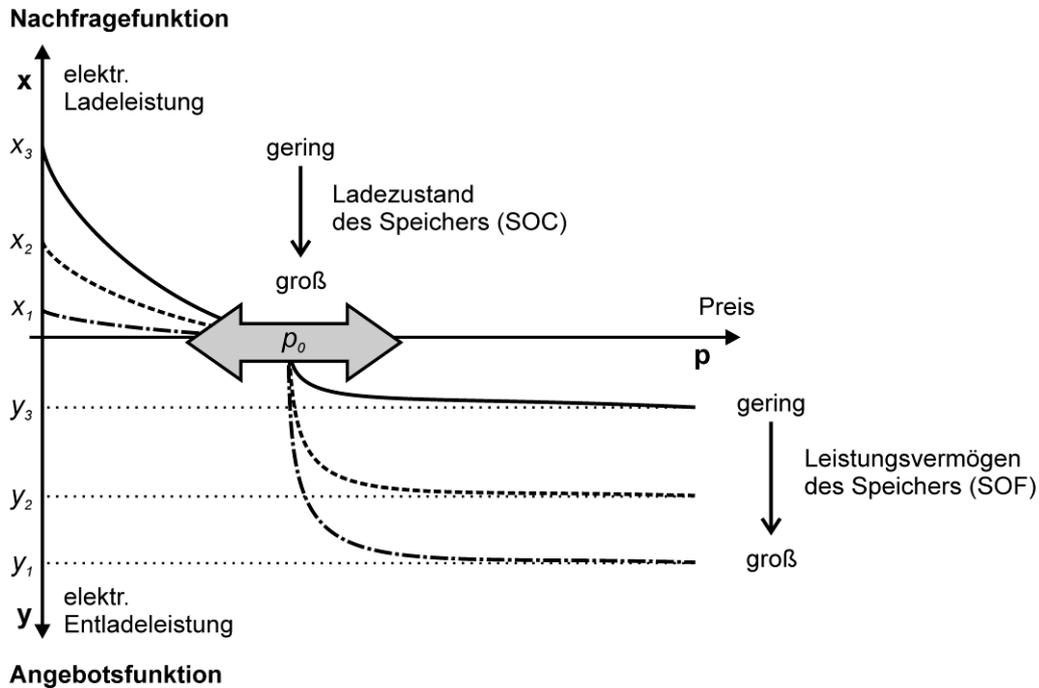


Bild A6.1: Angebots- und Nachfragefunktionen des Energiespeichers als Händler

Um den zeitlichen Aspekt der Spekulation mit einzubinden, wird der Mindest-Angebotspreis p_0 und damit die Handelsrichtung aus dem Verhältnis der zeitlich kumulierten Spekulations-Geldmenge SG und der gespeicherten Energiemenge SOC bestimmt:

$$p_0 = \frac{SG}{SOC} = \frac{\int (p \cdot x - p \cdot y) dt}{\int \left(\frac{x}{\eta_{Bat}} - y \right) dt} \quad (A.5)$$

Die Spekulations-Geldmenge SG stellt den Geldbetrag dar, welcher sich aus der Differenz zwischen den jeweils zeitlich kumulierten Beträgen der Einkaufskosten und den Verkaufseinnahmen berechnet. Der Wirkungsgradfaktor η_{Bat} gibt die Möglichkeit, Kosten für die Verluste der Energiespeicherung zu berücksichtigen. Der Angebotspreis der Batterie ist damit mindestens so groß, dass mit der gespeicherten Energiemenge die investierte Geldmenge ausgeglichen werden kann. Bezieht die Batterie z. B. während einer Bremsenergie-rückgewinnung die Energie kostenfrei, wird sich der Angebotspreis verringern. Tabelle A6.2 gibt eine Übersicht der Auswirkungen von SG und SOC auf den Mindest-Angebotspreis.

Tabelle A6.2: Auswirkung von *SG* und *SOC* auf den Mindest-Angebotspreis

Verhalten des Händlers (Energiespeicher)	Änderung der Spekulations- Geldmenge <i>SG</i>	Auswirkung auf die gespeicherte Energienmenge <i>SOC</i>	Auswirkung auf den Mindest- Angebotspreis p_0
Speicher kauft teuer ein	wächst schnell	wächst	steigt
Speicher kauft billig ein	wächst langsam	wächst	fällt
Speicher verkauft teuer	sinkt schnell	sinkt	fällt
Speicher verkauft billig	sinkt langsam	sinkt	steigt

A6.3 Standardauktionsformen

In der Auktionstheorie wird zwischen vier sogenannten Standardauktionen unterschieden. Die Englische und die Holländische Auktion zählen zu den offenen Auktionen, während die Höchstpreisauktion und Zweitpreis-Auktion (Vickrey-Auktion) Auktionen mit verdeckten Geboten darstellen [Bor03], [Kle04].

- *Englische Auktion (English Auction, ascending bid auction):*
Beginnend mit einem bestimmten Anfangswert (reservation price) beginnt ein Prozess des sich gegenseitig Überbietens zwischen den Teilnehmern. Die Gebote werden öffentlich bekanntgegeben. Jeder Bieter hat die Möglichkeit mehrmals Gebote abzugeben, so lange er das aktuell höchste Gebot übertrifft. Die Auktion endet, wenn das letzte Höchstgebot nicht mehr überboten wird. Der Bieter mit dem Höchstgebot erhält den Zuschlag und zahlt seinen gebotenen Preis.
- *Holländische Auktion (Dutch Auction, descending bid auction):*
Vom Auktionator wird, beginnend von einem Höchstgebot (deutlich über dem geschätzten Wert des Objekts) sukzessive der Verkaufspreis reduziert. Derjenige Bieter, der zuerst bereit ist, den aktuell ausgerufenen Betrag zu zahlen, signalisiert dies dem Auktionator und erhält für diesen Preis den Zuschlag. Daraus ergibt sich, dass die anderen Bieter nicht mehr die Möglichkeit haben, auf das Gebot zu reagieren.
- *Höchstpreis-Auktion (first-price sealed-bid auction):*
Jeder Bieter gibt dem Auktionator einmalig ein Gebot ab, ohne die Gebote der anderen zu kennen. Nachdem vom Auktionator alle versiegelten Gebote eingesammelt wurden, vergleicht er die Gebote. Er erteilt den Zuschlag an den Bieter, der den höchsten Preis genannt hat. Dieser muss diesen Betrag entrichten.
- *Zweitpreis-Auktion (Vickrey Auction, second-price sealed-bid auction):*
Der Auktionsablauf entspricht dem der Höchstpreisauktion. Der Bieter mit dem höchsten Gebot erhält den Zuschlag. Er muss allerdings nur den Betrag zahlen, der dem zweithöchsten Gebot entspricht.

Eine wesentliche Erkenntnis der Auktionstheorie ist das „Revenue-Equivalence“ Theorem (Vickrey): Im *statistischen Mittel* wird von allen vier Standardauktionsformen das gleiche Auktionsergebnis (Preis) erzielt, wenn alle Bieter (a) eine unabhängige, private Wertschätzung für das Auktionsobjekt besitzen, (b) sich risikoneutral verhalten, (c) symmetrisch in

ihren Bietstrategien sind und (d) der Preis nur von den Geboten abhängig ist. In diesem so genannten „Benchmark-Modell“ unterscheiden sich jedoch die strategischen Gleichgewichte [AfMi87]: Bei der Englischen und der Zweitpreis-Auktion wird der höchste Nutzen für die einzelnen Bieter durch ein Gleichgewicht in dominanten Strategien [Holl03] erreicht, d. h. die individuelle Bietstrategie ist unabhängig von den anderen Bietern. In beiden Fällen führt die wahre Angabe der eigenen Wertschätzung („truth telling“ [Kle04]) zum strategischen Gleichgewicht. Bei der Holländischen und der Höchstpreis-Auktion muss hingegen das strategische Verhalten der anderen Bieter abgeschätzt und in der jeweils eigenen Bietstrategie berücksichtigt werden. Die Strategiekombination, welche die optimale Lösung unter Beachtung der optimalen Strategien der anderen Mitbieter darstellt, wird in der Spieltheorie als Nash-Gleichgewicht¹ bezeichnet [Holl03].

¹ Benannt nach dem Ökonomen John F. Nash Jr. (*1928).

A.7 Kenndaten und Modelle des Bordnetzprüfstands

A7.1 Kenndaten wichtiger Prüfstandskomponenten

Echtzeitplattform

Tabelle A7.1: Komponentenübersicht zur Echtzeitplattform

Hersteller: dSPACE GmbH, www.dspace.de	
Bezeichnung	Kurzbeschreibung
dSPACE Expansion Box PX20	Erweiterungsbox zur Aufnahme von 19 dSPACE Einsteckkarten mit Link Board DS814 zur Kommunikation zum Leitrechner
Prozessor Board DS1005	IBM PowerPC 75FX (800 MHz), 16 MB FLASH, 128 MB SDRAM
Direct Digital Synthesis Board DS2302	6 unabhängige Digitalkanäle mit je 7 digitalen Input/Output und 1 Analogausgang, Digitaler Signalprozessor Texas Instruments TMS320C31 (60 MHz), Dual-Port RAM
CAN Board DS4302	4 CAN Kanäle mit je 3 unabhängigen Transceivern
Multi-Channel A/D Board DS2002	Analog/Digital-Wandler, 2x16 Kanäle, ± 5 V oder ± 10 V Eingangsbereich, 4 bis 16 Bit Auflösung
Multi-Channel D/A Board DS2103	Digital/Analog-Wandler, 32 Kanäle, ± 5 V oder ± 10 V Ausgangsbereich, 14 Bit Auflösung
Timing and Digital I/O Board DS4001	32 digitale Eingänge/Ausgänge, 5 Timing-Kanäle, TTL-Pegel

Antriebssystem

Tabelle A7.2: Komponentenübersicht zum Antriebssystem

Hersteller: Bosch Rexroth AG, www.boschrexroth.com	
Bezeichnung	Kurzbeschreibung
Elektromotor ADP134-B-FS	Drehstrom-Asynchronmotor, 15 kW Nennleistung, 2000 min ⁻¹ Nenndrehzahl, Maximaldrehzahl 7500 min ⁻¹ , 2 Polpaare, Fremdlüfter, inkrementaler Drehgeber
Frequenzumrichter RD52-30	Nennleistung 22 kW (130 % überlastfähig für 60 s), Mehrgrößen-Vektorregelung, Steuerung über CAN-Bus, RS232-Schnittstelle zur Parametrierung, integrierter Netzfilter und Brems-Chopper
Bremswiderstand RZW02	9 kW Dauerleistung

Bordnetzkomponenten

Tabelle A7.3: Komponentenübersicht zur Bordnetzsimulation

Bezeichnung	Kurzbeschreibung
Hersteller: Höcherl&Hackl GmbH, www.hoecherl-hackl.com	
Last DS7206	geregelte Gleichspannungs-Last, Spannung bis 60 V, Strom bis 500 A, 7,2 kW Dauerleistung und 21,6 kW Kurzzeitleistung, Luftkühlung, Dynamik: Anstiegszeit 250 μ s, analoger Steuereingang und analoge Messausgänge, digitale Programmierung über RS232
Hersteller: Delta Elektronika BV, www.delta-elektronika.nl	
Quelle SM30-200	geregelte Gleichspannungs-Quelle, Spannung bis 30 V, Strom bis 200 A, 6 kW Dauerleistung, analoger Steuereingang, analoge Messausgänge, Dynamik: Anstiegszeit 6,4 ms

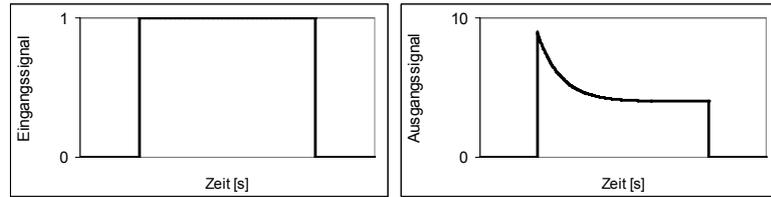
Tabelle A7.4: Übersicht komponentenbezogener Blindplatten [Büc06a]

Bezeichnung	Messwandler	Abbildungsbereich		Steuergrößen
		Eingang	Ausgang	
Elektronisch geregelte Quelle	Spannung intern	30 V	5 V	Schalter für Schütz, analoges Steuersignal
	Strom intern	200 A	5 V	
Elektronisch geregelte Last	Spannung intern	60 V	10 V	analoges Steuersignal
	Strom intern	500 A	10 V	
Generator	Strom ⁽¹⁾	250 A	5 V	
	Spannung ⁽²⁾	20 V	10 V	
	Strangspannung ⁽²⁾	± 20 V	± 10 V	
	Erregerstrom	10A	10V	
Generatorregler	Externer Originalregler			Anschluss BSD
Fremderregung	Anschlüsse für externe Erregerquelle			
Batterie	Strom ⁽¹⁾	± 250 A oder ± 500 A	± 5 V	Schalter für Schütz, Anschluss BSD
	Spannung ⁽²⁾	20V	10 V	
SuperCap-Modul	Strom ⁽¹⁾	± 250 A oder ± 500 A	± 5 V	Schalter für Schütz, Spannungswächter
	Spannung ⁽²⁾	20 V	10 V	

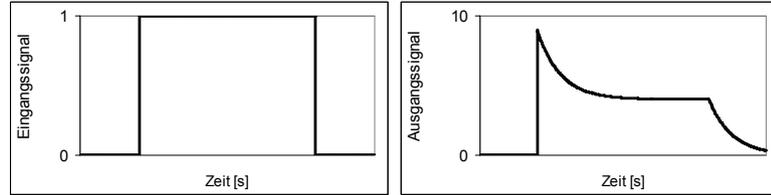
- (1) Halleffekt-Kompensationswandler LF305-S der Firma LEM, www.lem.com,
 Bürdewiderstand A-H1-R20 der Firma Isabellenhütte, www.isabellenhuette.de
 (2) Differenzverstärker INA137 der Firma Texas Instruments, www.ti.com

A7.2 Verbrauchermodelle

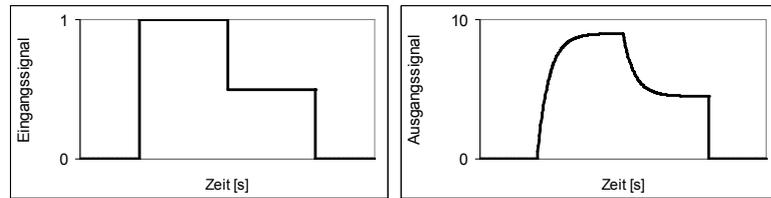
Grundblock 1:
Einschaltspitze,
hartes Ausschalten



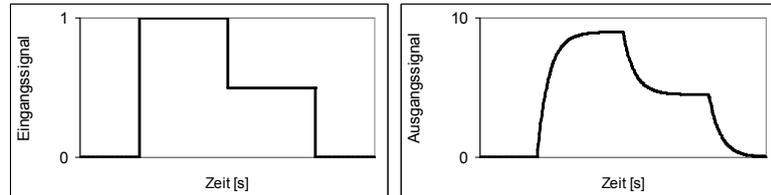
Grundblock 2:
Einschaltspitze,
weiches Ausschalten



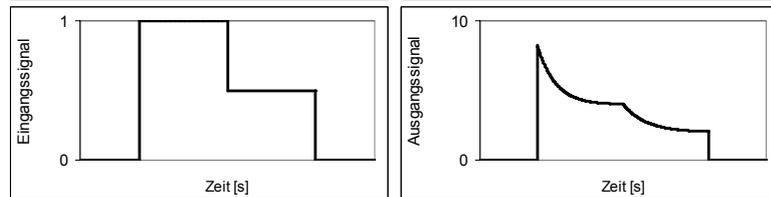
Grundblock 3:
PT1-Verhalten,
kontinuierlich einstellbar,
hartes Ausschalten



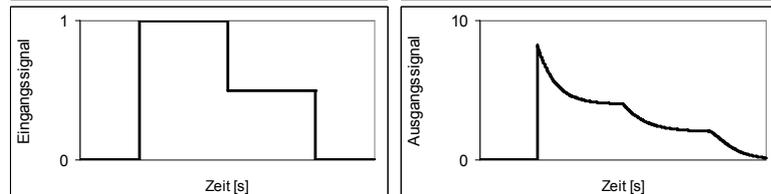
Grundblock 4:
PT1-Verhalten,
kontinuierlich einstellbar,
weiches Ausschalten



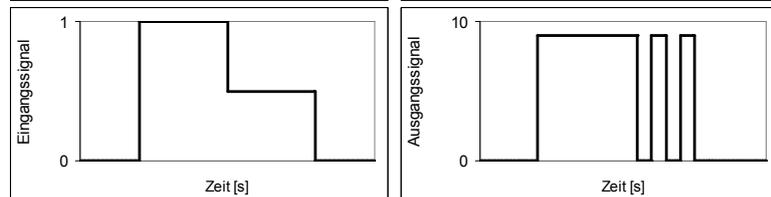
Grundblock 5:
Einschaltspitze,
PT1-Verhalten,
kontinuierlich einstellbar,
hartes Ausschalten



Grundblock 6:
Einschaltspitze,
PT1-Verhalten,
kontinuierlich einstellbar,
weiches Ausschalten



Grundblock 7:
Pulsweitenmodulation



Grundblock 8:
Erwärmungsverhalten

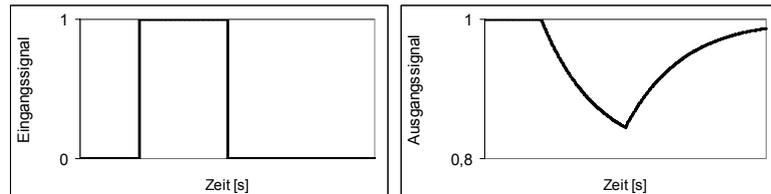
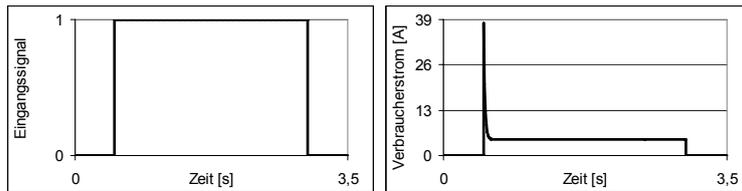
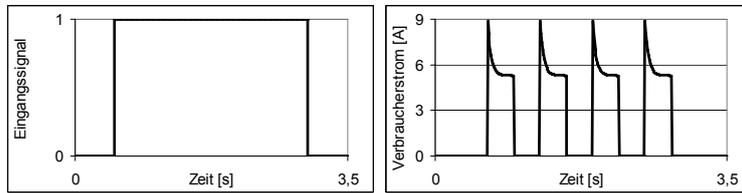


Bild A7.1: Grundmodelle für Simulationsmodelle zum Verbraucherverhalten [Bis07]

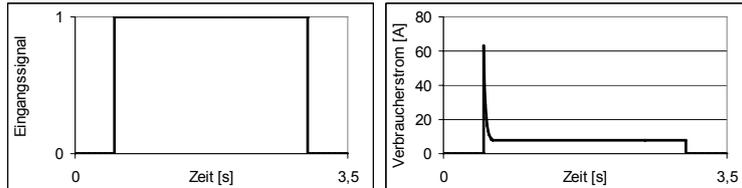
Abblendlicht:
 (ungeregelt, Grundblock 1)
 Maximalstrom: 38,0 A
 Nennstrom: 4,7 A
 Innenwiderstand 3,05 Ohm
 Einschaltkonstante: 0,015 s



Blinklicht:
 (ungeregelt, Grundblöcke 1+7)
 Maximalstrom: 8,9 A
 Nennstrom: 5,3 A
 Innenwiderstand 2,7 Ohm
 Periodendauer: 0,63 s
 Einschaltkonstante: 0,04 s



Nebelscheinwerfer:
 (geregelt, Grundblock 1)
 Maximalstrom: 63,4 A
 Nennstrom: 7,7 A
 Einschaltkonstante: 0,022 s



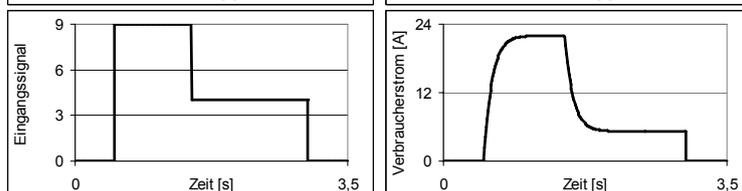
Nebelschlussleuchte:
 (geregelt, Grundblock 1)
 Maximalstrom: 20,0 A
 Nennstrom: 3,5 A
 Einschaltkonstante: 0,028 s



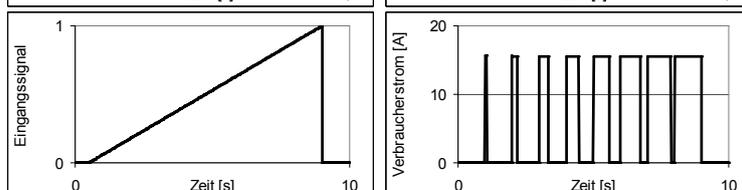
Heckscheibenwischer:
 (ungeregelt, Grundblöcke 1+7)
 Maximalstrom: 12,5 A
 Innenwiderstand: 5,2 Ohm
 Periodendauer: 2,5 s
 Einschaltdauer: 1,5 s
 Einschaltkonstante: 0,01 s



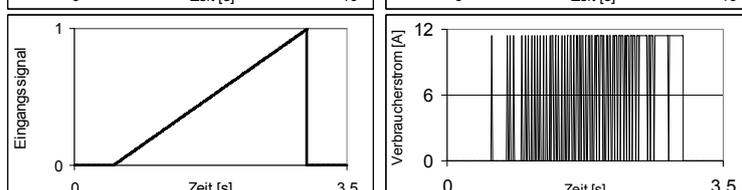
Innenraumgebläse:
 (geregelt, Grundblock 4)
 Maximalstrom: 22 A
 PT1-Verhalten
 verstellbar in 9 Stufen
 Zeitkonstante: 0,7 s



Heckscheibenheizung:
 (ungeregelt, Grundblöcke 7+8)
 Maximalstrom: 15,5 A
 Innenwiderstand: 0,92 Ohm
 Periodendauer PWM: 1 s
 Erwärmungszeitkonstante: 15 s



Sitzheizung:
 (ungeregelt, Grundblock 7)
 Maximalstrom: 11,4 A
 Innenwiderstand: 1,25 Ohm
 Periodendauer PWM: 0,038 s



Startvorgang + Motronik:
 (ungeregelt, Lookup-Table)
 Maximalstrom: 588 A
 0,5 s < t < 290 s: 87 A
 t > 290 s: 47 A

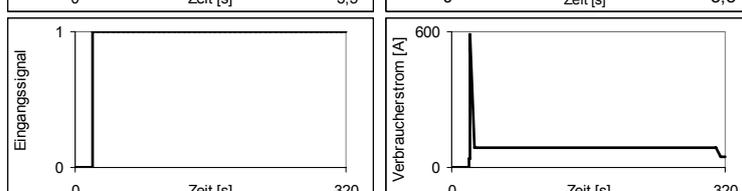


Bild A7.2: Parameter einiger Verbrauchermodelle (Die Kennlinien sind bei einer Bordnetzspannung von 14,3 V dargestellt) [Bis07]

A7.3 Vergleichsmessung zum Leerlaufdrehzahlmodell

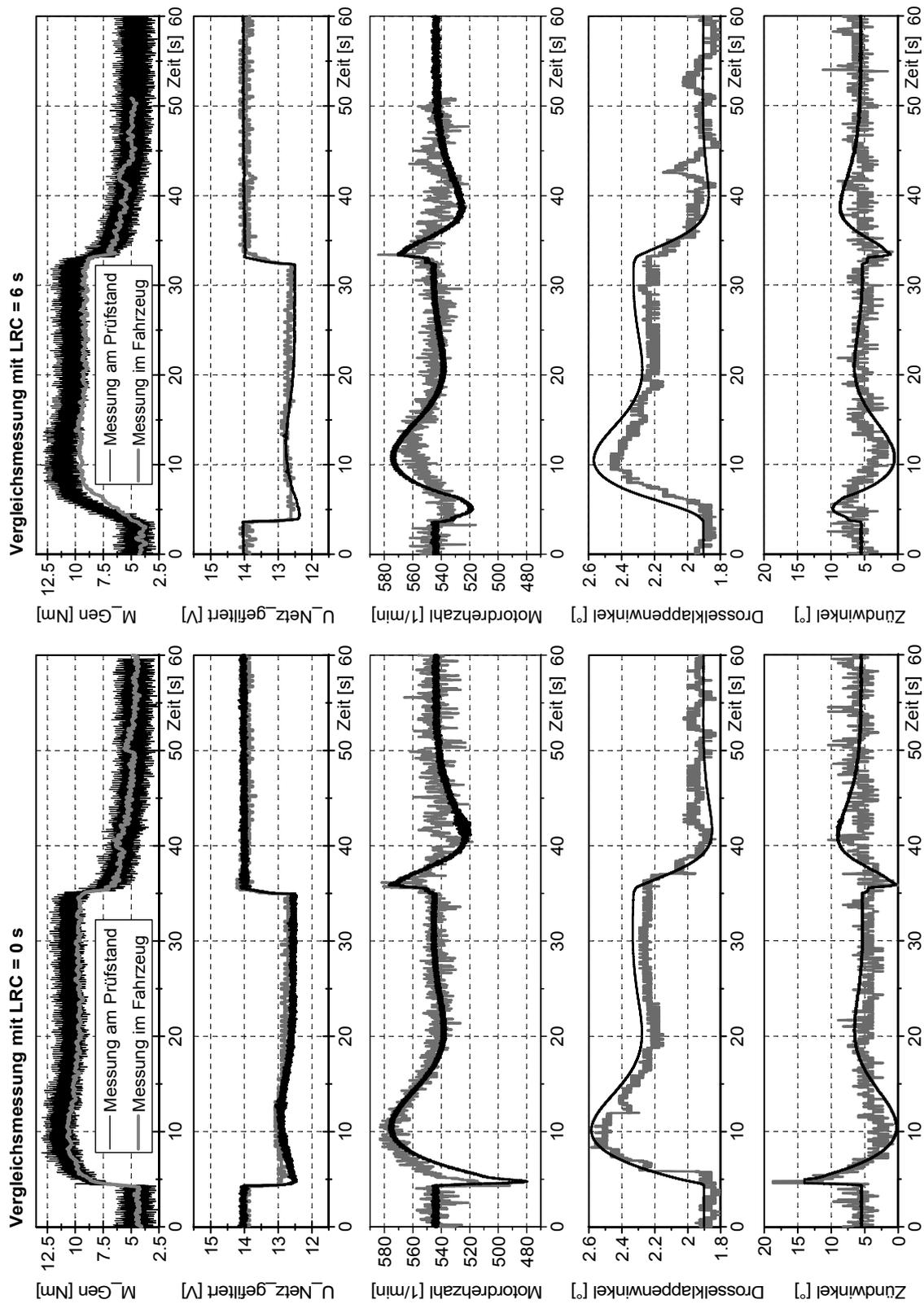


Bild A7.3: Messung von Laststrom-Sprungantworten im elektrischen Bordnetz zum Vergleich des transienten Verhaltens im Fahrzeug und dem Leerlaufdrehzahlmodell am HiL-Bordnetzprüfstand [Usp07]

A.8 Messergebnisse zu dynamischen Lastwechseln

Alle Messgrößen wurden mit 1 kHz abgetastet. Zur besseren Interpretation der Verläufe sind die Ströme I_{Gen} , I_{Bat} , I_{SCAP} und die Bordnetzspannung U_{Netz} zusätzlich als gefilterte Signale in die Messaufzeichnung dargestellt (hellere Kurvenfarbe). Es kam ein steilflankiger Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 25 Hz zum Einsatz.

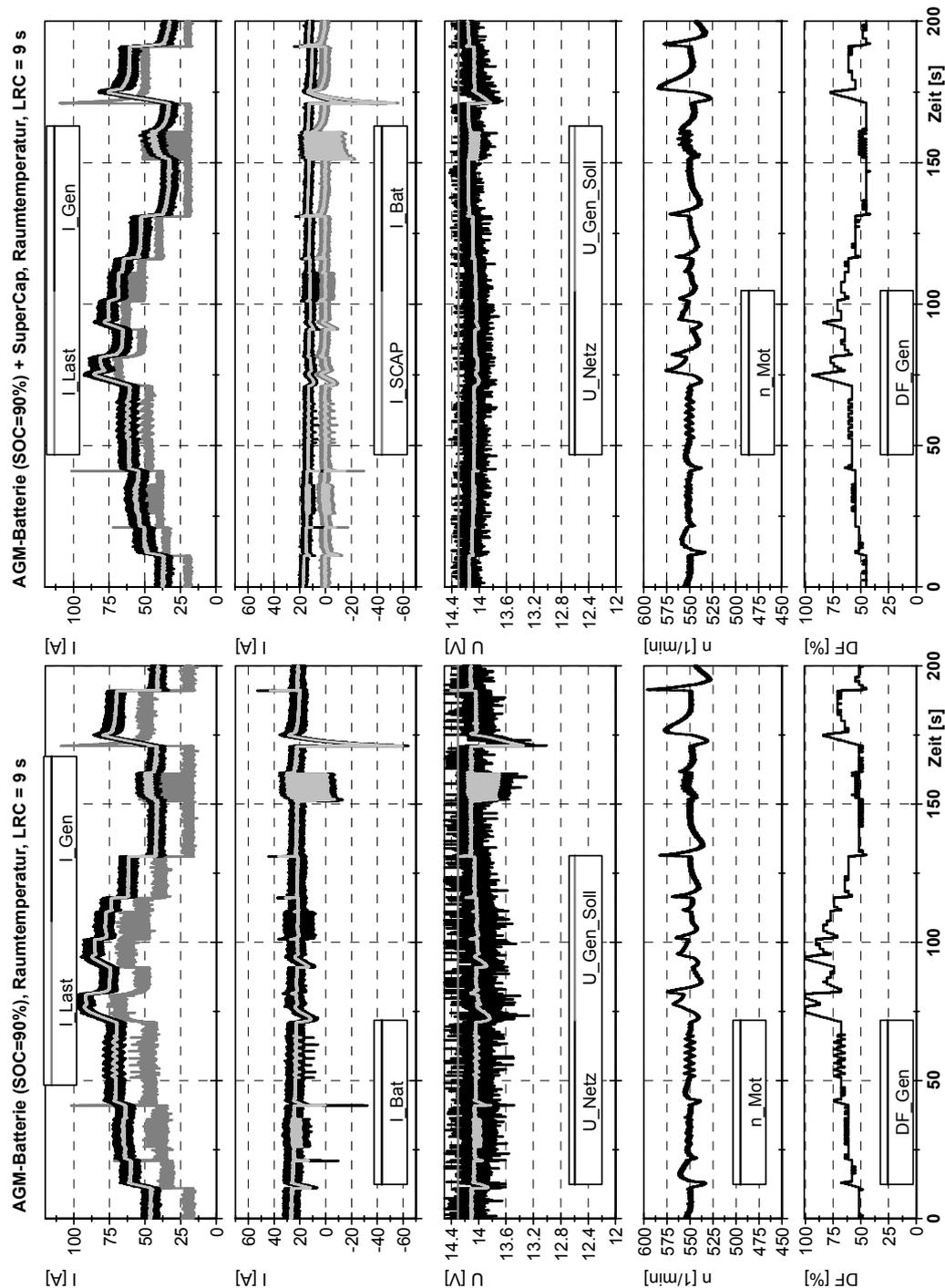


Bild A8.1: Gemessenes Lastwechselverhalten am Bordnetzprüfstand unter Vorgabe des elektrischen Lastprofils bei Raumtemperatur und aktiver Generatorantriebsbegrenzung (LRC = 9 s); Vergleich mit und ohne SuperCap-Modul

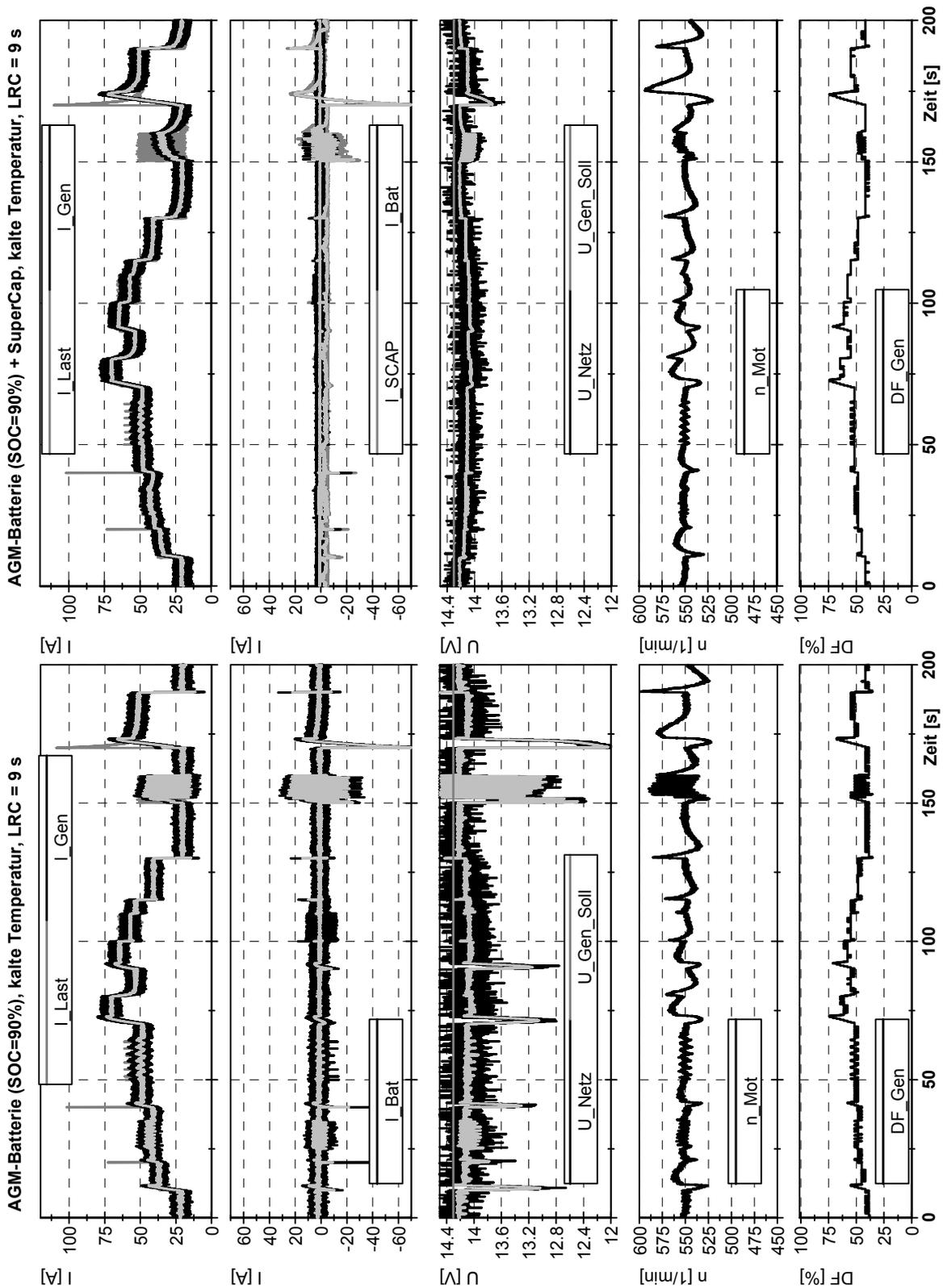


Bild A8.2: Gemessenes Lastwechselverhalten am Bordnetzprüfstand unter Vorgabe des elektrischen Lastprofils bei kalter Temperatur der Energiespeicher und aktiver Generatorantriebsbegrenzung (LRC = 9 s); Vergleich mit und ohne SuperCap-Modul

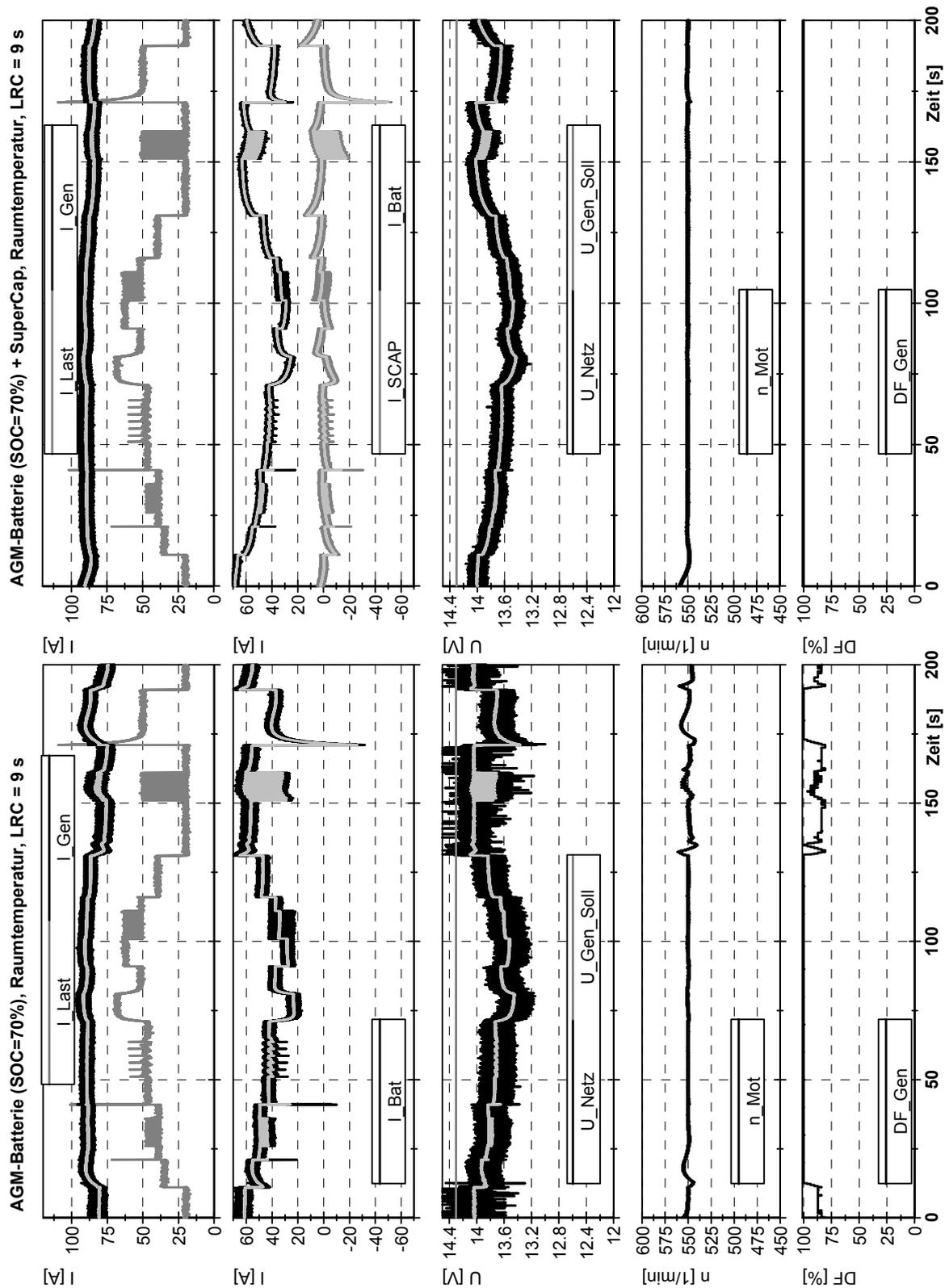


Bild A8.3: Gemessenes Lastwechselverhalten am Bordnetzprüfstand unter Vorgabe des elektrischen Lastprofils bei Raumtemperatur, aktiver Generatoranstiegsbegrenzung ($LRC = 9\text{ s}$) und einem *geringen Anfangsladezustand der Batterie* $SOC_0 = 70\%$; Vergleich mit und ohne SuperCap-Modul

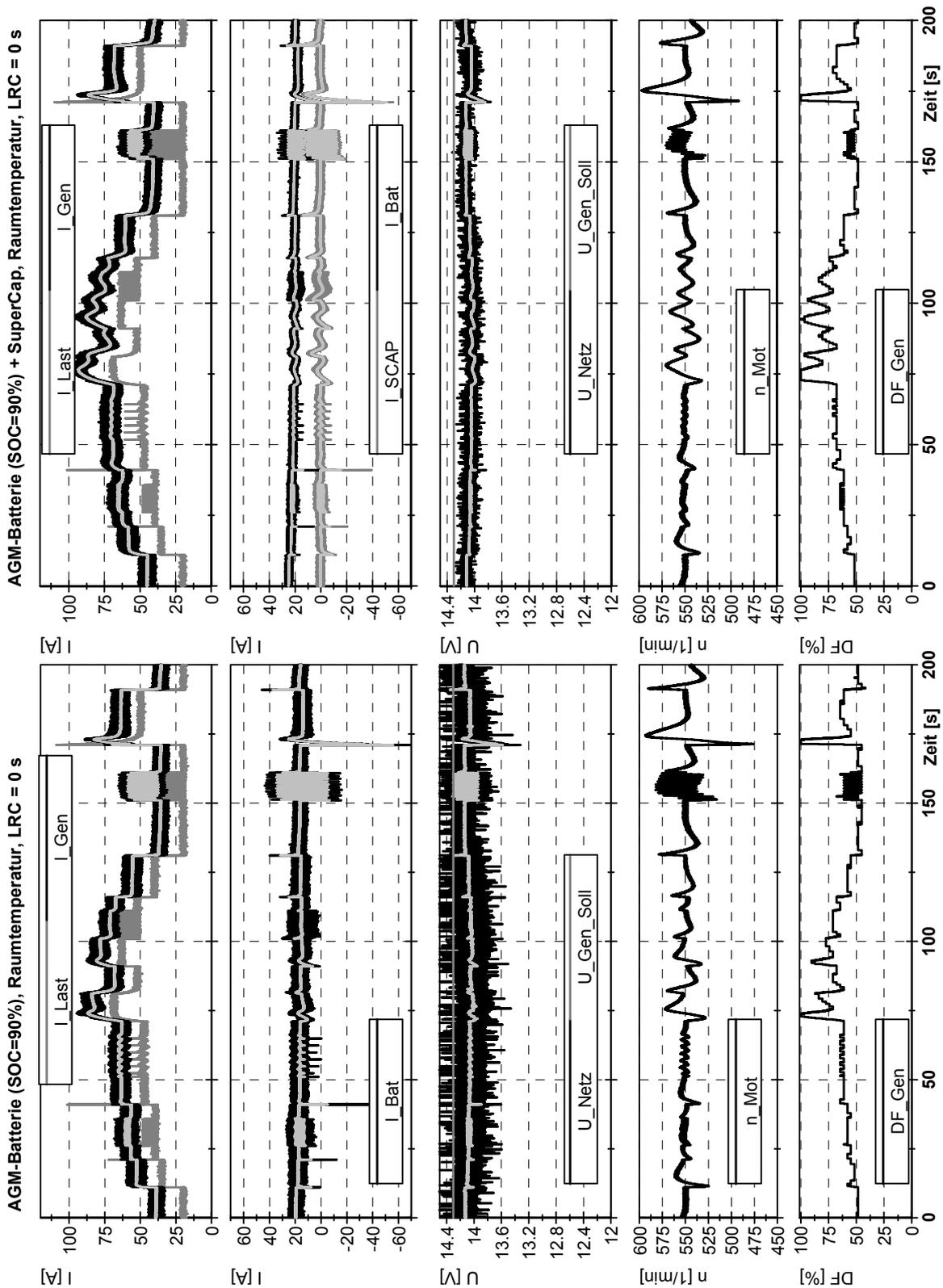


Bild A8.4: Gemessenes Lastwechselverhalten am Bordnetzprüfstand unter Vorgabe des elektrischen Lastprofils bei Raumtemperatur und *inaktiver* Generatoranstiegsbegrenzung (LRC = 0 s); Vergleich mit und ohne SuperCap-Modul

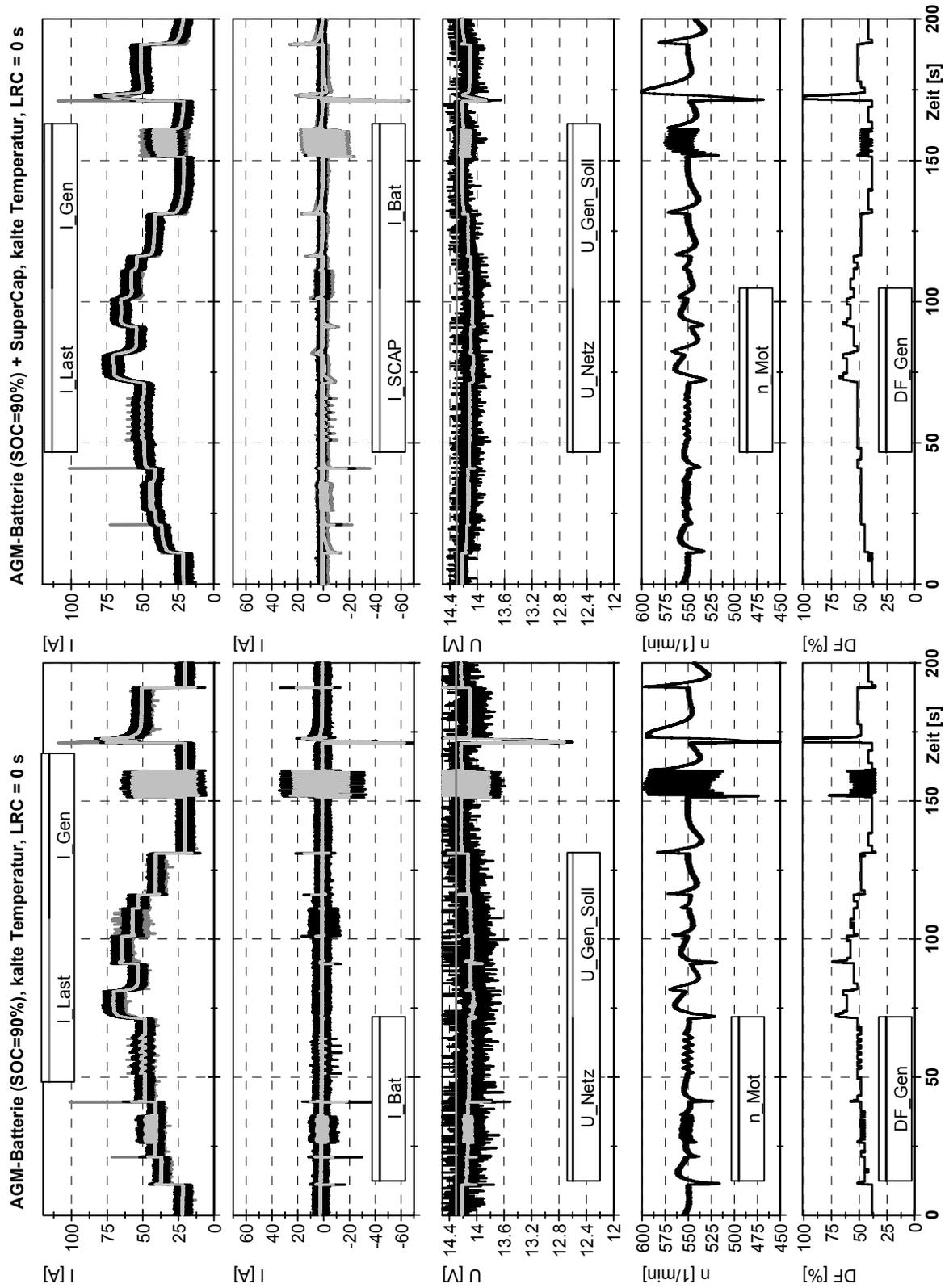


Bild A8.5: Gemessenes Lastwechselverhalten am Bordnetzprüfstand unter Vorgabe des elektrischen Lastprofils bei kalter Temperatur der Energiespeicher und inaktiver Generatoransteigbegrenzung (LRC = 0 s); Vergleich mit und ohne SuperCap-Modul

Literaturverzeichnis

- [Acea07] *European Automobile Manufacturers Association (ACEA):*
European Automotive Industry Report 07/08.
Online im Internet: www.acea.be, 2007.
- [Ad06] *Analog Devices Inc.:*
MicroConverter® Integrated, Precision Battery Sensor. Datenblatt ADuC7032,
Online im Internet: www.analog.com, 2006.
- [AfMi87] *R. P. McAfee, J. McMillan:*
Auctions and Bidding. *Journal of Economic Literature*, Vol. XXV.
Pittsburgh, Stanford: June 1987.
- [Bac05] *M. Back:*
Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von
Hybridfahrzeugen. Dissertation, Universität Karlsruhe: 2005.
- [Bäk98] *B. Bäker:*
Energie- und Informationsmanagement für zukünftige Kfz-Bordnetze.
Dissertation TU Braunschweig, Aachen: Verlag Mainz, 1998.
– ISBN 3-89653-241-3
- [Bec99] *M. Beckmann:*
Ökonomische Analyse deutscher Auktionen.
Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 1999. – ISBN 3-8244-6915-4
- [Bis06] *M. Bischoff:*
Untersuchungen zum elektrischen Verbrauchermanagement in Kraftfahrzeugen.
Studienarbeit*, TU Dresden: 2006.
- [Bis07] *M. Bischoff:*
Untersuchungen zum elektrischen Energiemanagement im Kraftfahrzeug auf
Grundlage ökonomischer Modelle. Diplomarbeit*, TU Dresden: 2007.
- [Bis99] *H. Bischof, M. Bork, R. Schenk:*
Startergenerator: System, Funktion, Komponenten. LuK-Fachtagung
„E-Maschine im Antriebsstrang“, Bühl: 1999.
- [Ble05] *M. Blesl, U. Fahl, U. Remme, B. Rühle:*
Energiewirtschaftliche Langfristszenarien für alternative Kraftstoffe und
Antriebskonzepte. *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*,
Ausgabe 5/2005 und 6/2005. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2005.
- [Bmu07] *U. Lahl:*
Clean Moves – Perspectives on Mobility. Vortrag zur Expo Hannover: April
2007. Bundesministerium für Umwelt (BMU), Online im Internet: www.bmu.de.
- [Bmw05] *BMW Group:*
Elektronischer Teilekatalog und Teile-Informationssystem.
Online im Internet (nicht öffentlich), 2005-2007.

-
- [Bor03] *M. Borrmann:*
Ausschreibungen im Schienenpersonennahverkehr - Eine ökonomische Analyse auf Basis der Vertrags- und Auktionstheorie.
Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 2003. – ISBN 3-525-85892-2
- [Bos07] *Robert Bosch GmbH (Autorenkollektiv):*
Autoelektrik, Autoelektronik. 5. Auflage, Wiesbaden: Vieweg Verlag: 2007.
– ISBN 978-3-528-23872-8
- [Bou05a] *A. Bouscayrol, R. Schönfeld, A. Pennamen, G.-H. Geitner:*
Different energetic descriptions for electromechanical systems.
11th European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden: 2005.
- [Bou05b] *P. Boucharel, H.-M. Graf:*
Optimizing vehicle energy management utilizing Power Trading Concept.
VDI-Tagungsband 1907 „Elektronik im Kraftfahrzeug“.
Düsseldorf: VDI Verlag, 2005. – ISBN 3-18-091907-8
- [Brö07] *U. Bröckelmann:*
Microconverter: Der Baustein hinter dem intelligenten Batteriesensor.
Tagung „Energiemanagement und Bordnetze II“,
Renningen: expert-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8169-2649-8
- [Büc02] *S. Büchner:*
Konzepterstellung und Potentialabschätzung zur Bremsenergieerückgewinnung mit Hilfe eines konventionellen Generators im PKW.
Studienarbeit, TU Dresden: 2002.
- [Büc03] *S. Büchner:*
Intelligente Steuerung des Lastwechsels im Kfz-Bordnetz.
Diplomarbeit, TU Dresden: 2003.
- [Büc04] *P. Büchner:*
Skript zur Vorlesung Elektrische Antriebe, TU Dresden: 2004.
- [Büc05a] *S. Büchner, L. Morawietz, H.-C. Reuss, J. Liebl, F. Meir, M. Bertram, T. Christ:*
Entwicklung von Energiemanagement-Konzepten für das elektrische Bordnetz im Kraftfahrzeug. 6th Stuttgarter Symposium Automotive and Engine Technology,
Stuttgart: Februar 2005.
- [Büc05b] *S. Büchner, B. Bäker:*
Kapitel 2: Elektrisches Energiebordnetz. Skript und Foliensatz zur Vorlesung Kraftfahrzeugelektrik und -elektronik, TU Dresden: 2005.
- [Büc06a] *S. Büchner, L. Morawietz, H.-C. Reuss:*
Fahrzeugmessungen und HiL-Bordnetzprüfstand. Abschlussbericht (Teil 2) für BMW AG im Forschungsprojekt Energiemanagement, TU Dresden: 2006 (unveröffentlicht).
- [Büc06b] *S. Büchner, L. Morawietz, H.-C. Reuss:*
Untersuchungen zu Energiemanagement-Strategien im elektrischen Kfz-Bordnetz. Abschlussbericht (Teil 4) für BMW AG im Forschungsprojekt Energiemanagement, TU Dresden: 2006 (unveröffentlicht).
- [Büc06c] *S. Büchner, O. Cassebaum, B. Bäker:*
Allgemeine Auswirkungen von Hochvolt-Systemen in der Montage/ Nacharbeit.
Auftragsstudie für DaimlerChrysler AG. TU Dresden: 2006 (unveröffentlicht).

- [Büc07] *S. Büchner, T. Christ, M. Bischoff, B. Bäker:*
Entwicklung von Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen. Tagung „Energiemanagement und Bordnetze II“, Renningen: expert-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8169-2649-8
- [Bul-02] *S. Buller:*
Impedance-Based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems. Dissertation, RWTH Aachen: 2002.
- [Bund07] *W. Reh, F. Chen:*
Deutsche Autohersteller und die Reduzierung von CO₂ bei Neuwagen: EU-Klimafahrtenbuch 2012 für PKW. Berlin: Bund für Umwelt und Naturschutz e.V. (BUND), Online im Internet: www.bund.net, 2007.
- [Chr04] *Th. Christ, F. Meir, M. Bertram, S. Büchner, L. Morawietz, H.-C. Reuss:*
Energiemanagement des elektrischen Bordnetzes im Kraftfahrzeug - Werkzeuge zur Funktionsentwicklung. VDE Konferenz 2004, Berlin: Oktober 2004.
- [Chr06] *Th. Christ:*
Rekuperation in elektrischen Energiebordnetzen von Kraftfahrzeugen. Dissertation, TU Berlin. Düsseldorf: VDI Verlag, 2006. – ISBN 3-18-362312-9
- [Cra04] *V. Crastan:*
Elektrische Energieversorgung (Band 2). Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2004. – ISBN 3-540-41326-X
- [Dat07] *Deutsche Automobil Treuhand GmbH:*
Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen aller neuen Personenkraftwagenmodelle, Ausgabe 2007. Online im Internet: www.dat.de.
- [Eng05] *A. Engstle, R. Egglihuber, H.-G. Herzog:*
Energiemanagement im Kraftfahrzeug als Betriebsstrategie hybrider Systeme. VDI-Tagungsband 1907 „Elektronik im Kraftfahrzeug“. Düsseldorf: VDI Verlag, 2005. – ISBN 3-18-091907-8
- [Euc07] *European Council for Automotive R&D, concawe:*
Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Forschungsstudie, Luxembourg: European Commission Directorate-General Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability, 2007. Online im Internet: <http://ies.jrc.ec.europa.eu>
- [Fab06] *R. M. Fabis:*
Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen. Dissertation, TU Berlin: 2006.
- [Feh04] *N.-H. von der Fehr, N. Fabra, D. Harbord:*
Designing Electricity Auctions. Veröffentlichung, Berkley: University of California, Center for the Study of Energy Markets, 2004.
- [FiKö91] *G. Fiedler, R. König:*
Wirtschaftstheorien im Überblick. 1. Aufl. Berlin: Verlag Die Wirtschaft, 1991. – ISBN 3-349-00769-4
- [Fre05] *B. Frey, J. Häffner, M. Merkle, K. Schiller:*
Batteriesensorik und Batteriezustandserkennung. Tagung „Energiemanagement und Bordnetze“, Renningen: expert verlag, 2005. – ISBN 3-8169-2466-2

-
- [Fre06] *B. Frei:*
Regelung eines elektromechanischen Getriebes für Hybridfahrzeuge.
Dissertation, TU Chemnitz: 2006.
- [Gae05] *L. Gaedt, M. Leyten, D. Kok, E. Spijker:*
Impact of the micro-Hybrid Functions on Voltage Quality and Customer
Acceptance. VDI-Bericht Nr. 1907 „Elektronik im Kraftfahrzeug“,
Baden-Baden: 2005.
- [Gar02] *O. Garcia:*
DC/DC-Wandler für die Leistungsverteilung in einem Elektrofahrzeug mit
Brennstoffzellen und Superkondensatoren. Dissertation, ETH Zürich: 2002.
- [Geh05] *O. Gehring, H. Heilmann, u. a.:*
Verfahren zum Energiemanagement. Patent-Offenlegung DE 103 41 907 A1.
Stuttgart: Daimler Chrysler AG, 2005.
- [Got07] *B. Gottschalk:*
Statement zum Pressegespräch mit dem Thema CO₂ und Klimaschutz am
22. Januar 2007 in Frankfurt am Main. Online im Internet: www.vda.de
- [Gra01] *A. Graf:*
Halbleiter im 42V-Bordnetz. 5. Internationaler ETG-Kongress (VDE),
Nürnberg: Oktober 2001.
- [Gra04] *H. M. Graf:*
Offene Softwarelösung für das Energiemanagement. Automobiltechnische
Zeitschrift (ATZ), Ausgabe 1/2004, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2004.
- [Hab04] *M. Hable:*
Beitrag zur Energieeinsatzoptimierung mit evolutionären Algorithmen in lokalen
Energiesystemen mit kombinierter Nutzung von Wärme- und Elektroenergie.
Dissertation, TU Dresden: 2004.
- [Haf05] *M. Hafkemeyer, F. El-Dwaik, A. Heim, J. Liebl, J. Stauber, F. Traub:*
Effiziente Dynamik durch intelligentes Energiemanagement. VDI-Tagungsband
1907 „Elektronik im Kraftfahrzeug“, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005.
– ISBN 3-18-091907-8
- [Har00] *H.-D. Hartmann:*
Das 42V-Bordnetz für Kraftfahrzeuge – Motivation und Innovation. Hannover:
sci-worx GmbH, 2000. Online im Internet: www.sci-worx.com.
- [Hei05] *A. Heim:*
Intelligenter Batteriesensor: Das Energiemanagement der Zukunft. Tagung
„Energiemanagement und Bordnetze“, Renningen: expert verlag, 2005.
– ISBN 3-8169-2466-2
- [Hei07] *D. Heinemann:*
Strukturen von Batterie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und
Ultracaps. Dissertation, TU Berlin: 2007.
- [Hen90] *G. Henneberger:*
Elektrische Motorausrüstung. Braunschweig: Vieweg Verlag, 1990.
– ISBN 3-528-04764-X

- [Hof01] *M. Hofmann:*
Leistungssteigerung von Kfz-Generatoren durch stoßarme Wicklungs-
umschaltung mittels steuerbarer Halbleiter.
Dissertation, Universität der Bundeswehr München: 2001.
- [Holl03] *M. J. Holler, Gerhard Illing:*
Einführung in die Spieltheorie. 5. überarbeitete Auflage Berlin, Heidelberg,
New York: Springer-Verlag, 2003. – ISBN 3-540-00258-8
- [Hül07] *M. Hülsen:*
Untersuchung der Potenziale von Hybridantriebssystemen für neuartige
Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug. Studienarbeit, TU Dresden: 2007.
- [Ipcc07] *Bundesministerium für Forschung und Bildung (BMBF):*
Kurzzusammenfassung zum Sachstandsbericht (AR4, 2007) des
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) über Klimaänderungen,
Online im Internet: www.bmbf.de, www.ipcc.ch
- [Jin07] *C. Jin:*
Intelligente Adaption der Generatorregelung im Kfz mit Fuzzy-Logic.
Studienarbeit*, TU Dresden: 2007.
- [Jon07] *L. Jonckheere, M. Sattler:*
Starting an internal combustion engine in a hybrid powertrain with its electric
traction motor. 4th Symposium „Hybrid Vehicles and Energy Management“,
Braunschweig: GZVB e.V., Februar 2007.
- [Jun04] *Chr. Jung:*
Dynamische Wechselwirkungen im 42V-Kfz-Bordnetz. Dissertation,
Universität Bochum. Aachen: Shaker-Verlag, 2005. – ISBN 3-8322-3655-4
- [Kar07] *E. Karden, S. Ploumen, B. Fricke, T. Miller, K. Snyder:*
Energy storage devices for future hybrid electric vehicles.
J. Power Sources 168 (2007) 2-11, 2007.
- [Kes07] *J. Kessels:*
Energy Management for Automotive Power Nets.
Dissertation, TU Eindhoven: 2007.
- [Kle04] *P. Klemperer:*
Auctions: Theory and Practice. Princeton: Princeton University Press, 2004.
- [Kna05] *M. Knapp:*
Elektrisches Energiemanagement – Funktionen im Energiebordnetz.
8. Jahrestagung „Elektronik-Systeme im Automobil“, München: 2005.
- [Kno03] *R. Knorr, M. Deiml, G. Lugert:*
Vom „Mild-“, zum „Wild“-Hybrid – Fahrspaß durch den ISG bei reduzierten
Treibstoffverbrauch. 4. Symposium „Steuerungssysteme für den Antriebsstrang
von Kraftfahrzeugen“, Berlin: Oktober 2003.
- [Köh04] *S. Köhler:*
Aufbau eines Hardware-in-the-Loop Prüfstands für das Energiemanagement im
elektrischen Bordnetz des Kfz. Diplomarbeit*, TU Dresden: 2004.

-
- [Kon03] *H. Konrad, G. Krämer:*
Die Entwicklung der Steuerfunktionen für die BMW Valvetronic Motoren. Automatisierungstechnische Praxis, Ausgabe 08/2003, München: Oldenbourg Verlag, 2003.
- [Köt02] *R. Kötz:*
Doppelschichtkondensatoren – Technik, Kosten, Perspektiven. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, ISET e.V., Kassel: 2002.
- [Kub06] *R. Kube, B. Rius-Sambeat:*
Anforderungen an Elektroantriebe für Hybridfahrzeuge. 3. Braunschweiger Symposium „Hybridfahrzeuge und Energiemanagement“, Braunschweig: GZVB e.V., Februar 2006.
- [Küp96] *S. Küppers:*
Numerische Verfahren zur Berechnung und Auslegung von Drehstrom-Klauenpolgeneratoren. Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker-Verlag, 1996. – ISBN 3-8265-1314-2
- [Kur07] *A. Kurz:*
Ultrakondensatoren - Tatkräftige Starthilfe. ElektronikPraxis, Ausgabe 8/2007, Würzburg: Vogel Business Media, 2007.
- [Kut06] *S. Kutter:*
Theoretische und simulationsgestützte Untersuchungen zur Optimierung von Betriebsstrategien an einer vorhandenen Hybridfahrzeugarchitektur. Diplomarbeit, TU Dresden: 2006.
- [Lia99] *F. Liang, J. M. Miller, X. Xu:*
A Vehicle Electric Power Generation System with Improved Output Power and Efficiency. IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 35, NO. 6, 1999.
- [Lie01] *J. Liebl, F. Munk, H. Hohenner, B. Ludwig:*
Die Steuerung der neuen BMW Valvetronic-Motoren. Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Ausgabe 7/2001, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2001.
- [Lie06] *J. Liebl, E. Frickenstein, M. Wier, M. Hafkemeyer, F. El-Dwaik, E. Hockgeiger:*
Intelligente Generatorregelung – Ein Weg zur effizienten Dynamik. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Ausgabe 4/2006, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2006.
- [Lin02a] *C.-C. Lin, H. Peng, J.W. Grizzle, S. Jeon, J. Lee:*
Control of a Hybrid Electric Truck Based on Driving Pattern Recognition. Proceedings Advanced Control Conference, Hiroshima: 2002
- [Lin03] *D. Linzen, S. Buller, E. Karden, R. W. De Doncker:*
Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems. IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 41, NO. 5, 2005.
- [Lin93] *Th. von Lingen:*
Marktgleichgewicht oder Marktprozeß. Perspektiven der Mikroökonomie. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 1993. – ISBN 3-8244-0140-1.
- [Lor07] *Th. Lorenz, C. Hoff, M. Osyguß, H. Schmalzer, R. Schmidt:*
Energiemanagement und Fahrzeugausfälle. Tagung „Energiemanagement und Bordnetze II“, Renningen: expert-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8169-2649-8.

- [LS06] *S. Lange, M. Schimanski:*
Energiemanagement in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben.
Dissertation, TU Braunschweig: 2006.
- [Luz05] *O. Luz, R. Rieger, H. Fink:*
Energie- und Verbrauchermanagement in einem elektrischen Bordnetz. Patent-
Offenlegung DE 102 32 539 A1, Stuttgart: Robert-Bosch GmbH, 2005.
- [Man04] *N. G. Mankiw:*
Grundzüge der Volkswirtschaftslehre. 3. Aufl. (übersetzt) Stuttgart:
Schäffer-Poeschel Verlag, 2004. – ISBN 3-7910-2163-X.
- [Mei00] *Chr. Meisenbach:*
Beitrag für ein intelligentes Elektroenergiemanagement lokaler Energiesysteme.
Dissertation, TU Dresden: 2000.
- [Mer06] *P. Merla:*
Einsatz von Startergeneratoren mit Mikrohybrid-Funktion im Kraftfahrzeug.
Oberseminar Mechatronik*, TU Dresden: 2006.
- [Mil92] *J. McMillan:*
Games Strategies and Managers.
New York, Oxford: Oxford University Press, 1992.
- [Mor06a] *L. Morawietz, S. Büchner, H.-C. Reuss:*
Betrachtungen zur Speicherung, Rückgewinnung und effizienten Wandlung von
Energie im Kfz. Abschlussbericht (Teil 1) für BMW AG im Forschungsprojekt
Energiemanagement, TU Dresden: 2006 (unveröffentlicht).
- [Mor06b] *L. Morawietz, S. Büchner, H.-C. Reuss:*
Modellbildung und Parameterbestimmung von Bordnetzkomponenten.
Abschlussbericht (Teil 3) für BMW AG im Forschungsprojekt
Energiemanagement, TU Dresden: 2006 (unveröffentlicht).
- [Mül01] *E. Müller, L. Guzella:*
Kraftstoffmeherverbrauch durch Fahren mit eingeschaltetem Abblendlicht.
Bericht, ETH Zürich: 2001.
- [Neu07] *S. Neugebauer, J. Liebl, S. Wolff:*
Die Einführung der Auto Start Stopp Funktion (ASSF) in Volumenmodellen der
BMW Group – Ein intelligenter Beitrag zur effizienten Dynamik.
Tagung „Moderne Elektronik in Kraftfahrzeugen“, Dresden: 2007.
- [Ouy06] *Z. Ouyang:*
Entwicklung eines Kfz-Generatormodells für den Einsatz in einem Hardware-in-
the-Loop-Bordnetzprüfstand. Diplomarbeit*, TU Dresden: 2006.
- [PAE07] *Post-autistic economics network:*
A Brief History of the Post-Autistic Economics Movement.
Online im Internet: www.paecon.net, 2007.
- [Per04] *D. J. Perreault, V. Caliskan:*
Automotive Power Generation and Control. IEEE Transactions on Power
Electronics Nr. , VOL. 19, NO. 3, 2004.

-
- [Pis07] *S. Pischinger (Hrsg.):*
Variable Ventilsteuerung – Konzepte zur Drehmomentverbesserung und zur Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Emissionen. Tagungsbeiträge, Aachen: Shaker Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8322-5910-5.
- [Prö08] *H. Pröbstle, O. Sirch:*
Systeme zur Stabilisierung der Bordnetzspannung. Tagung „Elektronik im Kraftfahrzeug“, Dresden: 2008.
- [Rec00] *B. Rech, B. Bäker:*
Verfahren zur Ansteuerung elektrischer Verbraucher. Patent-Offenlegung DE 198 38 48 A1, Wolfsburg: Volkswagen AG, 2000.
- [Rho96] *K. Rhode-Brandenburger:*
Verfahren zur einfachen und sicheren Abschätzung von Kraftstoffverbrauchspotentialen. Tagung „Einfluss von Gesamtfahrzeug-Parametern auf Fahrverhalten /Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch“, Essen: Haus der Technik, 1996.
- [Ris05] *S. Risse, H. Zellbeck:*
Vermessung BMW ## ohne Nebenaggregate mit extern betriebener Wasserpumpe. Zwischenbericht für BMW AG im Forschungsprojekt Energiemanagement, TU Dresden: 2005 (unveröffentlicht).
- [Riz99] *G. Rizzoni, L. Guzzella, B. Baumann:*
Unified Modeling of Hybrid Electric Vehicle Drivetrains. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, VOL. 4, NO. 3, 1999.
- [Ros05] *M. Rosenmayr, M. Schöllmann, F. Gronwald:*
Batteriediagnose mit dem Intelligenten Batteriesensor IBS. Tagung „Energiemanagement und Bordnetze“, Renningen: expert Verlag, 2005. – ISBN 3-8169-2466-2
- [Sal07] *A. Salzberg:*
Untersuchungen zur effizienten Energieerzeugung im Kraftfahrzeug. Studienarbeit*, TU Dresden: 2007.
- [Sal08] *A. Salzberg:*
Modellierung des Verhaltens von elektrochemischen Speichern im gesamten Arbeitsbereich für den Einsatz bei der Kfz-Bordnetzauslegung. Diplomarbeit, TU Dresden: 2008.
- [San97] *R.-P. Sanger (Hrsg.):*
Motor Vehicle Emission regulations and fuel specifications – part 2: detailed information and historic review (1970-1996). Bericht, Brüssel: CONCAWE, 1997. Online im Internet: www.concawe.net.
- [Sat06] *M. Sattler:*
Elektrische Antriebe für Hybridfahrzeuge im Spannungsfeld zwischen Standardisierung und optimaler Applikation. 3. Braunschweiger Symposium „Hybridfahrzeuge und Energiemanagement“, Braunschweig: GZVB e.V., Februar 2006.
- [Sau07] *D. U. Sauer:*
Batteriezustandserkennung: Mögliche Verfahrens- und Algorithmenansätze, Grenzen der Batteriezustandserkennung. Tagung „Energiemanagement und Bordnetze II“, Renningen: expert Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8169-2649-8

- [Sch06] *S. Schulte:*
Simulationsmethoden zur Analyse und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kraftfahrzeuggeneratoren. Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker-Verlag, 2006. – ISBN 3-8322-5417-X
- [Sch07a] *Ph. Schuricht, O. Cassebaum, B. Bäker:*
Sensorielle Umfelderfassung und Sensordatenfusion – Schlüsseltechnologien für das intelligente Auto der Zukunft. Tagung „Moderne Elektronik in Kraftfahrzeugen“, Dresden: 2007.
- [Sch07b] *M. Schmidt:*
Ein neues Energiemanagement-Konzept für das elektrische Bordnetz. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Ausgabe 1/2007, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007.
- [Sch88] *E. Schrey:*
Elektronische Leerlaufstabilisierung bei Ottomotoren. Dissertation, RWTH Aachen: 1988.
- [SMS07] *J. Schumann, U. Meyer, W. Ströbele:*
Grundzüge der mikroökonomischen Theorie. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2007. – ISBN 978-3-540-66081-X
- [Stol05] *J. Stolle:*
Anbindung eines Doppelschichtkondensator-Moduls an einen Hardware-in-the-Loop-Bordnetzprüfstand für das elektrische Energiemanagement im Kfz. Studienarbeit*, TU Dresden: 2005.
- [Ung07] *A. Unger, B. Bäker:*
Anwendungspotential heuristischer Methoden bei funktionsorientierter Fehlererkennung und Diagnose in vernetzten Fahrzeugsystemen. Tagung „Diagnose in mechatronischen Fahrzeugsystemen“, Haus der Technik, Essen: 2007.
- [Url94] *A. Urlaub:*
Verbrennungsmotoren: Grundlagen, Verfahrenstheorie, Konstruktion. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1994. – ISBN 3-540-58194-4
- [Usp04] *A. Uspenski:*
Konstruktion eines Generatorprüfstands. Konstruktionsbeleg*, TU Dresden: 2004.
- [Usp07] *A. Uspenski:*
Nachbildung des Leerlaufdrehzahlverhaltens eines Verbrennungsmotors am HiL-Bordnetzprüfstand. Großer Beleg*, TU Dresden: 2007.
- [Var06] *H. R. Varian:*
Intermediate Microeconomics. Seventh Edition. New York, London: W.W. Norton & Company, 2006. – ISBN 0-393-92702-4
- [Wag02] *R. Wagner:*
Bleibatterien – Neue Entwicklungen und zukünftige Einsatzbereiche. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, ISET e.V., Kassel: 2002.
- [Wai04] *M. Waidhas:*
Grundlegende Technologie von Doppelschichtkondensatoren. ZVEI-Workshop, Frankfurt: 2004.

-
- [Wal06] *H. Wallentowitz, K. Reif (Hrsg.):*
Handbuch Kraftfahrzeugelektronik. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2006.
– ISBN 3-528-03971-X
- [Weg07] *L. Weghaus:*
DC/DC-Wandler im Kraftfahrzeug. Tagung „Energiemanagement und Bordnetze II“, Renningen: expert Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8169-2649-8
- [Wil05] *S. Williamson, A. Emadi, (K. Rajashekara):*
Comparative Assessment of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Based on Comprehensive Well-to-Wheels Efficiency Analysis. IEEE Transactions in vehicular technology, Vol. 54, No. 3, May 2005.
- [Win03] *A. Winger:*
Möglichkeiten und Grenzen der Senkung des Energieaufwands beim Betrieb von PKW mit Hybridantrieb. Dissertation, TU Dresden: 2003.
- [WiN04] *S. Wied-Nebbeling:*
Preistheorie und Industrieökonomie. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2004. – ISBN 3-540-40282-9.
- [Win06] *K. Winde:*
Einsatz evolutionärer Algorithmen für das elektrische Energiemanagement im Kraftfahrzeug. Studienarbeit*, TU Dresden: 2006.
- [Zac00] *K. Zacharias:*
Die Rolle von Strombörsen in einem deregulierten Energiemarkt. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Allokationstheorie, TU Dresden: 2000.
- [Zub03] *M. Zuber:*
Energiemanagementvorrichtung und -verfahren zum Energiemanagement in einem Fahrzeug. Patent-Offenlegung DE 101 45 270 A1, Ingolstadt: Audi AG, 2003.

Hinweise:

- Betreute studentische Arbeiten sind mit einem Stern * gekennzeichnet.
- Unveröffentlichte Dokumente können nach Rücksprache eingesehen werden.

Lebenslauf

Stefan Büchner
geboren am 02.03.1977 in Dresden

Familienstand: verheiratet

Berufliche Tätigkeit

- seit 2007 Softwareingenieur bei M&P Dresden,
Motion Control and Power Electronics GmbH:
Entwicklung von Steuerungen und Regelungen für Geräte der
Leistungselektronik und Antriebstechnik
- 2003 – 2006 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei IAM Dresden,
Institute of Automotive Mechatronics GmbH:
Bearbeitung des Forschungsprojektes „Energiemanagement im Kfz“
im Auftrag der BMW AG, München

Studium

- 1997 – 2003 Studium Elektrotechnik an der TU Dresden,
Vertiefung Regelungs- und Automatisierungstechnik
Abschluss: Diplom
- Diplomarbeit Intelligente Steuerung des Lastwechsels im Kfz-Bordnetz
- Studienarbeit Konzepterstellung und Potentialabschätzung zur Bremsenergie-
rückgewinnung mit Hilfe eines konventionellen Generators im PKW

Schulbildung

- 1991 – 1996 St.-Benno Gmnasium, Dresden
Abschluss: Abitur
- 1993 – 1994 Crescent Valley High School, Corvallis (Oregon, USA)
- 1983 – 1991 117. Polytechnische Oberschule, Dresden