

Marc Hohmann

**Ein synthetischer Ansatz zur Auslegung von  
Kfz-Bordnetzen unter Berücksichtigung  
dynamischer Belastungsvorgänge**



---

Ein synthetischer Ansatz zur Auslegung von Kfz-Bordnetzen  
unter Berücksichtigung dynamischer Belastungsvorgänge

---

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

vorgelegt der

Fakultät für Informatik und Automatisierung

der Technischen Universität Ilmenau

von

**Dipl.-Ing. Marc Hohmann**

geb. am 14. November 1977 in Fulda

**vorgelegt am 5. Oktober 2009**

**Gutachter:** 1. Prof. Dr.-Ing. habil. C. Ament, Technische Universität Ilmenau  
2. Prof. Dr.-Ing. W. Geuer, Hochschule Fulda  
3. Prof. Dr.-Ing. habil. J. Petzoldt, Technische Universität Ilmenau

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2010000450



# *VORWORT*

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner mehrjährigen Tätigkeit bei der Daimler AG in Sindelfingen in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Ilmenau, Fakultät für Informatik und Automatisierung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. C. Ament für die Betreuung der Arbeit, die Anregungen und seine Unterstützung während dem gesamten Promotionsverfahren. Herr Ament hat mir während der Promotion immer hilfreich und offen für Fragen bei Seite gestanden.

Herr Prof. Dr.-Ing. W. Geuer gilt ebenfalls mein besonderer Dank für die Betreuung und Unterstützung seitens der Hochschule Fulda. Daneben möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. J. Petzold meinen Dank für die Begutachtung der Arbeit aussprechen. Herr Prof. Dr.-Ing. habil. J. Wernstedt, Herr Prof. Dr.-Ing. B. Cuno und Herr Prof. Dr.-Ing. B. Björnsson haben durch Ihren Einsatz meine Promotion erst ermöglicht. Hierfür bedanke ich mich ebenfalls herzlich.

Bei der Durchführung des Eignungsfeststellungsverfahrens an der Technischen Universität Ilmenau möchte ich neben Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. C. Ament auch Prof. Dr.-Ing. habil. W. Fengler, Prof. Dr.-Ing. habil. H.-U. Seidel und Prof. Dr.-Ing. D. Westermann nicht nur für die Abnahme der Prüfungen, sondern auch für die Unterstützung bei der Vorbereitung auf die Prüfungen danken.

Auch möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr. Grohmann für seine Unterstützung und die Möglichkeit zur Promotion in der Abteilung Bordnetzarchitekturen und Energiemanagement bei der Daimler AG danken. Im Blick auf der Arbeit bei der Daimler AG möchte ich für die hilfreiche fachliche und auch private Unterstützung insbesondere Marc Franzen, Gerhardt Hohn, Markus Hopf und Christian Seitz danken.

Ich danke meinen Eltern für ihre Unterstützung auf dem langen Weg bis zum heutigen Tag. Meiner Frau Tanja und meiner Tochter Lotta gilt ebenfalls ein besonderer Dank für die Geduld und das Verständnis, das Sie mir während dieser Zeit entgegen gebracht haben und den Mut, den sie mir immer wieder gemacht haben. Nicht zu vergessen, aber namentlich nur schwer aufzuzählen, sind auch alle Freunde und Verwandte, die ich in dieser Zeit vernachlässigt habe.



## *ZUSAMMENFASSUNG DER ARBEIT*

Bordnetze in Kraftfahrzeugen sind für die zuverlässige Funktion aller elektrischen und elektronischen Systeme verantwortlich. Die Entwicklung und Auslegung von Bordnetzen muss daher mit größter Sorgfalt erfolgen. Dynamischen elektrischen Großverbrauchern, die durch die zunehmende Elektrifizierung mechanischer und hydraulischer Komponenten entstehen, wurde dabei bislang nur wenig Beachtung geschenkt. Diese Verbraucher können in Bordnetzen Störungen verursachen, die die Funktionen von elektrischen und elektronischen Systemen beeinträchtigen können.

In dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz zur Auslegung von Bordnetzen unter Berücksichtigung dynamischer Belastungsvorgänge gezeigt, der es ermöglicht, Bordnetze bereits in einer frühen Phase der Entwicklung auf diese neuen Anforderungen hin anzupassen. Es wird dabei auf die Eigenschaften von Bordnetzen an sich und auf die Eigenschaft der Maßnahmen zur Stabilisierung von Bordnetzen eingegangen. Aus der Bewertung dieser Eigenschaften heraus wird eine Methode aufgezeigt, die die Auslegung von Bordnetzen unter Berücksichtigung dynamischer Großverbraucher ermöglicht.



## *ABSTRACT*

The electrical system in motor vehicles is responsible for the reliable operation of all electrical and electronic modules. Therefore the development and dimensioning of the electrical system must be done with utmost care. So far, there has been paid very little attention on heavy electrical loads with a dynamic behavior caused by the increasing electrification of mechanical and hydraulic components. These consumers may cause interferences to the functions of electrical and electronic modules.

In this work, a new approach to the design of electrical systems in motor vehicles is shown, taking account of dynamic processes that enable the electrical system already in an early phase of development to adapt on these new requirements. Moreover, the properties of the electrical system itself and the characteristics of the measures for stabilization of the electrical system are treated. On the basis of the evaluation of these properties a method is shown which makes possible the design of electrical systems under consideration of the heavy electrical loads with a dynamic behaviour.



# *INHALTSVERZEICHNIS*

VORWORT	V
ZUSAMMENFASSUNG DER ARBEIT	VII
ABSTRACT	IX
INHALTSVERZEICHNIS	XI
TABELLENVERZEICHNIS	XV
FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	XVII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Anforderungen und Zielsetzung .....	3
1.2 Aufbau der Arbeit.....	3
2 KFZ-BORDNETZE	7
2.1 Aufgaben und Anforderungen .....	8
2.2 Grundelemente von Bordnetzen .....	8
2.2.1 Bordnetzmanagement.....	10
2.3 Bordnetzarchitekturen .....	13
2.3.1 Vorgehensweise zur Entwicklung von Bordnetzarchitekturen.....	14
2.3.2 Ableitung der Topologievorgaben .....	14
2.3.3 Komponentenauswahl und -dimensionierung .....	16
2.3.4 Entwurf / Anpassung von Bordnetztopologien .....	17
2.3.5 Bewertung von Bordnetzarchitekturen .....	19
3 SENSITIVITÄTSANALYSE VON BORDNETZEN	21
3.1 Ursachen von Spannungsschwankungen.....	21
3.2 Komfortrelevante Sensitivität .....	23
3.2.1 Visuelle Auswirkungen .....	24
3.2.2 Grenzwerte für die komfortrelevante Sensitivität .....	25
3.3 Funktionale Sensitivität.....	26
3.3.1 Grenzwerte für die funktionale Sensitivität .....	27
4 VORGEHENSWEISE ZUR UNTERSUCHUNG DYNAMISCHER BELASTUNGSVORGÄNGE IN BORDNETZEN	31

---

4.1	Untersuchung dynamischer Belastungsvorgänge durch Nachstellung am Fahrzeug.....	32
4.2	Modellbasierter Ansatz zur Untersuchung dynamischer Belastungsvorgänge ....	32
5	MODELLIERUNG VON BORDNETZSTRUKTUREN	35
5.1	Anforderungen an die Modellierung.....	36
5.2	Modellierungsmethoden.....	36
5.2.1	Physikalische Modellierung .....	37
5.2.2	Phänomenologische Modellierung.....	37
5.2.3	Hybride Modellierung .....	38
5.3	MultiLayer-Modellstruktur .....	39
5.3.1	Allgemeiner Modellansatz .....	39
5.3.2	Anwendung auf Bordnetzstrukturen .....	41
5.4	Modellgenerierung .....	43
5.4.1	Generierungsumgebung.....	44
5.4.2	Textbasierter Ansatz.....	46
5.4.3	Befehlsbasierter Ansatz .....	48
5.4.4	Ansatz über parametrierbares Mastermodell .....	48
6	ANALYSE UND MODELLIERUNG DER BORDNETZKOMPONENTEN	53
6.1	Kfz-Generatoren .....	54
6.1.1	Aufbau und Funktionsweise.....	54
6.1.2	Thermische Betrachtungen.....	57
6.1.3	Statische Leistungsfähigkeit.....	65
6.1.4	Dynamische Leistungsfähigkeit.....	75
6.1.5	Reglerfunktionen .....	79
6.1.6	Modellbildung.....	81
6.2	Kfz-Batterien .....	83
6.2.1	Aufbau und Funktionsweise.....	85
6.2.2	Thermische Betrachtungen.....	86
6.2.3	Statische Leistungsfähigkeit.....	86
6.2.4	Dynamische Leistungsfähigkeit.....	87
6.2.5	Modellbildung.....	88
6.3	Komponenten zur Energieverteilung.....	90
6.3.1	Eigenschaften und Modellierung von Leitungen.....	91
6.3.2	Eigenschaften und Modellierung von Sicherungen, Kontaktstellen und Schaltelementen.....	94

---

6.4	Elektrische Verbraucher.....	94
6.4.1	Klassifizierung von Verbrauchern.....	95
6.4.2	Eigenschaften von Sensoren.....	95
6.4.3	Eigenschaften und Modellierung von Steuergeräten.....	95
6.4.4	Eigenschaften und Modellierung spannungsgesteuerter Aktoren.....	97
6.4.5	Eigenschaften und Modellierung leistungsgeregelter Aktoren.....	98
6.4.6	Leistungskategorien von Verbrauchern.....	99
6.5	Hochstromverbraucher.....	101
6.5.1	Definition.....	102
6.5.2	Prüfvorschrift.....	102
6.5.3	Modellbildung.....	105
7	SIMULATIONSGESTÜTZTE ANALYSE DYNAMISCHER BELASTUNGSVORGÄNGE IN BORDNETZEN.....	107
7.1	Szenarienauswahl.....	107
7.1.1	Lastszenarien.....	108
7.1.2	Szenarien der Energieversorgung.....	111
7.2	Szenarienanalyse.....	112
7.2.1	Auswertung der Simulationsergebnisse.....	112
7.2.2	Validierung der Szenarienanalyse.....	114
8	VORGEHENSWEISE ZUR UNTERSUCHUNG UND BEWERTUNG SPANNUNGSSTABILISIERENDER MAßNAHMEN.....	117
8.1	Verfahren zur Darstellung und Bewertung von Stabilisierungsmaßnahmen.....	117
9	MAßNAHMENKATALOG ZUR STABILISIERUNG VON SPANNUNGEN.....	121
9.1	Dezentrale passive Spannungsstabilisierung.....	121
9.2	Dezentrale aktive Spannungsstützung.....	125
9.3	Auslegungsvorschriften für Komfortverbraucher.....	126
9.3.1	Begrenzung der Stromgradienten.....	126
9.3.2	Funktionsdegradierung.....	127
9.4	Anpassung der Batteriedynamik.....	127
9.5	Anpassung der Generatordynamik.....	128
9.5.1	Anpassung der Reglerdynamik.....	128
9.5.2	Anpassung der Maschinendynamik.....	129
9.6	Optimierung der Bordnetztopologie.....	129
9.7	Optimierung der Betriebsstrategien von Hochstromverbrauchern.....	130

9.8	Maßnahmen durch das Bordnetzmanagement .....	131
9.8.1	Vorhalten von Leistungsreserven des Generators .....	132
9.8.2	Vorsteuern des Generators .....	133
9.9	Inselnetzbildung.....	134
9.10	Einsatz hochdynamischer Energiespeicher.....	135
9.11	Einsatz von Energiewandlersystemen .....	137
9.12	Gegenüberstellung der Maßnahmen .....	138
10	SYNTHETISCHER ANSATZ ZUR AUSLEGUNG VON KFZ-BORDNETZEN	141
10.1	Auswahl geeigneter Stützmaßnahmen mit Anwendungsbeispiel.....	141
11	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	147
	QUELLENVERZEICHNIS	149

## TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 2.1 Aus den Anforderungen des Kunden an das Fahrzeug abgeleitete Anforderungen an Bordnetze.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabelle 3.1 Funktionale Spannungsbereiche an den Komponenten für nicht startrelevante Komponenten.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabelle 6.1 Parameter der Approximationsgleichung des drehzahlabhängigen Temperaturanteils.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabelle 6.2 Parameter <math>n_{Rob}</math>, <math>T_U</math> und <math>T_0</math> sowie der zugehörigen Parameter <math>p_I</math> der Approximationsgleichung des stromabhängigen Temperaturanteils.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 6.3 Parameter der Approximationsgleichung der Temperaturabhängigkeit von <math>p_I</math> für zwei Umgebungstemperaturen.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabelle 6.4 Übersicht der ermittelten Parameter für das Temperaturmodell der Statorwicklung.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabelle 6.5 Übersicht einiger wichtiger Größen zur Beschreibung des statischen Zustandes von Batterien.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabelle 6.6 Abmessungen und Parameter von untersuchten Leitungen.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabelle 6.7 Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Werte der Leitungsparameter.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabelle 6.8 Beschreibung der Leistungskategorien von Verbrauchern.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabelle 7.1 Aktivitätsmatrix von beispielhaften Hochstromverbrauchern eines Fahrzeugs bei Standardbetrieb. Den verschiedenen Betriebszuständen des Fahrzeugs sind die Aktivitäten der Hochstromverbraucher zugeordnet.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabelle 7.2 Aktivitätsmatrix von beispielhaften Hochstromverbrauchern eines Fahrzeugs bei Stopp/Start-Betrieb. Den verschiedenen Betriebszuständen des Fahrzeugs sind die Aktivitäten der Hochstromverbraucher zugeordnet.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabelle 7.3 Beispielhafte Kombinationsmatrix für die zuvor aufgelisteten Aktivitäten der Hochstromverbraucher für ein Fahrzeug mit Stopp/Start-Funktion.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabelle 7.4 Beispielhafte Kombinationsmatrix der Energieversorgungsszenarien. Der Batteriezustand „warm“ wurde mit aufgenommen, da die Stopp/Start-Funktion vom Bordnetzmanagement nur bei entsprechend gutem Batteriezustand zugelassen wird. Daher wird hier auch nur die Kombination mit „Generator aus“</i>	

<i>berücksichtigt. Die für die Untersuchungen ausgewählten Kombinationen sind mit Buchstaben gekennzeichnet, auf die im Folgenden verwiesen wird. ....</i>	<i>112</i>
<i>Tabelle 7.5 Beispielhafte Kombinationsmatrix zur Minimierung der kritischen Szenarien. Die Buchstaben in den Feldern verweisen auf die Szenarien der Energieversorgung aus Tabelle 7.4, die zusammen mit den jeweiligen Lastkombinationen zu prüfen sind. ....</i>	<i>113</i>
<i>Tabelle 9.1 Gegenüberstellung der Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung. ....</i>	<i>140</i>

# FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Hinweis: Die Formelzeichen sind hier allgemein angegeben. In der Arbeit werden sie durch Indizes den speziellen Größen zugeordnet. Die Bedeutung der einzelnen Indizes wird in den Abschnitten erläutert, in denen sie eingeführt werden.

$A$	Leiterquerschnitt	[mm <sup>2</sup> ]
$C$	Kapazität	[F]
$d$	Durchmesser	[m]
$g$	Gewichtungsfaktor	[1]
$G$	Leitwert	[1/Ω]
$E$	elektrische Feldstärke	[V/m]
$h$	Höhe / Abstand	[m]
$I$	Strom	[A]
$\vec{I}$	Stromvektor	[A]
$k$	Kenngröße	[%]
$l$	Länge	[m]
$L$	Induktivität	[H]
$M$	Gegeninduktivität	[H]
$n$	Drehzahl	[1/min]
$p$	Polpaarzahl	[1]
$P$	Leistung	[W]
$Q$	Ladungsmenge	[A·s]
$R$	Widerstand	[Ω]
$S$	Stromdichte	[A/mm <sup>2</sup> ]
$t$	Zeit bzw. Zeitpunkt	[s]
$T$	Temperatur	[°C]
$U$	Spannung	[V]
$x$	Regeldifferenz	[V]
$\vartheta$	Temperaturanteil	[K]
$\tau$	Zeitkonstante	[s]
$\phi$	magnetischer Fluss	[V·s]
$\chi$	spezifische Leitfähigkeit	[1/Ω·m]
$\Psi$	Flussverkettung	[V·s]

$\omega$	Kreisfrequenz	[1/s]
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$2,99 \cdot 10^8$ m/s
$\alpha_{Cu}$	Temperaturkoeffizient von Kupfer	0,0039 1/s
$\chi_{Al}$	spezifische Leitfähigkeit von Aluminium	$36 \text{ m}\Omega \text{ mm}^{-2}$
$\chi_{Cu}$	spezifische Leitfähigkeit von hochreinem Kupfer	$58 \text{ m}\Omega \text{ mm}^{-2}$
B+	Bezeichner der positive Anschlussklemme des Gleichrichters des Generator	
B-	Bezeichner der negative Anschlussklemme des Gleichrichters des Generator	
CAN	Controller Area Network	
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid	
DF	Bezeichner der „Dynamo Feld“ Anschlussklemme des Generatorreglers	
DFM	Bezeichner der „Dynamo Feld Monitor“ Anschlussklemme des Generatorreglers	
E/E	Elektrik/Elektronik	
ISG	Integrierter Startergenerator	
Kfz	Kraftfahrzeug	
L	Bezeichner der Anschlussklemme „Lampenendstufe“ des Generators	
LED	Lumineszenz-Diode	
LIN	Local Interconnect Network	
SOC	State of Charge (Ladezustand)	
V	Bezeichner der Anschlussklemme „Phasenanschluss“ des Generators	
VDA	Verband der Automobilindustrie	





# 1 EINLEITUNG

Aktuelle Veränderungen bei den elektrischen Systemen in Kraftfahrzeugen stellen neue Herausforderungen an die Entwicklung und die Auslegung von Kfz-Bordnetzen. Bei der zunehmenden Elektrifizierung mechanischer und hydraulischer Komponenten und den damit verbundenen innovativen Funktionalitäten sind es weniger die hohen Energiemengen, als die großen, kurzzeitig benötigten elektrischen Leistungen, die neue Anforderungen an die Energieversorgung stellen. Eine Studie der Robert Bosch AG (Abbildung 1.1) bestätigt den rasanten Anstieg dieser elektrischen Systeme.

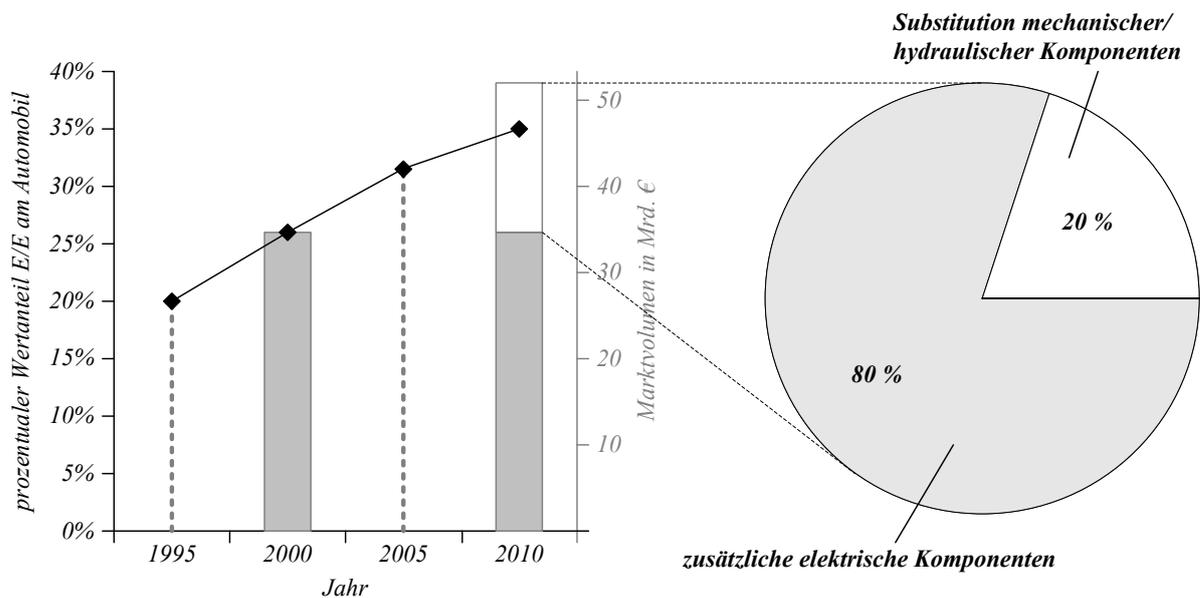
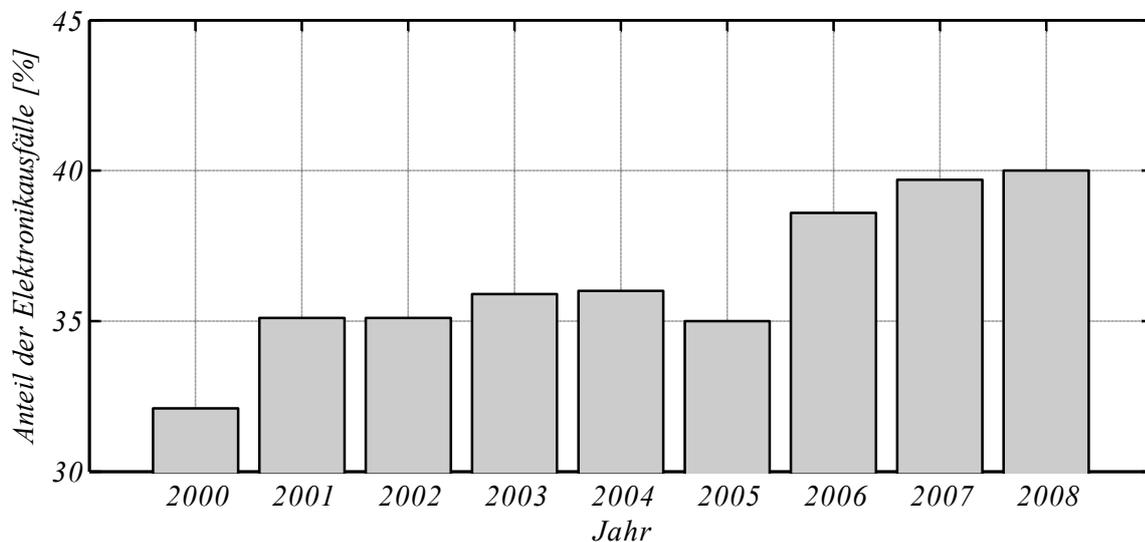


Abbildung 1.1 Prognostizierter Anstieg des Marktvolumens elektrischer/elektronischer (E/E) Komponenten in Kraftfahrzeugen [Bos07].

Die Umstellung von mechanischen auf elektrische Komponenten ist durch die ökologische Betrachtung der einzelnen Systeme entstanden. Durch die hiermit realisierbaren bedarfsgerechten Betriebsstrategien dieser Systeme, auch als „power on demand“ bezeichnet, wird eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verbrennungsmotors erreicht. Da die hiervon betroffenen Systeme maßgeblich am Fahrverhalten des

Fahrzeugs beteiligt sind, steigt somit auch die Anforderung an die Zuverlässigkeit von Bordnetzen.

Demgegenüber steht jedoch, dass die Leistungsfähigkeiten der verfügbaren Energieversorgungs-komponenten statisch und dynamisch begrenzt sind und bereits jetzt an ihre Grenzen stoßen. Diese Tatsache wird auch durch die vom ADAC jährlich herausgegebene Pannenstatistik bestätigt, bei der Ausfälle der Fahrzeugelektrik aktuell einen Anteil von 40 % haben. Bereits seit mehreren Jahren ist die Fahrzeugelektrik für den größten Teil der Fahrzeugausfälle verantwortlich und es ist hierbei, wie Abbildung 1.2 zeigt, ein immer noch steigender Trend zu erkennen.



*Abbildung 1.2 Auszüge aus den ADAC-Pannenstatistiken von 2000 bis 2008. Der prozentuale Wert gibt an, wie stark die Fahrzeugelektrik an Fahrzeugausfällen beteiligt war.*

Für eine Erhöhung der statischen Leistungsfähigkeit der Energieversorgungs-komponenten könnten theoretisch größer dimensionierte Komponenten mit gleicher Technologie eingesetzt werden. Praktisch wird diese Anpassung jedoch durch den vorhandenen Bauraum, die Kosten und das Gewicht begrenzt. Um eine Erhöhung der dynamischen Leistungsfähigkeit zu erreichen, müssen neue Technologien verwendet werden, was neben den erheblich steigenden Kosten auch durch den aktuellen Entwicklungsstand begrenzt wird.

Ein weiterer Faktor, der der Zuverlässigkeit von Bordnetzen gegenüber steht, ist die steigende Komplexität von Bordnetzen. Mit der Zunahme der elektrischen Systeme in Fahrzeugen steigt die strukturelle Komplexität von Bordnetzen überproportional zur

Anzahl der Systeme an [Bod06]. Der technische Fortschritt in der Automobilindustrie erhöht somit das Potential für Funktionseinschränkungen und -ausfälle.

### *1.1 Anforderungen und Zielsetzung*

An die Entwicklung und Auslegung von Bordnetzen wird die Forderung gestellt, dass alle elektrischen/elektronischen Systeme in allen Situationen, in denen sie benötigt werden, ihre Funktionen erfüllen. Zu den Funktionen zählen z.B. das Verstellen von Aktoren, verschiedene Beleuchtungsfunktionen und die Kommunikation mit anderen elektronischen Systemen. Um diese Anforderung zu erfüllen, ist es eine Voraussetzung, das dynamische Verhalten von Bordnetzen und der beteiligten Komponenten ausreichend genau zu kennen. Zusätzlich ist eine detaillierte Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Energieversorgungskomponenten und den elektrischen Verbrauchern notwendig, um die Funktionalität aller Systeme in jedem Betriebszustand sicherstellen zu können. Neben den funktionalen Beeinträchtigungen müssen bei den Auswirkungen dynamischer Belastungsvorgänge im Bordnetz aber auch komfortrelevante Einschränkungen betrachtet werden. Wahrnehmbaren Spannungsschwankungen im Bordnetz muss entgegengewirkt werden, um den hohen Qualitätsanforderungen an die Fahrzeuge, besonders im Oberklassensegment, gerecht zu werden.

Diese Arbeit soll einen Ansatz zeigen, wie Verbraucher mit hohen, kurzzeitigen Leistungsaufnahmen verträglich in Fahrzeugbordnetze integriert werden können. Hierfür ist die Analyse der Auswirkungen dieser Verbraucher auf das gesamte Bordnetz sowie die Analyse der möglichen Maßnahmen zur Stabilisierung der Spannung erforderlich. Aus der Synthese der Ergebnisse dieser beiden Untersuchungen gilt es, Stabilisierungsmaßnahmen zu finden, die es mit geringem Aufwand ermöglichen, die Auswirkungen der angesprochenen Verbraucher auf das Bordnetz zu minimieren und dem Kunden somit die innovativen Funktionen dieser Verbraucher zugänglich zu machen.

### *1.2 Aufbau der Arbeit*

Die folgenden Kapitel zeigen neben einem Überblick über die aktuelle Situation, eine systematische Vorgehensweise zur Auslegung von Bordnetzen unter Berücksichtigung dynamischer Belastungsvorgänge. Die Analyse der Systeme erfolgt dabei in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die Eigenschaften aktueller Bordnetze untersucht und im zweiten Schritt werden die Auswirkungen spannungsstabilisierender Maßnahmen analysiert. Die Synthese der beiden Untersuchungsergebnisse wird dann zur Auslegung von Bordnetzen herangezogen.

In Kapitel 2 wird zunächst die Entwicklung von Bordnetzen, von einfachen Systemen aus den Anfängen der Automobilindustrie, bis hin zu heutigen, hochkomplexen Systemen aufgezeigt. Nach der Vorstellung der Grundelemente von Bordnetzen und der Erläuterung der Aufgaben von und den Anforderungen an Bordnetze wird ein Einblick in die Architekturentwicklung gegeben. Die Aufgaben und Funktionen des Bordnetzmanagements, was für aktuelle Bordnetze ein wichtiger Bestandteil geworden ist, werden in einem separaten Unterkapitel behandelt.

Um festzustellen wie Bordnetze auf diese dynamischen Belastungsvorgänge reagieren wird in Kapitel 3 die Sensitivität von Bordnetzen untersucht. Hier werden die Grenzen bestimmt, ab denen es zu Störungen in Bordnetzen kommen kann. Die Analyse wird dabei in die funktionale und die wahrnehmbare Sensitivität unterteilt. In diesem, wie auch in den folgenden Kapiteln, liegt der Schwerpunkt immer auf der Dynamik der Systeme bzw. den Auswirkungen dynamischer Belastungsvorgänge auf die Systeme.

Nach der Betrachtung des gesamten Bordnetzes wird nun das Augenmerk auf die Ursachen und Auswirkungen dynamischer Belastungsvorgänge gelegt. In Kapitel 4 wird zunächst eine Vorgehensweise beschrieben, wie an die Problemstellung herangegangen werden kann. Es werden mögliche Ansätze zur Untersuchung dynamischer Belastungsvorgänge in komplexen Bordnetzstrukturen betrachtet.

In Kapitel 5 wird der aus dem vorherigen Kapitel hervorgehenden Notwendigkeit der Modellierung von Bordnetzen genüge getan. Aus den Anforderungen an die Simulation und den möglichen Modellierungsmethoden wird hier eine speziell auf diese Anwendung angepasste Modellstruktur erarbeitet und auf Bordnetzstrukturen angewendet. Im Anschluss daran wird ein Algorithmus entwickelt, der aus den Vorgaben für das Bordnetz ein Modell mit der zuvor vorgestellten Struktur generiert. Die Notwendigkeit einer Modellgenerierung ist aus den Anforderungen an die Simulation entstanden.

Für die Modellierung der einzelnen Systeme sind detaillierte Untersuchungen des statischen und besonders des dynamischen Verhaltens notwendig. In Kapitel 6 werden die Grundelemente von Bordnetzen auf diese Eigenschaften hin untersucht. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen werden anschließend Modelle für die einzelnen Systeme erstellt. Bei den Verbrauchern erfolgt zusätzlich noch eine Klassifizierung, aus der unter anderem die so genannten „Hochstromverbraucher“ hervorgehen, die in dieser Arbeit eine wichtige Rolle spielen.

Im Anschluss an die Analyse und Modellierung von Bordnetzen und deren Komponenten, wird in Kapitel 7 eine simulationsgestützte Analyse dynamischer Belastungsvorgänge in Bordnetzen durchgeführt. Hierbei werden die zu analysierenden Szenarien

ermittelt und auf die Einhaltung der in Kapitel 3 bestimmten Spannungsgrenzen hin untersucht.

Nachdem die dynamischen Belastungsvorgänge in komplexen Bordnetzstrukturen analysiert wurden, müssen jetzt die Maßnahmen untersucht werden, die die Auswirkungen dieser Vorgänge minimieren. In Kapitel 8 wird hierfür eine Vorgehensweise zur Visualisierung und Bewertung der Auswirkungen spannungsstabilisierender Maßnahmen vorgestellt.

In einem Maßnahmenkatalog in Kapitel 9 werden die einzelnen Stabilisierungsmaßnahmen analysiert und bewertet. Eine Gegenüberstellung der Maßnahmen gibt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften der einzelnen Maßnahmen.

Abschließend erfolgt in Kapitel 10 die Synthese der gewonnenen Erkenntnisse, aus der Analyse der Bordnetze und der Stabilisierungsmaßnahmen, zu einem neuen Auslegungskriterium für Bordnetze. Es wird eine Vorgehensweise für die Auswahl geeigneter spannungsstabilisierender Maßnahmen vorgestellt.

In Kapitel 11 werden ein Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse sowie ein Ausblick auf die daraus resultierenden Möglichkeiten bei der Auslegung von Bordnetzen gegeben.



## 2 KFZ-BORDNETZE

Der Begriff „Bordnetz“ wurde im Zusammenhang mit dem Automobil erstmals Anfang des 20. Jahrhunderts verwendet. In den Anfängen der elektrischen Systeme in Kraftfahrzeugen in den 1910er Jahren bestand ein Bordnetz aus einer Batterie, einem Generator, der Magnetzündung mit Zündkerzen, einem Anlasser, einer Scheinwerferanlage, einem Schaltmodul und der zugehörigen Verkabelung. Zu dieser Zeit waren dies alle elektrischen Elemente in Kraftfahrzeugen. Auch bei aktuellen Fahrzeugen zählen zu dem System „Bordnetz“ die Gesamtheit aller elektrischer/elektronischer Hardwareelemente (E/E-Komponenten) sowie das Bordnetzmanagement als Softwareelement. Helmut Bode hat in seinem Buch [Bod06] die Definition eines Systems folgendermaßen beschrieben:

*„Unter einem System ist die Gesamtheit von Objekten (Elementen) zu verstehen, die sich in einem ganzheitlichen Zusammenhang befinden. Durch ihre Wechselbeziehungen untereinander grenzen sie sich gegenüber ihrer Umgebung ab. Die Kopplungen der einzelnen Objekte untereinander sind wesentlich stärker, als die Kopplungen bzw. Wechselwirkungen zur Umwelt.“*

Neben den Energieversorgungs-, Energieverteilungskomponenten und den Verbrauchern gehört nach dieser Definition auch die Kommunikationsstruktur zum System des Bordnetzes. Auf Grund der Komplexität der für die Kommunikation zwischen den einzelnen Steuergeräten benötigten Hard- und Softwareumfänge wird dieses Themengebiet heutzutage jedoch gesondert unter dem Begriff Vernetzung behandelt [Wal06]. In anderer Literatur werden zur Trennung der Themengebiete auch die Begriffe Energiebordnetz und Kommunikationsbordnetz verwendet.

Im Folgenden werden die Aufgaben und Anforderungen an Bordnetze und die Grundelemente von Bordnetzen beschrieben. Darauf folgend wird noch ein Einblick in Bordnetzarchitekturen und deren Entwicklung gegeben.

## 2.1 Aufgaben und Anforderungen

Die Aufgabe des Bordnetzes ist die Bereitstellung aller Funktionen der verbauten elektrischen und elektronischen Systeme in allen Situationen, in denen sie benötigt werden. Die Funktionen der Systeme sind hierbei sehr vielfältig. Es gehören unter anderem Überwachungsfunktionen, die Verstellung von Aktoren und die Kommunikation mit anderen Systemen dazu. Die Bereitstellung der Funktionen muss unter Einhaltung verschiedener Anforderungen erfüllt werden, die durch den Anspruch der Kunden an die Fahrzeuge gestellt werden. In Tabelle 2.1 sind die Anforderungen an das Bordnetz, abgeleitet aus den Anforderungen der Kunden, aufgeführt.

*Tabelle 2.1 Aus den Anforderungen des Kunden an das Fahrzeug abgeleitete Anforderungen an Bordnetze.*

<i>Anforderung des Kunden an das Fahrzeug</i>	<i>Abgeleitete Anforderung an das Bordnetz</i>
Funktionsbereitstellung	Verfügbarkeit ausreichender Energie in allen Situationen
Niedriger Anschaffungspreis	Geringe Kosten
Niedrige Unterhaltskosten	Niedriger Energieverbrauch
Gute fahrdynamische Eigenschaften	Geringes Gewicht und optimale Gewichtsverteilung der Bordnetzkomponenten
Großes Innenraumvolumen	Geringe Baugröße der Komponenten
Hoher Komfort	Minimierung der komfortrelevanten Auswirkungen des Bordnetzes (z.B. Lichtflackern)

Die sich mit der Zeit ändernden Gewichtungen der Anforderungen, z.B. verursacht durch hohe Kraftstoffpreise, bedingen neue Entwicklungen und angepasste Strategien bei der Auslegung von Bordnetzen. Zusätzlich wird die Auslegung von Bordnetzen durch die immer weiter steigende Anzahl elektrischer und elektronischer Komponenten im Fahrzeug eine immer komplexer werdende Aufgabe.

## 2.2 Grundelemente von Bordnetzen

Bei einem Fahrzeugbordnetz handelt es sich um ein autarkes System, dem von außen keine elektrische Energie zugeführt wird. Daher muss die elektrische Energie im Fahrzeug aus anderen Energieformen erzeugt werden. Die Rotationsenergie des Verbrennungsmotors hat sich bereits in den Anfängen der Automobilentwicklung hierfür als geeignet erwiesen. Die erste in Kraftfahrzeugen benötigte elektrische Energie

wurde durch einen Gleichstromgenerator als Nebenaggregat des Verbrennungsmotors erzeugt. Die Energie wurde zu dieser Zeit nur für den Betrieb der Lichtanlage benötigt. Aus dieser ersten Anwendung heraus stammt auch der historische Begriff Lichtmaschine [Mey02]. Bis heute sind Generatoren die am meisten verbreiteten Energieerzeuger in Fahrzeugen mit einem Verbrennungsmotor.

In der frühen Zeit der Automobilindustrie wurden die Motoren mit Magnetzündsystemen betrieben, für die kein Energiespeicher notwendig war. Erst mit der Einführung der Unterbrecherzündung wurde bereits beim Starten des Verbrennungsmotors eine Fremdversorgung des Zündsystems notwendig. Hierfür wurden Bleibatterien verwendet, die in optimierter Form auch heute noch eingesetzt werden. Bei aktuellen Bordnetzentwicklungen stößt man mit dieser Speichertechnologie jedoch an die Grenzen der Anforderungen, die an moderne Bordnetze gestellt werden. Zum Ausgleichen von Leistungsspitzen werden dynamischere Energiespeicher benötigt, die sich zusätzlich noch durch eine hohe Leistungsdichte auszeichnen sollten. Aktuelle Entwicklungen für geeignete Energiespeicher konzentrieren sich auf die Lithium-Ionen Technologie und Doppelschichtkondensatoren. Energiespeicher beider Technologien stehen aktuell kurz vor ihrer Serieneinführung. Gleichzeitig werden aber durch die Einführung der Stopp /Start Funktionalität und der Hybridtechnologie größere Energiespeicher benötigt, um auch bei stehendem Verbrennungsmotor große Energiemengen zur Verfügung stellen zu können. Der Energiespeicher versorgt bei Hybridfahrzeugen einen zusätzlichen elektrischen Antrieb und wird durch Wandlung von Bremsenergie in elektrische Energie wieder geladen. Hierfür werden wegen ihrer hohen Energiedichte momentan Nickel-Metallhydrid Batterien verwendet. Die Entwicklungen konzentrieren sich für diese Anwendung jedoch auch auf die Lithium-Ionen Technologie.

Auch bei der Energieverteilung haben sich die Anforderungen im Laufe der Zeit geändert. Wo anfangs noch wenige Meter Leitungen in Fahrzeugen verbaut wurden, sind es heute mehrere hundert Meter, die alleine für die Energieversorgung der Komponenten benötigt werden. Signal- und Kommunikationsleitungen sind hierbei noch nicht berücksichtigt. Bei den Materialien kommen neben den bisher verwendeten Kupferleitungen auf Grund des geringeren Gewichts vermehrt Aluminiumleitungen zum Einsatz. Für die Steuerung der Energieflüsse werden elektromechanische und elektronische Schalter eingesetzt. Durch die Weiterentwicklung der elektronischen Schalter werden diese zunehmend auch bei großen Schaltströmen verwendet.

*Bei den elektrischen Verbrauchern sind die Aufgaben und Einsatzgebiete sehr viel-fältig geworden. Im Vergleich zu dem in*

Abbildung 2.1 dargestellten Bordnetz aus den 1930er Jahren sind mit der Zeit immer mehr Verbraucher im Komfortbereich, wie z.B. elektrische Fensterheber oder die Heckscheibenheizung, hinzugekommen. In aktuellen Fahrzeugen werden zunehmend Verbraucher, die aktiv die Insassensicherheit erhöhen, sowie Verbraucher, die einen Einfluss auf die Fahrdynamik haben, verbaut. Auch Verbraucher, die während der Standphase des Fahrzeugs Energie benötigen, wie z.B. Diebstahlwarnanlagen und Funkschließsysteme sind heutzutage nicht mehr wegzudenken. All diese Systeme stellen jeweils unterschiedliche Anforderungen an das Bordnetz.

Damit das Zusammenspiel aller Komponenten im Bordnetz funktioniert, wird eine auf die Energieversorgung angepasste Norm ausgegeben, in der die elektrischen Systemleistungsanforderungen für alle elektrischen/elektronischen Komponenten stehen. Diese Schnittstelle zwischen den Energieversorgungskomponenten und den elektrischen/elektronischen Verbrauchern gehört ebenfalls zum Bordnetz. Hierin sind z.B. die Spannungsbereiche angegeben, in denen die Komponenten ihre Funktion erfüllen müssen. Je exakter diese Norm spezifiziert ist, desto unproblematischer wird die Zusammenführung der Systeme zu dem Gesamtsystem Bordnetz.

Ein weiteres Grundelement moderner Bordnetze ist das Bordnetzmanagement, dessen Aufgabengebiet immer umfangreicher wird. Auf die Aufgaben und Funktionen des Bordnetzmanagements wird daher im folgenden Abschnitt noch genauer eingegangen.

### **2.2.1 Bordnetzmanagement**

Moderne Bordnetze verfügen zusätzlich über ein Bordnetzmanagement, das Diagnose- und Energieverwaltungsfunktionen beinhaltet. Die Aufgabe des Bordnetzmanagements ist es, einen Beitrag zur Erfüllung der Aufgaben und Anforderungen aus Abschnitt 2.1 zu leisten.

Über Diagnosefunktionen kann das Bordnetzmanagement die Zuverlässigkeit des Bordnetzes erhöhen. Durch prädiktive Maßnahmen, z.B. bei vorhersehbaren hohen Belastungszuständen der Energieversorgungselemente, können Überlastungen des Bordnetzes und somit auch Funktionsausfälle verhindert werden. Durch Diagnosefunktionen können auch die Alterungszustände der Energieversorgungselemente überwacht werden. Je nach Zustand der Komponenten kann die Betriebsstrategie des Bordnetzes angepasst werden, um die Lebensdauer der Komponenten zu verlängern bzw. dem Fahrer frühzeitig Informationen über bevorstehende Wartungsarbeiten geben zu können.

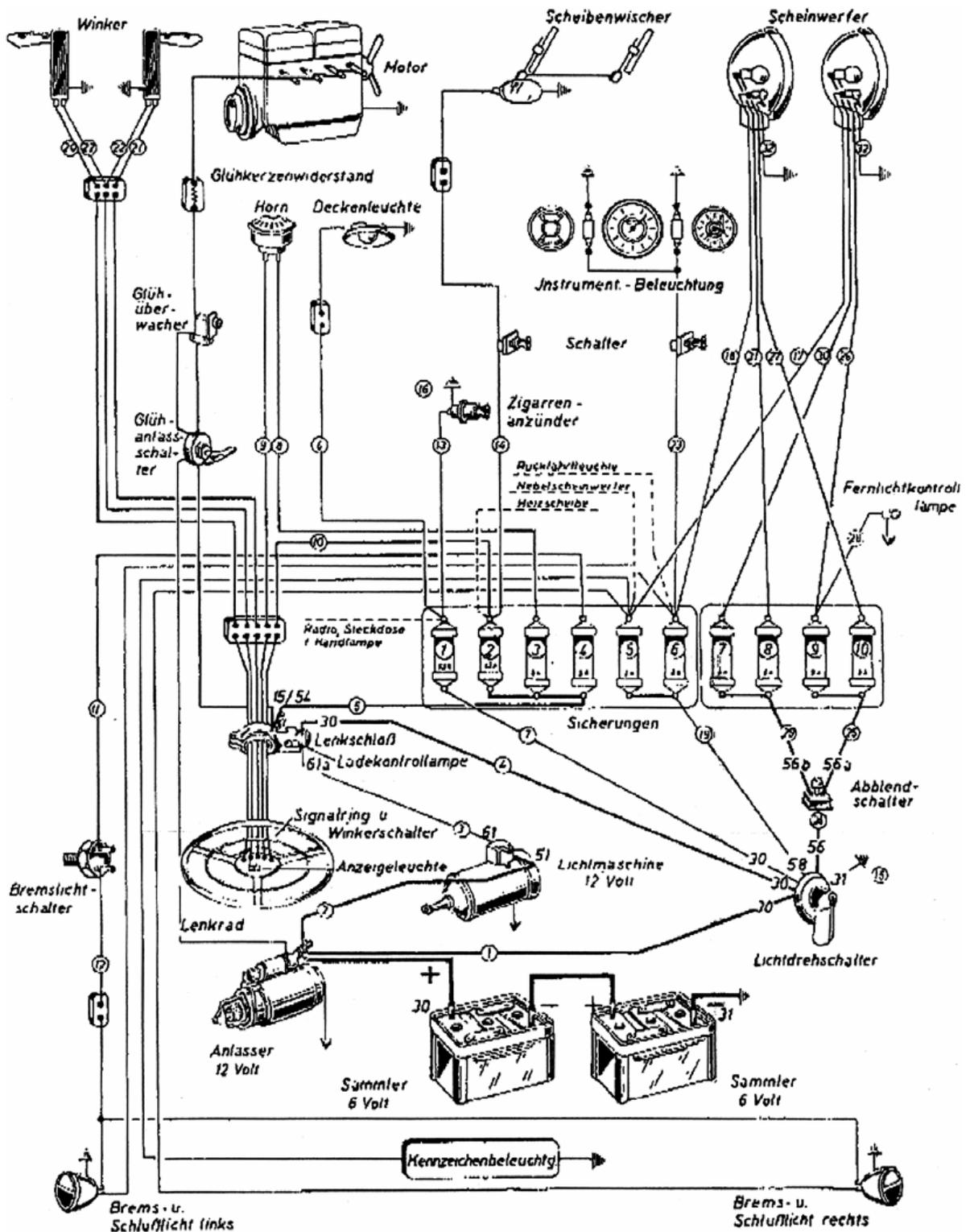


Abbildung 2.1 Bordnetz eines Mercedes V170 Diesel aus den 1930er Jahren [Rei07].

Eine Kostenreduzierung kann durch das Bordnetzmanagement ebenfalls erreicht werden. Durch Funktionen, die dazu beitragen, dass die Energieversorgungskomponenten effektiver ausgenutzt werden, können ggf. Einsparungen bei der Dimensionierung der Komponenten gemacht werden. Ein weiteres Beispiel zur Kosteneinsparung ist die Implementierung eines dynamischen Lastmanagements. Hierbei muss der Generator nicht auf die maximale, sondern nur auf eine mittlere benötigte Leistung ausgelegt werden. Komfortfunktionen wie z.B. die Heckscheibenheizung werden hierbei kurzzeitig abgeschaltet, um Energie für andere Systeme freizugeben.

Durch einen ökologisch sinnvollen Betrieb der Energieversorgungskomponenten und Funktionen wie z.B. Rekuperation, bei der ein Teil der Bremsenergie des Fahrzeugs in elektrische Energie gewandelt wird, können durch das Bordnetzmanagement auch CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden. Eine im Mittel eingesparte elektrische Leistung von 100 W entspricht dabei einer Emissionseinsparung von etwa 2,4g CO<sub>2</sub>/km, was einem Kraftstoffverbrauch von etwa 0,1 l/100km entspricht.

Die hier genannten Maßnahmen sind nur Beispiele für die Nutzung des Bordnetzmanagements. Aktuell besteht ein Bordnetzmanagement bereits aus einer Vielzahl, teilweise sehr komplexer Funktionen, die speziell auf die jeweiligen Fahrzeugtypen abgestimmt sind. In Abbildung 2.2 ist das Zusammenspiel des Bordnetzmanagements mit den anderen Komponenten des Bordnetzes dargestellt.

Die im Fahrzeug eingesetzten Energiequellen haben ein integriertes Steuergerät und können hierüber die benötigten Informationen über den Betriebszustand und den Status verschiedener Parameter an das Bordnetz übermitteln. Die Zustandsinformationen von Energiespeichern können über spezielle Sensormodule übermittelt werden, die direkt an den Energiespeichern angebracht sind. Da diese Sensormodule ausschließlich für das Bordnetzmanagement verwendet werden, müssen deren Kosten über die Einsparungen durch das Bordnetzmanagement kompensiert werden bzw. durch eine höhere Funktionalität gerechtfertigt werden. Steuergeräte haben bereits integrierte Kommunikationsbausteine und bieten die Möglichkeit, verschiedene Status- und Zustandsinformationen über angeschlossene Aktoren und Sensoren zu übermitteln. Über Steuersignale können durch das Bordnetzmanagement auch die Betriebsstrategien oder die aktuellen Zustände angeschlossener Aktoren beeinflusst werden. Schaltelemente in den Energieversorgungsleitungen können ebenfalls vom Bordnetzmanagement angesteuert werden. Je nach Einsatz der Schaltelemente haben diese teilweise auch eine integrierte Diagnoseelektronik, die Status- und Zustandsinformationen an das Bordnetzmanagement übermitteln kann.

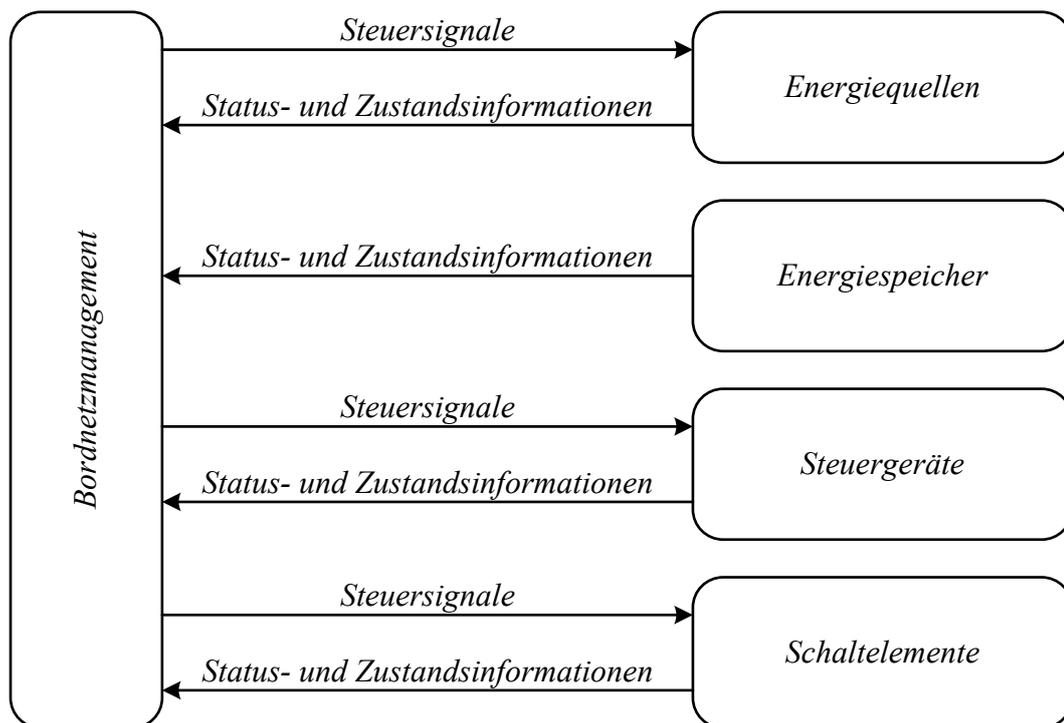


Abbildung 2.2 Informations- und Signalfluss zwischen dem Bordnetzmanagement und den betroffenen Komponenten des Bordnetzes.

### 2.3 Bordnetzarchitekturen

Der Begriff Architektur wird erst seit wenigen Jahren in Verbindung mit dem Bordnetz verwendet. Der aus dem Bauwesen stammende Begriff kommt aus dem griechischen und kann mit „*grundlegendem Handwerk*“ oder auch „*grundlegender Kunst*“ übersetzt werden. Im technischen Bereich wird der Begriff gegenwärtig für den Bauplan von Systemen verwendet. Booch, Rumbaugh und Jacobsen, Pioniere auf dem Gebiet des objektorientierten Softwareentwurfs, haben die Architektur in [Boo99] folgendermaßen definiert:

*„An architecture is the set of significant decisions about the organization of a (software) system, the selection of the structural elements and their interfaces by which the system is composed, together with their behavior as specified in the collaborations among those elements, ...“*

Für die Bordnetzentwicklung bedeutet diese Definition, dass neben der Bordnetztopologie an sich auch alle Vorgaben, die die Bordnetztopologie beeinflussen, zur Bordnetzarchitektur gehören. Die Auswahl der Komponenten mit deren topologischer Anordnung, unter Berücksichtigung des physikalischen und funktionalen Zusammen-

spiels der beteiligten Komponenten, sind hiernach ebenfalls der Bordnetzarchitektur zuzuordnen.

### ***2.3.1 Vorgehensweise zur Entwicklung von Bordnetzarchitekturen***

Die Entwicklung von Bordnetzen ist ein iteratives Verfahren, bei dem man sich langsam dem Optimum annähert. Der gesamte Ablauf kann in mehrere, getrennt voneinander zu behandelnde Vorgänge unterteilt werden. Der Ableitung der Topologievorgaben folgen der Entwurf der Bordnetztopologie, die Komponentenauslegung und -dimensionierung und die Bewertung der Bordnetzarchitektur. In allen Entwicklungsschritten müssen die Anforderungen an das Bordnetz berücksichtigt werden, da diese die grundlegenden Merkmale und Eigenschaften vorgeben.

Nach jedem Durchlauf der beiden Schritte Topologieentwurf und Komponentenauswahl mit ihrer Dimensionierung wird die Bordnetzarchitektur bewertet und geprüft, ob weitere Verbesserungen erforderlich bzw. möglich sind. Ist in keinem Entwicklungsschritt eine Verbesserung möglich und erfüllt die Architektur die Anforderungen an das Bordnetz, so kann die Architektur für die Serienentwicklung freigegeben werden. Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise ist der Ablauf in Abbildung 2.3 grafisch dargestellt.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Entwicklungsschritte genauer erläutert. Es wird dabei nur die grundlegende Vorgehensweise beschrieben und mit einigen Beispielen hinterlegt. Es kann hier kein allgemeingültiger Architekturentwurf gemacht werden, da die Architektur für ein bestimmtes Fahrzeug immer auf dessen spezielle Vorgaben und Anforderungen abgestimmt werden muss.

### ***2.3.2 Ableitung der Topologievorgaben***

Um die Verfügbarkeit ausreichender Energie in allen Situationen sicherzustellen, müssen alle elektrischen und elektronischen Komponenten so angeordnet werden, dass an ihrem Einbauort die in den elektrischen Systemleistungsanforderungen vorgegebenen Spannungsgrenzen eingehalten werden können, d.h. die Spannungsabfälle zwischen den Energieversorgungselementen und den Verbrauchern müssen bei der topologischen Anordnung berücksichtigt werden. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass man bei der Entwicklung von Bordnetzen meist keinen Einfluss mehr auf die Konstruktion des Rohbaus eines Fahrzeugs hat. Für den Topologieentwurf bedeutet dies, dass hierdurch konstruktionsbedingte Einschränkungen entstehen. Die möglichen Wege zur Verlegung der Versorgungsleitungen im Fahrzeug sind weitgehend festgelegt. Auch die Bauräume für die Komponenten der Energieversorgung und -verteilung sind eingeschränkt. Funktionsbedingt sind auch die topologischen

Anordnungen vieler Verbraucher im Fahrzeug bereits festgelegt. Aktoren, wie z.B. ein elektrischer Fensterheber, werden mit den zugehörigen Steuergeräten sinnvollerweise in der Nähe des Ortes ihres Wirkung untergebracht.

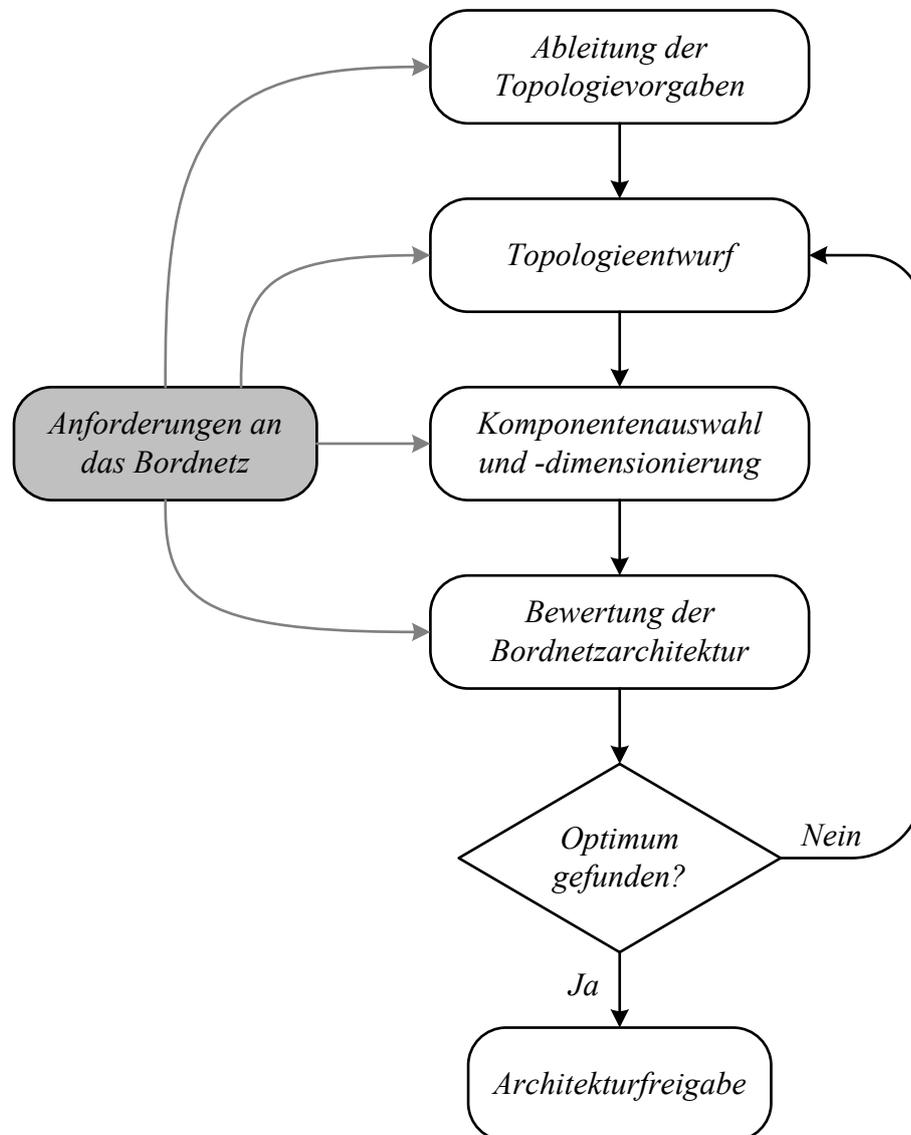


Abbildung 2.3 Ablaufdiagramm der Vorgehensweise zur Entwicklung von Bordnetzarchitekturen.

Aus den Anforderungen an Bordnetze aus Abschnitt 2.1 können ebenfalls Vorgaben für die Topologie abgeleitet werden. Die Anforderungen an geringe Kosten, geringes Gewicht und einen niedrigen Energieverbrauch bedingen eine intelligente Anbindung aller Verbraucher an das Energieversorgungssystem. Auch bei den Energieversorgungskomponenten selbst sollte auf eine ökologisch und funktionell sinnvolle Struktur geachtet werden, um den Anforderungen an eine ausreichende Energieversorgung in

allen Betriebssituationen gerecht zu werden. Eine bislang wenig beachtete Anforderung an das Bordnetz ist die Minimierung der komfortrelevanten Auswirkungen des Bordnetzes. Auch hier kann durch die topologisch günstige Anordnung von sensitiven Verbrauchern den komfortrelevanten Störungen entgegengewirkt werden.

### **2.3.3 Komponentenauswahl und -dimensionierung**

Die Komponentenauswahl kann nur in einem begrenzten Rahmen erfolgen. Es handelt sich hierbei hauptsächlich um die Energieversorgungskomponenten, da die zu integrierenden Verbraucher in Fahrzeugen meist vorgegeben werden. In speziellen Fällen kann die Bordnetzarchitektur aber auch einen Einfluss auf die Auswahl der Verbraucher haben. Stehen z.B. die Zusatzkosten, die für die Auslegung der Energieversorgung benötigt werden, und der Nutzen eines zu integrierenden Systems in keinem Verhältnis, so muss der Einsatz dieses Systems überdacht werden.

Die Energiequellen und -speicher müssen so gewählt werden, dass ihre statische und dynamische Leistungsfähigkeit ausreichend ist, um in allen Situationen die gewünschten Funktionen der elektrischen und elektronischen Systeme bereitstellen zu können. Energiespeicher müssen zusätzlich so dimensioniert sein, dass ihre Kapazitäten den gestellten Anforderungen genügen. Ein Beispiel hierfür ist das Vorhalten einer ausreichenden Energiemenge für die Überbrückung einer gewünschten Mindestzeit des Fahrzeugs, nach der ein Motorstart noch möglich sein soll. Als Nebenanforderungen werden noch geringe Kosten, Gewichte und Baugrößen sowie ein hoher Wirkungsgrad der einzelnen Komponenten gefordert. Da sich diese Nebenanforderungen teilweise widersprechen, muss der bestmögliche Kompromiss bei der Auswahl der Komponenten gefunden werden.

Die Dimensionierung der Leitungsquerschnitte erfolgt auf Grund der Stromtragfähigkeit und des maximal zulässigen Spannungsabfalls. Gerade bei der Tatsache, dass die häufigste Ursache für Fahrzeugbrände Kabelbrände sind, müssen alle Leitungen so ausgelegt sein, dass sie sich bei den maximalen Strömen  $I_{max}$ , die über diese Leitungen fließen können, nicht unzulässig erwärmen. Bei höheren Strömen müssen Leitungsschutzeinrichtungen, wie z.B. Schmelzsicherungen, eingreifen. Leitungen können jedoch auch eigensicher ausgelegt werden. D.h. wegen der begrenzten Leistungsfähigkeit der Energieversorgungskomponenten kann es durch die Dimensionierung der Leitungsquerschnitte  $A$  zu keiner unzulässigen Erwärmung kommen. Die zulässige Stromdichte  $S_z$  im Leiter wird nicht überschritten. Daraus folgt für den Leitungsquerschnitt

$$A \geq \frac{I_{\max}}{S_z} \tag{2.1}$$

Für die Funktionserfüllung wird die Anforderung an die Energieverteilung gestellt, die zulässigen Spannungsabfälle von den Energiewandlern und Energiespeichern zu den Verbrauchern einzuhalten. Eine kostenoptimale Auslegung kann über die anforderungsgemäße Dimensionierung der Leitungsquerschnitte und Leitungslängen sowie über die Dimensionierung und Anordnung von Schaltelementen erfolgen. Die emissionsoptimale Auslegung beinhaltet die gleichen Punkte wie bei der kostenoptimalen Auslegung, jedoch mit dem Ziel der Gewichtsreduzierung. Des Weiteren ist die Verbindung zwischen Batterie und Generator so zu wählen, dass eine effektive Ladung der Batterie erfolgen kann.

**2.3.4 Entwurf/Anpassung von Bordnetztopologien**

Die Herausforderung beim Entwurf einer Bordnetztopologie ist es, die im vorherigen Abschnitt angesprochenen Topologievorgaben zu berücksichtigen. Neben dem grundlegenden Vorgehen beim Entwurf von Bordnetztopologien werden hier optionale Möglichkeiten für den Topologieentwurf beschrieben.

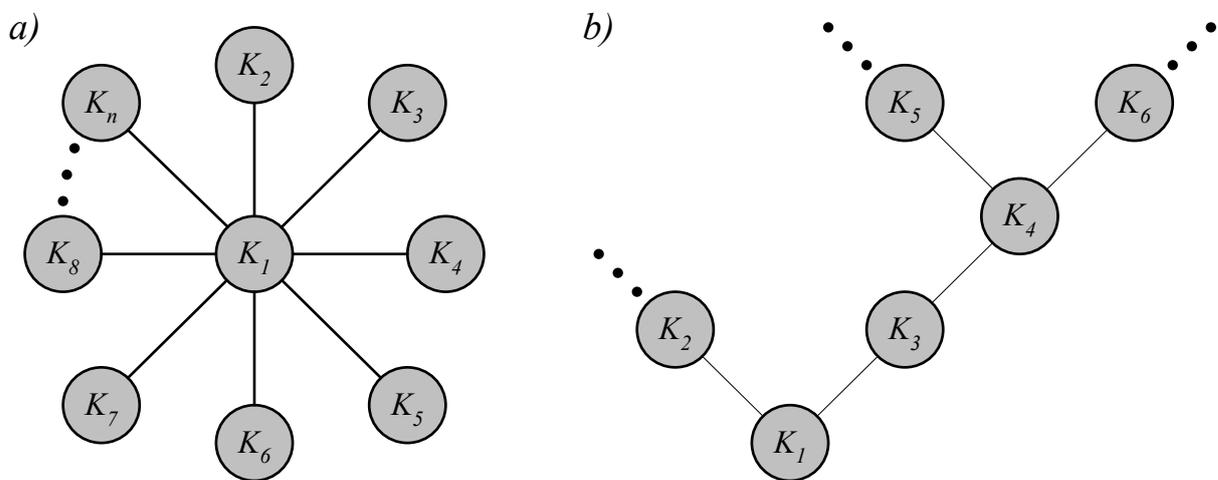


Abbildung 2.4 Basistopologie einer sternförmigen Verteilung (a) und einer baumförmigen Verteilung (b) der Komponenten  $K_1$  bis  $K_n$ .

Um die Funktionalität eines Bordnetzes darzustellen, können meist mehrere Basis-topologien herangezogen werden. Im Folgenden werden zwei dieser Topologien angesprochen und die jeweilige Anwendung erläutert.

Bordnetze mit wenigen elektrischen Verbrauchern werden meist in sternförmiger Topologie (Abbildung 2.4a), ausgehend vom Energiespeicher, aufgebaut. Moderne

Bordnetze besitzen jedoch eine große Anzahl von Verbrauchern, für die die sternförmige Topologie nicht mehr geeignet ist. Die dabei benötigten Leitungen zur Energieversorgung aller Verbraucher wären im Fahrzeug nicht mehr unterzubringen. Mit steigender Anzahl von Verbrauchern ist man daher zu einer baumförmigen Struktur (Abbildung 2.4b) übergegangen. Die Energieverteilung erfolgt hierbei über wenige Leitungen zu mehreren Verteilerblöcken, die örtlich sinnvoll im Fahrzeug untergebracht sind. An diesen Verteilerblöcken sind alle elektrischen Systeme aus dem jeweils zugeordneten Bereich angeschlossen. Ein System kann dabei wiederum aus einem Steuergerät zur Energieverteilung und mehreren Aktoren bestehen. In Abbildung 2.5 ist eine beispielhafte Anordnung von Verteilerblöcken dargestellt.

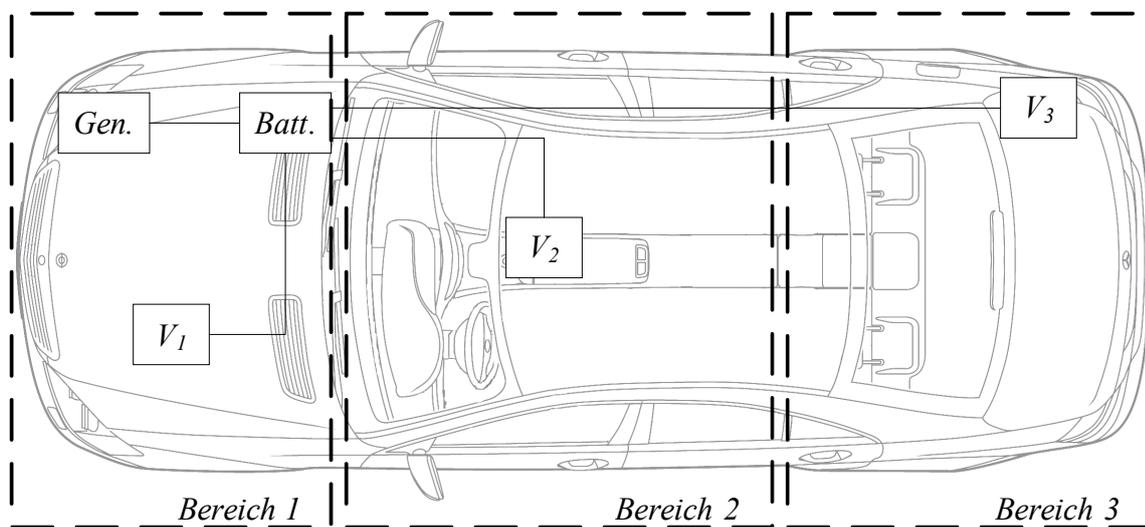


Abbildung 2.5 Beispielhafte Anordnung von Verteilerblöcken ( $V_1$ ,  $V_2$  und  $V_3$ ) in einem Fahrzeug, mit einem Generator als Energiequelle und einer Batterie als Energiespeicher. Dabei sind alle elektrischen Verbraucher im Bereich 1 dem Verteilerblock  $V_1$ , im Bereich 2 dem Verteilerblock  $V_2$  und im Bereich 3 dem Verteilerblock  $V_3$  zugeordnet.

Aus den Topologievorgaben gehen eine ökologisch und funktionell sinnvolle Struktur der Energieversorgungskomponenten und die intelligente Anbindung der Verbraucher mit einer topologisch günstigen Anordnung sensibler Verbraucher hervor.

Eine ökologisch und funktionell sinnvolle Struktur des Bordnetzes bedeutet, dass Energiespeicher möglichst niederohmig an die Energiequellen angebunden werden sollten, um eine effektive Ladung des Energiespeichers zu erreichen. Bei den Einbauorten der Energieversorgungskomponenten sollten auch die Umgebungstemperaturen berücksichtigt werden, die einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten.

Eine intelligente Anbindung der Verbraucher bedeutet, dass Verbraucher die dauerhaft einen hohen Leistungsbedarf haben, niederohmig an die Energiequelle angeschlossen werden sollten und Verbraucher, die dynamisch hohe Leistungen fordern, niederohmig an den Energiespeicher angebunden werden sollten.

Die topologisch günstige Anordnung sensitiver Verbraucher kann durch die Trennung dieser Verbraucher von dynamischen Großverbrauchern erfolgen. Hierfür kann z.B. eine duale Versorgung der in Abbildung 2.5 gezeigten Verteilerblöcke eingeführt werden, bei der eine Versorgungsleitung ausschließlich für den Anschluss sensitiver Verbraucher verwendet wird.

### 2.3.5 Bewertung von Bordnetzarchitekturen

Zur Bewertung von Bordnetzarchitekturen muss überprüft werden, in wie weit die Anforderungen an das Bordnetz aus Abschnitt 2.1 erfüllt werden.

Die Anforderungen an das Bordnetz können nicht alle zu hundert Prozent erfüllt werden, da sie sich teilweise widersprechen. Zum Beispiel bedingen Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen meist zusätzlich Kosten für das Bordnetz. Auch die Gewichtsreduzierung kann meist nur durch die Verwendung anderer Materialien oder Technologien erreicht werden, die ebenfalls höhere Kosten verursachen. Aus diesem Grund muss hier ein Bewertungssystem eingeführt werden, das einen Vergleich verschiedener Bordnetzarchitekturen ermöglicht.

Bei der Bewertung von Bordnetzarchitekturen spielt die Gewichtung der einzelnen Anforderungen an das Bordnetz eine tragende Rolle. Hierfür wird für jede Anforderung jeweils ein Gewichtungsfaktor eingeführt, der angibt, wie stark diese Anforderung das Bordnetz beeinflussen soll. Aus den Gewichtungsfaktoren  $g_0 \dots g_n$  und den Größen  $k_{A0} \dots k_{An}$ , die angeben, zu wie viel Prozent die jeweilige Anforderung erfüllt wird, kann die Bewertungskenngröße  $k_B$  für Bordnetzarchitekturen ermittelt werden.

$$k_B = \frac{g_0 \cdot k_{A0} + g_1 \cdot k_{A1} + \dots + g_n \cdot k_{An}}{g_0 + g_1 + \dots + g_n} \quad (2.2)$$

Die Kenngröße  $k_B$  ist ein prozentualer Wert, der angibt, in wie weit diese Architektur die Anforderungen an das Bordnetz erfüllt. Sie kann zum Vergleich verschiedener Bordnetzarchitekturen herangezogen werden.



# 3 *SENSITIVITÄTSANALYSE VON BORDNETZEN*

Ein stabiles Bordnetz ist ebenso wie das Fahrverhalten ein Qualitätsmerkmal für Fahrzeuge. Große Spannungsschwankungen, die z.B. durch das Schalten von großen elektrischen Leistungen verursacht werden, können sich in Fehlverhalten elektrischer /elektronischer Systeme auswirken. Anhand der Auswirkungen von Spannungsschwankungen wird die Sensitivität von Bordnetzen in die komfortrelevante Sensitivität und die funktionale Sensitivität unterteilt. Die komfortrelevante Sensitivität von Bordnetzen legt die Grenzen fest, ab denen die Spannungsschwankungen wahrnehmbar werden. Die funktionale Sensitivität hingegen legt die Grenzen fest, ab denen es zu Systemausfällen kommen kann. Im Folgenden wird zunächst anhand von stark vereinfachten Modellen gezeigt, wodurch es im Bordnetz zu Spannungsschwankungen kommen kann.

## *3.1 Ursachen von Spannungsschwankungen*

Für die Grenzen, ab denen ein Spannungseinbruch komfortrelevante oder funktionale Auswirkungen hat, sind die Tiefe und die Dauer des Einbruchs bestimmend. Diese beiden Parameter hängen vom Leistungs- bzw. Strombedarf der angeschlossenen elektrischen Verbraucher und den Eigenschaften der Energieversorgungskomponenten ab. Anhand eines Beispielszenarios werden nachfolgend die Ursachen von Spannungsschwankungen erläutert.

In dem Beispielszenario in Abbildung 3.1 ist mit stark vereinfachten Ersatzschaltbildern ein einfaches Bordnetz dargestellt. Es besteht aus einer Batterie, einem Generator, einem Lastwiderstand, der die Grundlast des Bordnetzes abbildet, und einem elektrischen Großverbraucher, der ebenfalls als ohmscher Widerstand modelliert ist. Das Ersatzschaltbild zeigt ein Szenario vor der Zuschaltung eines elektrischen Großverbrauchers.

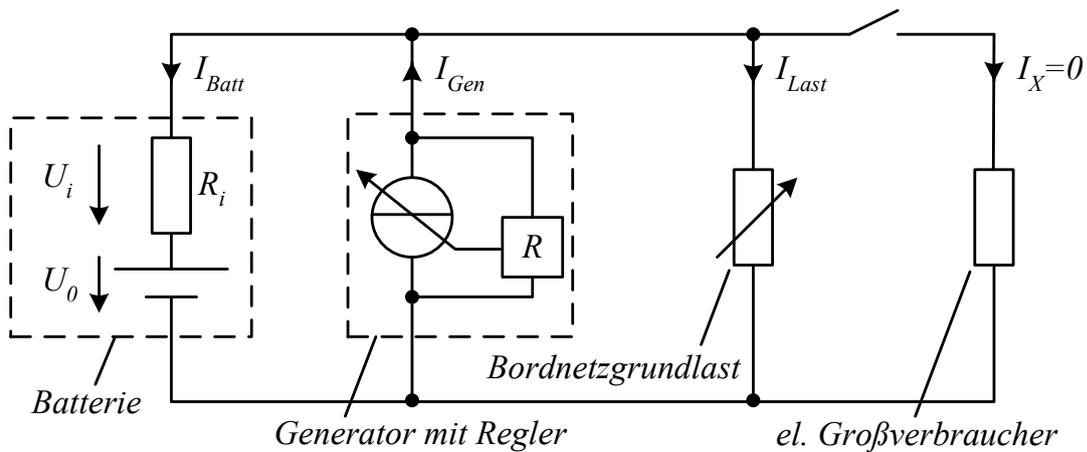


Abbildung 3.1 Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines beispielhaften Bordnetzes vor der Zuschaltung eines elektrischen Großverbrauchers.

Wird zum Zeitpunkt  $t_0$  der elektrische Großverbraucher zugeschaltet, kommt es zu einer sprunghaften Leistungsanforderung im Bordnetz. Der Generator, hier vereinfacht als spannungsgesteuerte Stromquelle dargestellt, kann diesen Leistungsbedarf auf Grund seiner begrenzten Dynamik nur verzögert ausgleichen. Die Batterie, hier vereinfacht als Spannungsquelle mit Innenwiderstand dargestellt, muss in diesem Fall den benötigten Strom liefern. Die Spannung  $U_i$  am Innenwiderstand der Batterie wird negativ und es kommt zu einem Spannungseinbruch im Bordnetz, bis der Generator die benötigte Leistung aufbringt.

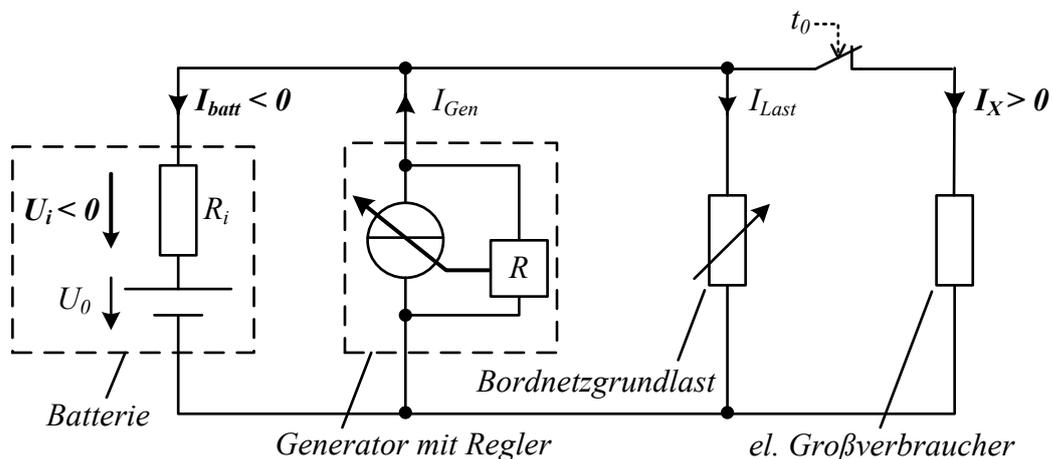


Abbildung 3.2 Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines beispielhaften Bordnetzes nach der Zuschaltung eines elektrischen Großverbrauchers.

Diese Zusammenhänge werden durch das vereinfachte Ersatzschaltbild nach der Zuschaltung eines elektrischen Großverbrauchers in Abbildung 3.2 nochmals verdeutlicht. Im Folgenden wird untersucht, wie die verschiedenen Verbraucher auf diese

Spannungsschwankungen reagieren und wo die Grenzen liegen, ab denen es zu komfortrelevanten und funktionalen Auswirkungen kommen kann.

### 3.2 Komfortrelevante Sensitivität

Die durch das Bordnetz verursachten komfortrelevanten Auswirkungen können visuell, auditiv oder haptisch über die Sinne des Menschen wahrgenommen werden. Es handelt sich bei diesen Auswirkungen nicht um Funktionsausfälle der betroffenen Komponenten, sondern um die Änderungen ihrer Systemperformance. In aktuellen Fahrzeugen gibt es eine Vielzahl von Komponenten, bei denen Spannungsänderungen wahrnehmbar werden können. Um einige Beispiele hierfür zu zeigen, sind in Abbildung 3.3 verschiedene Verbraucher dieser Kategorie eingezeichnet.

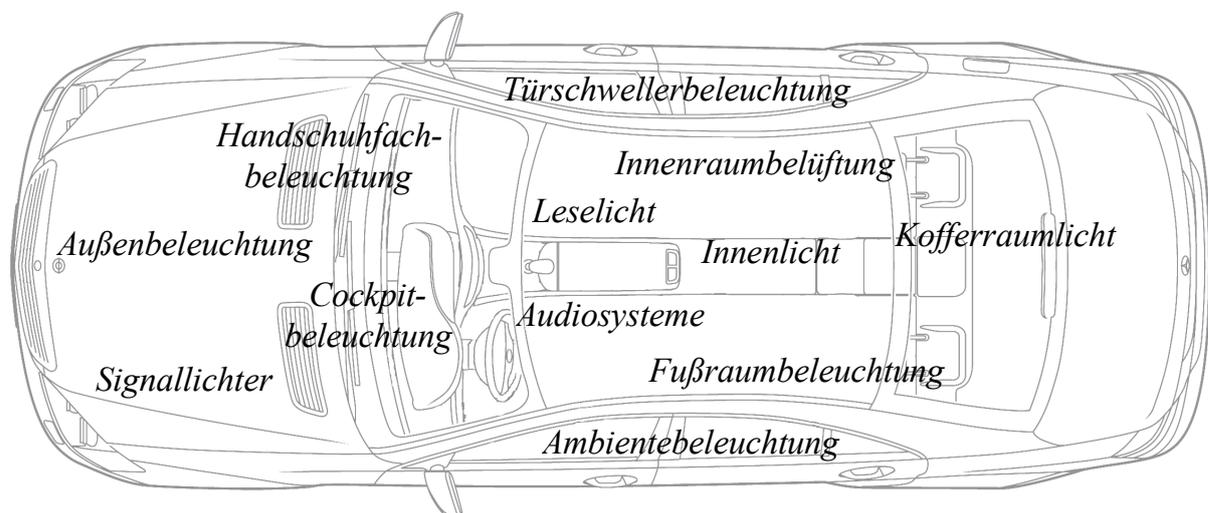


Abbildung 3.3 Beispielhafte Auflistung wahrnehmbarer komfortrelevanter Verbraucher in einem Oberklassefahrzeug.

Wie in Abbildung 3.3 zu sehen ist, sind es größtenteils Komponenten mit visuellen Auswirkungen, die zu Komforteinschränkungen führen. Komfortrelevante auditive Auswirkungen von Bordnetzschwankungen werden nur durch wenige Verbraucher hervorgerufen. Beispielsweise können diese Auswirkungen im Fahrzeug über die Lüftung bzw. das Gebläse wahrgenommen werden. Wie hoch dieser Geräuschpegel ist, hängt von der Gebläseleistung und der Geräuschdämmung ab. Die Geräusche durch das Gebläse entstehen insbesondere durch die Strömungsgeräusche in den Lüftungskanälen [Wör08]. Die Minimierung der wahrnehmbaren auditiven Auswirkungen liegt daher eher im konstruktiven Bereich. Haptische Auswirkungen sind im Fahrzeug kaum bekannt. Eine haptische Auswirkung kann z.B. ein erhöhtes Handmoment am Lenkrad beim Einsatz einer elektrischen Lenkung sein. In der Praxis ist

diese Änderung jedoch so gering, dass sie nicht wahrnehmbar ist und nur über Messtechnik bestimmt werden kann.

Um die Grenzen zu bestimmen, ab der die Spannungsschwankungen wahrnehmbar sind, wird auf Grund dieser Tatsachen im Folgenden die Sensitivität speziell von Verbrauchern mit visuellen Auswirkungen untersucht. Da viele dieser Verbraucher ein dynamisches Verhalten aufweisen, werden sowohl die Dauer als auch die Amplituden der Spannungseinbrüche betrachtet.

### **3.2.1 Visuelle Auswirkungen**

Als visuelle Auswirkung von Spannungsschwankungen kann in Fahrzeugen das Flackern der verschiedenen Anzeige- und Beleuchtungseinrichtungen erkannt werden. Zur Untersuchung der Sensitivität müssen die unterschiedlichen Technologien der Leuchtmittel einzeln betrachtet werden. In Fahrzeugen werden aktuell im Innenraum zum Großteil Glühlampen eingesetzt. Jedoch kommt die LED auf Grund ihres geringen Energieverbrauchs auch hier verstärkt zum Einsatz. Bei der Außenbeleuchtung kommen die drei Technologien Glühlampen, Xenon-Lampen und LED-Lampen zum Einsatz. Zur Bestimmung der visuellen Sensitivität müssen die Grenzen der empfindlichsten Komponenten ermittelt werden. Xenon- und LED-Lampen benötigen eine Ansteuerelektronik, die eine Leistungsregelung enthält. Daher werden bei diesen beiden Technologien Spannungsschwankungen im Bordnetz direkt lokal ausgeglichen. Die empfindlichsten Komponenten bezüglich der visuellen Auswirkungen sind daher die Glühlampen. Diese werden im Folgenden genauer untersucht.

In Abbildung 3.4 wurden für die Innenraumbeleuchtung und die Außenbeleuchtung Kennlinien der Spannungseinbrüche über die Dauer der Einbrüche aufgenommen, ab denen die Spannungseinbrüche wahrnehmbar werden. Die Messungen für die Innenraumbeleuchtung wurden an der Dachbedieneinheit und die Messungen für die Außenbeleuchtung am Abblendlicht durchgeführt. Für die Bestimmung der Grenze, ab denen die Spannungseinbrüche wahrnehmbar werden, wurde bei den Messungen eine definierte Änderung der Beleuchtungsstärke als Erkennungskriterium gewählt. Der Wert für die als Grenzwert verwendete Änderung der Beleuchtungsstärke wurde durch eine Probandenstudie, aus einem Personenkreis verschiedener Altersklassen ermittelt. Die Auswertung der Messungen ergibt, dass bei Spannungseinbrüchen kleiner 0,2 V kein Lichtflackern mehr erkannt wird. Das Gleiche gilt auch für Spannungseinbrüche mit einer Dauer kleiner 20 ms.

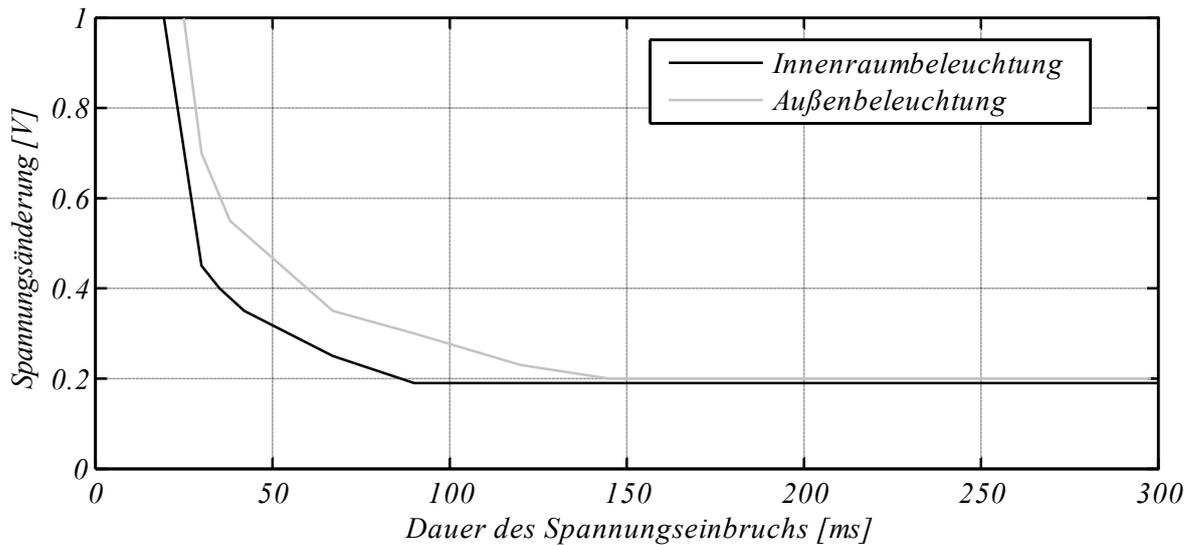


Abbildung 3.4 Grenzlinien für den wahrnehmbaren Bereich des Lichtflackerns für die Innenraumbeleuchtung und die Außenbeleuchtung.

### 3.2.2 Grenzwerte für die komfortrelevante Sensitivität

Die komfortrelevante Sensitivität des Bordnetzes wird aus den Erkenntnissen der Untersuchungen der visuellen Auswirkungen bestimmt. Für die Festlegung der Grenzwerte des komfortrelevanten Bereichs werden zum einen die Spannungsgrenze von 0,2 V und zum anderen die Einbruchsdauer kleiner 20 ms aus dem vorherigen Abschnitt (Abbildung 3.5) herangezogen.

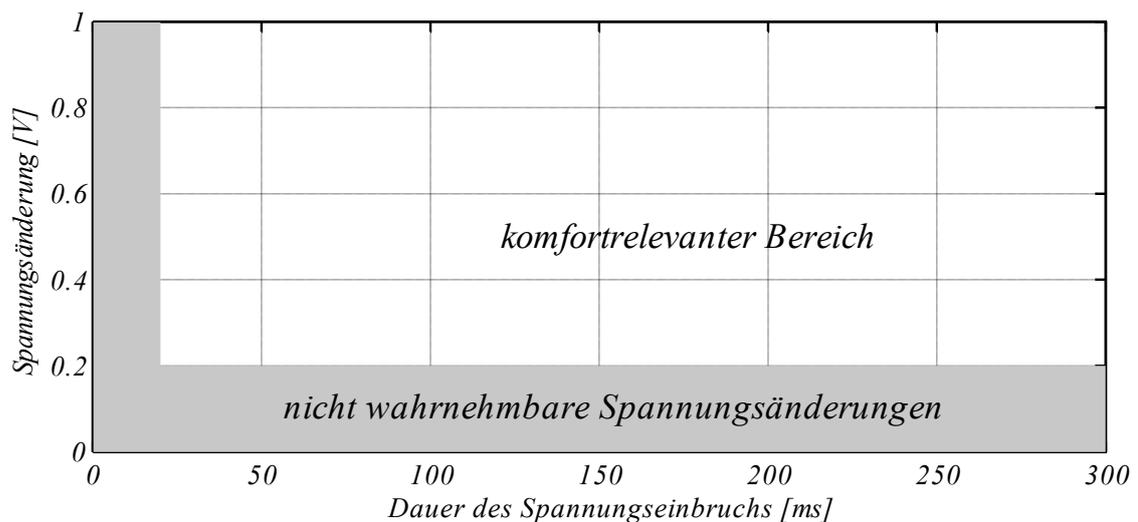


Abbildung 3.5 Darstellung des Bereichs, in dem Spannungseinbrüche zu komfortrelevanten Auswirkungen führen können.

Mit diesen Grenzwerten werden alle wahrnehmbaren Auswirkungen erfasst. Bei der Integration neuer Verbraucher in Kraftfahrzeuge ist jedoch immer zu überprüfen, ob sich die ermittelten Bereichsgrenzen ändern. Es kann daher sein, dass für neue Fahrzeuge die Grenzwerte angepasst werden müssen.

### 3.3 Funktionale Sensitivität

Bei den hier behandelten Spannungseinbrüchen handelt es sich um transiente Vorgänge, d.h. Spannungseinbrüche in einem Bereich kleiner eine Sekunde. Daher muss bei diesen Betrachtungen unterschieden werden, ob es sich um träge oder dynamische Systeme handelt. In Abbildung 3.6 sind alle Systemkategorien von Verbrauchern aufgelistet, die im Fahrzeug vorhanden sind und von den Spannungseinbrüchen betroffen sein können.

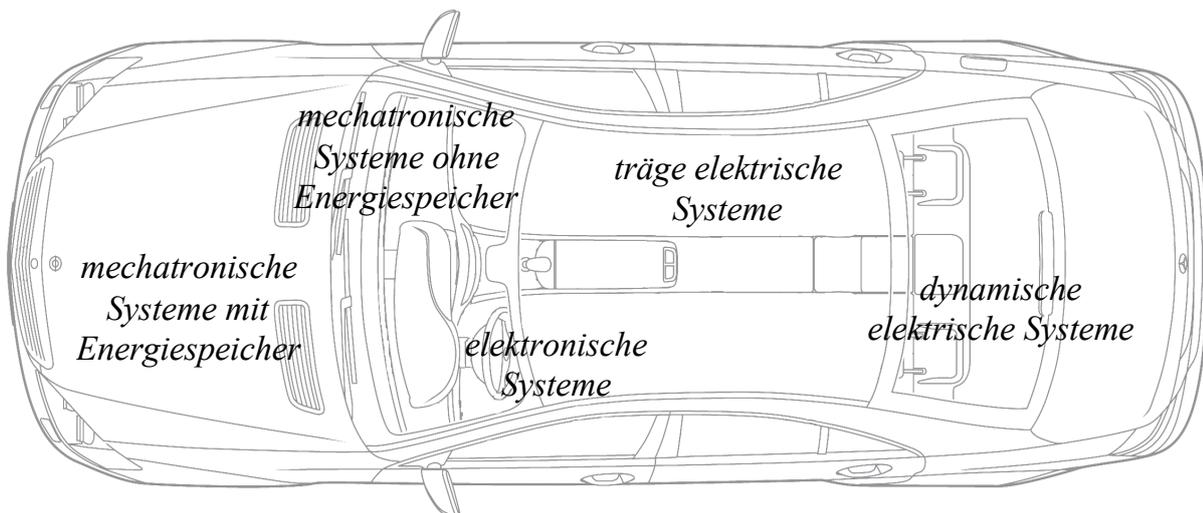


Abbildung 3.6 Auflistung der Systemkategorien bei denen es zu unterschiedlichen funktionalen Einschränkungen kommen kann.

Kurzzeitige Funktionsausfälle bei trägen elektrischen Systemen, zu denen z.B. alle Heizelemente gehören, sind für den Kunden nicht wahrnehmbar. Dagegen können bei dynamischen elektrischen Systemen, wie z.B. Beleuchtungen und elektronischen Systemen, denen die Steuergeräte zuzuordnen sind, kurzzeitige Funktionsausfälle vom Kunden durchaus wahrgenommen werden. Ausfälle von Steuergeräten können sogar das Fahrverhalten beeinflussen. Die in Fahrzeugen vorhandenen mechatronischen Systeme können in Systeme mit Energiespeicher und Systeme ohne Energiespeicher unterteilt werden. Systeme mit Energiespeicher sind bei kurzzeitigen Funktionsausfällen als unkritisch zu betrachten. Mechatronische Systeme ohne Energiespeicher, wie z.B. ein Bremssystem oder eine elektrische Lenkung, sind dagegen bei Funktions-

ausfällen als sehr kritisch zu betrachten. Bei der Funktion eines Komfortverbrauchers ist ein Ausfall unschön und kann zu einer Unzufriedenheit oder Beanstandung eines Kunden führen. Der Ausfall eines Systems, das aktiv die Fahrdynamik beeinflusst, kann hingegen schwerwiegende Folgen, wie z.B. einen Unfall, nach sich ziehen. Systeme, welche die Sicherheit der Insassen erhöhen, können sich auf die Folgen eines Unfalles auswirken, ihn jedoch nicht auslösen.

### 3.3.1 Grenzwerte für die funktionale Sensitivität

Elektrische Komponenten in Fahrzeugen werden unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1 angesprochenen Systemleistungsanforderungen entwickelt. Hierin sind unter anderem auch die statischen und dynamischen Spannungsgrenzen definiert, bei denen die Funktionen der einzelnen Komponenten gewährleistet werden müssen. In Tabelle 3.1 sind die Spannungsbereiche für die nicht startrelevanten Verbraucher angegeben. Zu dieser Kategorie gehören die meisten Verbraucher im Fahrzeug.

*Tabelle 3.1 Funktionale Spannungsbereiche an den Komponenten für nicht start-relevante Komponenten.*

<i>Spannungsbereich</i>	<i>Spannungsgrenze bei aktivem Generator</i>	<i>Spannungsgrenze bei Batteriebetrieb</i>
dauerhaft	9,8 V - 16 V	9 V - 16 V
transient (max. 500 ms)	9 V - 18 V	9 V - 18 V

Die startrelevanten Verbraucher, zu denen der Starter und das Motorsteuergerät zu zählen sind, haben eine Sonderstellung in den elektrischen Systemleistungsanforderungen. Der normalen Motorstart wird von allen nicht startrelevanten Komponenten ausgeblendet bzw. so überbrückt, dass zumindest keine Fehlfunktion entsteht und auch kein Eintrag im Fehlerspeicher gemacht wird. Nur die für den Startvorgang benötigten Komponenten müssen mit den hier entstehenden Spannungseinbrüchen zurechtkommen. Mit der Einführung der Stopp/Start-Funktionalität ändert sich jedoch die Sonderstellung des Startvorgangs, wobei noch zwischen einem Kaltstart und einem Warmstart unterschieden wird. Bei einem Warmstart durch die Stopp/Start-Funktion wird der Ausfall von Systemen nicht mehr toleriert. Typische Spannungsverläufe der beiden Startvorgänge sind in Abbildung 3.7 abgebildet.

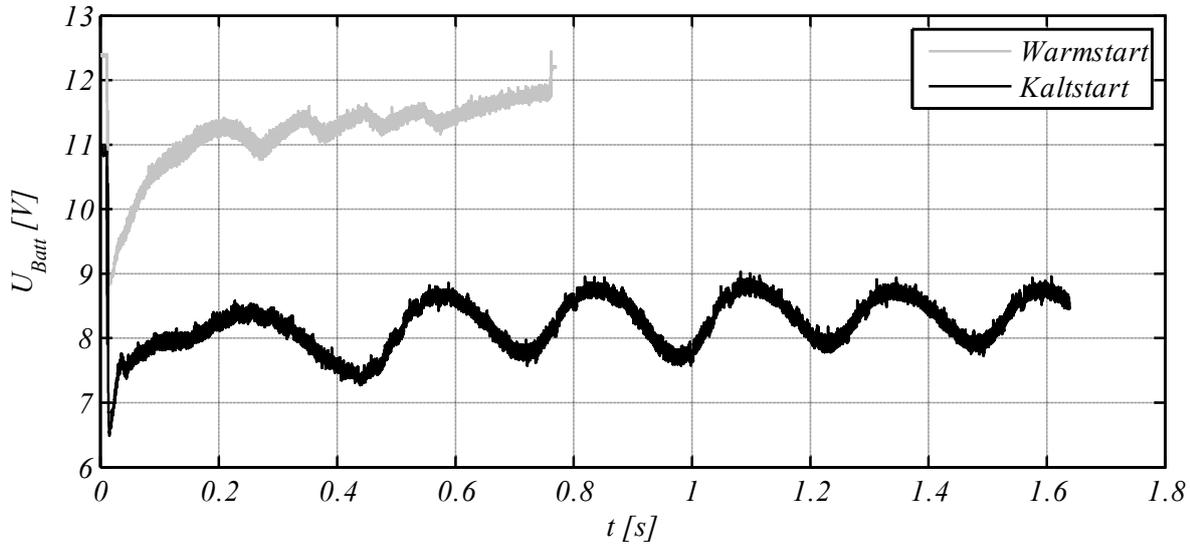


Abbildung 3.7 Typische Spannungsverläufe eines Warmstarts und eines Kaltstarts, gemessen an der Batterie. Beim Kaltstart wurde die Kraftstoffleitung vom Motor getrennt, um den Extremfall nachzustellen.

Die Auslegung von Bordnetzen muss auch bei einem Warmstart so erfolgen, dass diese festgelegten Grenzen in allen Betriebszuständen des Bordnetzes gewährleistet werden können.

In dieser Arbeit werden noch verschiedene Vorgaben für Spannungsabfälle gemacht, um den Arbeitsbereich der Energieversorgung definieren zu können. Bei der Auslegung der Versorgungsleitungen wird davon ausgegangen, dass ein maximaler Spannungsabfall  $\Delta U_L$  von 1 V von der Komponente zur Batterie eingehalten wird. Ein weiterer Spannungsabfall  $\Delta U_R$  von 1 V an der Komponente wird als Robustheit angenommen, wodurch Alterungseffekte, wie z.B. korrodierte Kontakte, berücksichtigt werden. Diese Annahmen und die Grenzwerte aus Tabelle 3.1 führen zu der in Abbildung 3.8 dargestellten Spannungsskala mit dem Arbeitsbereich  $\Delta U_E$  der Energieversorgung. Aus den zuvor angegebenen Vorgaben wird die untere Spannungsgrenze im transienten Bereich für die Energieversorgung somit durch

$$U_{E,\min} = U_{K,\min} + \Delta U_L + \Delta U_R = 11 \text{ V} \quad (3.1)$$

bestimmt. Die obere Spannungsgrenze kann mit  $U_{E,\max} = 18 \text{ V}$  direkt Tabelle 3.1 entnommen werden. Der schlechteste Fall tritt hierbei ein, wenn keine Ströme fließen und somit auch keine Spannungsabfälle an den Verbrauchern vorhanden sind.

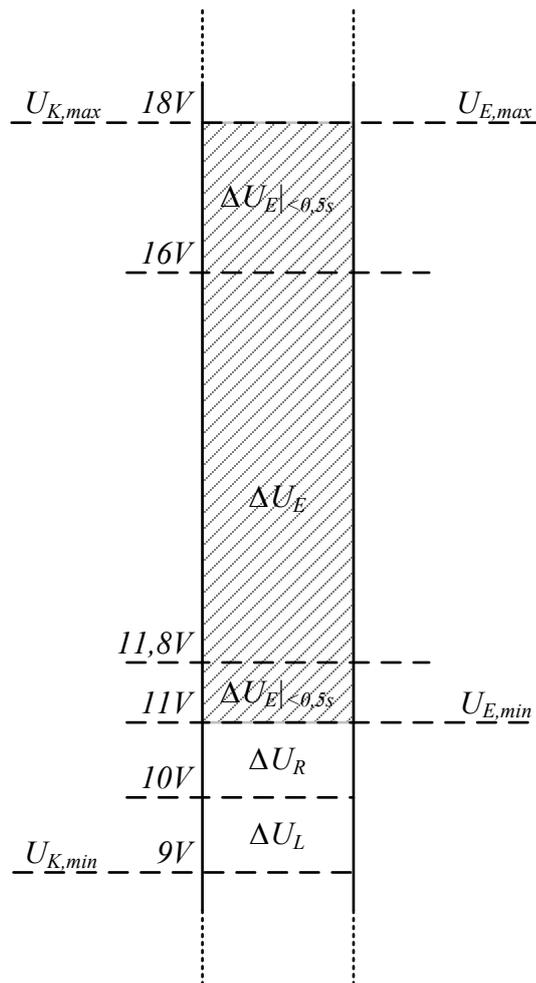


Abbildung 3.8 Spannungsbereiche und -grenzen im Bordnetz. Der schraffierte Bereich ist dabei der Arbeitsbereich der Energieversorgung unter Berücksichtigung der transienten Vorgänge.



# *4 VORGEHENSWEISE ZUR UNTERSUCHUNG DYNAMISCHER BELASTUNGSVORGÄNGE IN BORDNETZEN*

Im vorherigen Kapitel wurden bereits die Spannungsgrenzen von Bordnetzen ermittelt. In diesem Kapitel soll nun eine Vorgehensweise aufgezeigt werden, mit der bestimmt werden kann, wodurch und wann diese Spannungsgrenzen überschritten werden können. Grundlage hierfür sind dynamische Belastungsvorgänge mit hohen elektrischen Leistungen in den vorliegenden komplexen Bordnetzstrukturen. Zu diesen Vorgängen zählen die Aktivitäten von einem oder mehreren elektrischen Großverbrauchern, die im Fahrzeug wahrnehmbar werden. Ein Beispielszenario für solch einen dynamischen Belastungsvorgang ist die gleichzeitige Aktivität einer elektrischen Lenkung und der elektrischen Pumpe für das Bremssystem, die beide relative hohe Stromaufnahmen haben und zu wahrnehmbaren Spannungsschwankungen führen können.

Die allgemeine Vorgehensweise zur Untersuchung dynamischer Belastungsvorgänge kann in drei Schritte aufgeteilt werden. Im ersten Schritt muss eine Umgebung zur Untersuchung dieser Vorgänge ausgewählt und erstellt werden. Im zweiten Schritt müssen dann die zu untersuchenden Szenarien festgelegt werden. Anschließend erfolgt mit der ausgewählten Umgebung die Analyse der gewählten Szenarien. Um diese allgemeine Vorgehensweise zu konkretisieren, werden im Folgenden zwei Möglichkeiten aufgezeigt, wie diese bei dieser speziellen Anwendung aussehen kann. Dabei werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Vorgehensweisen aufgezeigt und hieraus eine geeignete Vorgehensweise ausgewählt.

#### *4.1 Untersuchung dynamischer Belastungsvorgänge durch Nachstellung am Fahrzeug*

Die bisherige Methode einzelne Belastungsszenarien zu untersuchen, ist die Nachstellung dieser direkt am Fahrzeug. Hierbei müssen die elektrischen Systeme manuell aktiviert werden (z.B. das Betätigen des elektrischen Fensterhebers), oder es werden Fahrzustände erzwungen, in denen die gewünschten Systeme aktiv werden (z.B. das Nachstellen eines Bremsmanövers auf einem Testgelände). Durch die Messung und Aufzeichnung der benötigten Spannungen während des Fahrmanövers und deren Auswertung kann dann die Bewertung der nachgestellten Szenarien erfolgen.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Systeme hierbei ihr reales Verhalten aufweisen. Nachteilig ist jedoch, dass die für die Nachstellung benötigten Verbraucher, bzw. Prototypen dieser Verbraucher, erst dann verfügbar sind, wenn die Architektur des Bordnetzes bereits feststeht. Auch die Reproduzierbarkeit von Belastungsszenarien ist schwierig, da die Ansteuerung von Verbrauchern teilweise durch sehr unterschiedliche Aktionen geschieht bzw. von verschiedenen Systemreaktionen abhängig ist. Der zeitliche Aufwand zur Durchführung dieser Untersuchungen ist ebenfalls immens.

#### *4.2 Modellbasierter Ansatz zur Untersuchung dynamischer Belastungsvorgänge*

Ein anderer Untersuchungsansatz ist die Simulation der Szenarien, basierend auf Modellen des gesamten Bordnetzes. Hierfür müssen die Gesamtstruktur sowie die einzelnen Komponenten mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Belastungsszenarien bereits untersucht werden können, bevor alle Komponenten physikalischen vorhanden sind. Die Simulation bietet durch die Möglichkeit, auf die inneren Größen des Systems zugreifen zu können, ebenfalls bessere Analysemöglichkeiten. Auch Änderungen am System, die ansonsten einen aufwendigen Fahrzeugumbau zur Folge hätten, sind durch einfache Modellanpassungen umsetzbar. Nachteilig an diesem Ansatz ist, dass Fehler bei der Modellierung nicht ausgeschlossen werden können. Bei ungenauer Modellierung einzelner Komponenten können so fehlerhafte Ergebnisse entstehen.

Die nachfolgenden Untersuchungen werden auf Grund der überwiegenden Vorteile über den modellbasierten Ansatz durchgeführt. Voraussetzung für die Simulation

dynamischer Belastungsvorgänge in komplexen Bordnetzstrukturen ist ein physikalisches, technisches, mathematisches oder abstraktes Modell des Systems.

In den folgenden Kapiteln 5 und 6 wird die für diese Vorgehensweise benötigte Modellierung der Bordnetzstruktur und die Analyse und Modellierung der Bordnetzkomponenten beschrieben. Darauf folgend wird in Kapitel 7 die Durchführung der simulationsgestützten Analyse dynamischer Belastungsvorgänge in komplexen Bordnetzstrukturen erläutert.



# 5 *MODELLIERUNG VON BORDNETZSTRUKTUREN*

Bisherige Modelle für Fahrzeugbordnetze sind für die simulationsgestützte Bestimmung der Ladebilanz der Batterien ausgelegt. Mit der wachsenden Zahl der Verbraucher ist es ohne Simulationen nicht mehr möglich gewesen, die Energieverfügbarkeit in den verschiedenen Situationen zu bestimmen. Die hierfür ausgelegten Simulationen basieren auf der Nachstellung der Energieflüsse in Bordnetzen in genormten Fahrzyklen. Der Simulationszeitraum erstreckt sich dabei von einigen Minuten bis hin zu mehreren Monaten. Für die Ladebilanzsimulation sind genaue Kenntnisse der Betriebsstrategien aller Verbraucher erforderlich, um die Energieaufnahme der Verbraucher in den verschiedenen Fahrzyklen berücksichtigen zu können. Um die Energie bestimmen zu können, die von den einzelnen Verbrauchern aufgenommen wird, werden zusätzlich die Modelle der die Betriebsstrategie beeinflussenden Systeme benötigt. Beispielsweise muss für die Betriebsstrategie des Motorlüfters die Kühlwassertemperatur bekannt sein. Die Modelle der einzelnen Komponenten an sich können jedoch relativ einfach gehalten werden. Durch den bewusst grob gewählten Detaillierungsgrad, d.h. den Verzicht auf kleine Zeitkonstanten, wird die Verwendung einer relativ großen Schrittweite ermöglicht. Hierdurch kann die Ausführungszeit der Simulationen um einen Faktor  $> 100$  geringer sein als der simulierte Zeitraum [Cie06].

Für die Nachstellung dynamischer Belastungsvorgänge in komplexen Bordnetzstrukturen sind diese vorhandenen Modelle jedoch nicht bzw. nur bedingt geeignet. Im Folgenden werden die Anforderung an die Modelle, die verschiedenen Modellierungsmethoden und eine speziell für diese Anwendung entwickelte Modellstruktur vorgestellt. Die Analyse und die daraus folgende Modellierung der Bordnetzkomponenten werden auf Grund des großen Umfangs separat in Kapitel 6 behandelt.

### 5.1 Anforderungen an die Modellierung

Für die Simulation dynamischer Belastungsvorgänge in Bordnetzen sind im Gegensatz zur Ladebilanzsimulation genaue Abbildungen der zeitlichen Strom- und Spannungsverläufe erforderlich. Diese Anforderung bedingt die Nachbildung aller Elemente, die einen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Signale haben.

Für die Modelle der einzelnen Systeme wird daher eine hohe Genauigkeit gefordert. Bei der Erstellung der Modelle für diese Anwendung muss jedoch auch der zeitliche Aufwand beachtet werden, da hier teilweise mehrere hundert Einzelsysteme nachgebildet werden müssen. Es müssen daher Modelle erstellt werden, die das Verhalten der einzelnen Systeme ausreichend genau beschreiben und bei denen der zeitliche Aufwand bei der Modellierung in einem vertretbaren Rahmen bleibt. Die Betriebsstrategien, die für die Ladebilanzsimulation zwingend benötigt werden, müssen in den Modellen der einzelnen Verbraucher für diese Anwendung nicht berücksichtigt werden. Sie können indirekt über die Auswahl der Szenarien mit einbezogen werden.

Eine Schwachstelle der Modellierung ist die Möglichkeit, fehlerhafte Eingaben zu machen. Gerade bei der Komplexität aktueller Bordnetze ist die Wahrscheinlichkeit solcher Fehler relativ groß. Es sind daher Mechanismen vorzusehen, die zumindest in einem vertretbaren Rahmen eine Validierung der Modelle ermöglichen. Zudem sollte die Modellstruktur möglichst übersichtlich gestaltet werden, damit das Verhalten des Modells nachvollziehbar bleibt.

Bei der Auslegung von Bordnetzen kommt es im Verlauf des Entwicklungsprozesses oft zu Änderungen an der Systemstruktur. Beispielsweise kann es auf Grund von Bauraumoptimierungen zu einer Verlagerung der Batterie vom Aggregaterraum in das Heck des Fahrzeuges kommen. Solche Änderungen in der Modellstruktur sollten ohne großen Aufwand möglich sein, um den Entwicklungsprozess zu beschleunigen.

### 5.2 Modellierungsmethoden

Um auf die unterschiedlichen Modellierungsmethoden eingehen zu können, werden hier zunächst einige grundlegende Begriffe erläutert.

Ein Modell  $M$  hat die Aufgabe, eine mathematische Abbildung des Systemverhaltens im Bezug auf die Eingänge  $u$  und Ausgänge  $y$  darzustellen.

$$M : u \rightarrow y \tag{5.1}$$

Das Modell eines Systems kann dabei in mehrere Teilsysteme unterteilt werden. Hierdurch kann bei der Modellierung speziell auf die Anforderungen der Teilsysteme eingegangen werden. Sind alle Teilmodelle erstellt, können diese zu einem Gesamtmodell verknüpft werden [Lun03].

Bei der Modellierung der einzelnen Komponenten hat man nun die Möglichkeit, sie physikalisch nachzubilden oder ein phänomenologisches Modell zu erstellen. Aber auch eine Kombination der beiden Modellierungsarten ist möglich. Solche Modelle werden hier als hybride Modelle bezeichnet. Im Folgenden werden die Eigenschaften dieser drei Modellierungsmethoden aufgezeigt.

### **5.2.1 Physikalische Modellierung**

Physikalische Modelle, die auch als *White-Box-Modelle* bezeichnet werden, erfassen das Verhalten eines zu beschreibenden Systems auf Grund der mathematischen Abbildung der beobachteten physikalischen Prozesse. Die Modellparameter sind durch die physikalischen Konstanten und Eigenschaften der Komponenten gegeben. Hierbei werden alle relevanten physikalischen Prozesse im Modell abgebildet und zu einer Gesamtbeschreibung zusammengefasst [Jun05].

Als Beispiel für die physikalische Modellierung sei hier eine elektrische Maschine genannt, deren Beschreibung auf den aus der Feldtheorie bekannten Beziehungen, unter Berücksichtigung des Aufbaus und der Geometrie der Maschine, basiert.

Vorausgesetzt, dass eine Modellierung nach diesem Verfahren durchführbar ist, ermöglicht sie eine sehr detaillierte Analyse einzelner Effekte und deren Auswirkungen auf das System. Je nach geforderter Genauigkeit können die Modelle hierbei jedoch beliebig komplex werden bzw. kann der Modellierungsaufwand sehr hoch werden. Die physikalische Modellierung führt hierdurch zu einer Systemsimulation, die eine relativ hohe Rechenperformance und Speichergröße benötigt bzw. relativ lange Berechnungszeiten erfordert. Auch der Aufwand, der bei der Modellierung der Systeme betrieben werden muss, ist relativ hoch, da die Systeme bis ins kleinste Detail analysiert werden müssen.

### **5.2.2 Phänomenologische Modellierung**

Bei phänomenologischen Modellen, auch als *Black-Box-Modelle* bezeichnet, sind die inneren Prozesse eines Systems im Allgemeinen nicht zugänglich. Die Systemeigenschaften können z.B. auf Grund der Konstruktion unzugänglich oder unter Umständen nicht vollständig bekannt sein. An einer Systemgrenze können zwar verschiedene Eigenschaften des Systems beobachtet und eine mathematische Abbildung erstellt

werden, jedoch ist ein Rückschluss auf die inneren Prozesse nicht möglich. Ausgehend von der Zielfunktion des Systems wird diese in eine Modellbeschreibung umgesetzt und an den notwendigen Stellen in weitere Teilfunktionen aufgespalten. Diese werden je nach Zielsetzung immer weiter differenziert. Nach der Modellierung werden diese Teilfunktionen wieder zu einem Gesamtsystem zusammengefasst [Jun05].

Am Beispiel der elektrischen Maschine bedeutet diese Modellierungsmethode, dass Kennlinien der Ausgangsgrößen in Abhängigkeit von den einzelnen Eingangsgrößen aufgenommen werden müssen. Das Modell kann dann entweder direkt durch Verwendung der Kennfelder aufgestellt werden, oder es werden Funktionen verwendet, die aus den Kennfeldern abgeleitet werden.

Vorteil dieser Abbildungsart ist der relativ geringe Aufwand zur Nachbildung der Eigenschaften eines Systems. Komplexe Systeme können durch die phänomenologische Modellierung über wenige Funktionen oder Kennfelder beschrieben werden. Ob Funktionen anstatt Kennfelder verwendet werden, hängt vom Verlauf der gemessenen Größen ab. Funktionen haben den Vorteil, dass sie im Gegensatz zu Kennfeldern einen relativ geringen Speicherbedarf haben. Bei phänomenologischen Modellen besteht jedoch die Gefahr, dass wichtige Einflussgrößen und Abhängigkeiten nicht erkannt oder vernachlässigt werden. Das Modell beschreibt unter diesen Umständen nicht mehr das reale Verhalten des Systems.

### **5.2.3 Hybride Modellierung**

Hybride Modelle, auch *Grey-Box-Modelle* genannt, stellen eine Kombination der beiden zuvor genannten Modelltypen dar. Hält man sich streng an die Definition der physikalischen Modelle, so existieren eigentlich nur phänomenologische Modelle, da eine mathematische Beschreibung auf einer Beobachtung an einer Systemgrenze basiert und somit nie alle physikalischen Effekte erfasst werden können [Jun05].

Bei einem Modell der elektrischen Maschine in hybrider Modellierung können z.B. die ohmschen Verluste in physikalischer Modellierung implementiert werden und die nur aufwendig beschreibbaren Prozesse in der Maschine werden in phänomenologischer Modellierung abgebildet.

Dieser Kompromiss zwischen physikalischer und abstrakter Beschreibung wird in dieser Arbeit genutzt, um den am Anfang dieses Kapitels genannten Anforderungen gerecht zu werden. Je nach Gewicht der Anforderungen wird das System in einzelne Teilbereiche gegliedert und diese nach Bedarf phänomenologisch oder physikalisch basierend modelliert.

### 5.3 MultiLayer-Modellstruktur

Um den Anforderungen der Simulation an das Modell zu entsprechen, wird hier eine neue, speziell auf diese Anwendung angepasste Modellstruktur vorgestellt [Hoh08]. Bezeichnend durch den inneren Aufbau wird sie im Weiteren MultiLayer-Modellstruktur genannt.

Die Grundidee der MultiLayer-Modellstruktur ist es, die Leistungsfähigkeit moderner Rechnersysteme und Simulationstools optimal auszunutzen. Moderne Rechnersysteme und das hier verwendete Simulationstool MATLAB®/SIMULINK®<sup>1</sup> sind in der Verarbeitung von Vektoren und Matrizen sehr effektiv. Um diese Eigenschaft bei der Modellierung auszunutzen, wird hier eine spezielle Strukturierung des Modells vorgenommen, die im Folgenden beschrieben wird.

#### 5.3.1 Allgemeiner Modellansatz

Das nachzubildende System wird bei diesem Ansatz in eine Makro- und eine Mikrostruktur unterteilt. Die Makrostruktur ist der sichtbare Teil des Modells, in der die Grobstruktur des Gesamtsystems in mehrere Ebenen aufgeteilt wird. Bei einem System mit einer Baumstruktur entsprechen diese Ebenen den Verzweigungsebenen. Diese Aufteilung der Knoten- und Endpunkte in verschiedene Ebenen ist schematisch in Abbildung 5.1 dargestellt.

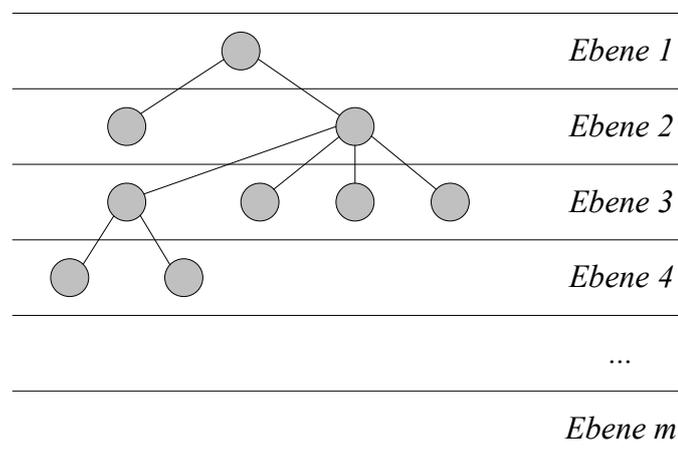


Abbildung 5.1 Schematische Darstellung einer beispielhaften Baumstruktur mit der Einteilung der Knoten- und Endpunkte in mehrere Ebenen.

<sup>1</sup> Matlab® ist eine Hochsprache der Firma MathWorks™ zur schnellen Ausführung rechenintensiver Aufgaben. Simulink® ist eine Erweiterung von Matlab für das Model-Based Design dynamischer Systeme.

Die Mikrostruktur des Modells dient zur Nachbildung der in den Ebenen  $1 \dots m$  enthaltenen Systemkomponenten (Knoten- und Endpunkte). Für den hier beschriebenen Ansatz einer Modellstruktur ist es notwendig, die Systemkomponenten zu klassifizieren. Systemkomponenten mit gleichen oder ähnlichen Eigenschaften werden einer Modellklasse mit einem definierten Verhalten zugeordnet. Je weniger Klassen man für ein Gesamtsystem definieren muss, desto effektiver ist diese Modellstruktur hinsichtlich der Simulationsperformance. In Anlehnung an die objektorientierte Programmierung können die Systemkomponenten hier als Objekte der einzelnen Klassen angesehen werden. Für die einzelnen Objekte bzw. Komponenten müssen hierdurch keine eigenen Modelle mehr erstellt werden, sondern sie können über die Zugehörigkeit zu einer Klasse und ihre Attribute beschrieben werden. Zur Verdeutlichung dieser Beschreibung ist der Aufbau der MultiLayer-Modellstruktur in Abbildung 5.2 schematisch dargestellt.

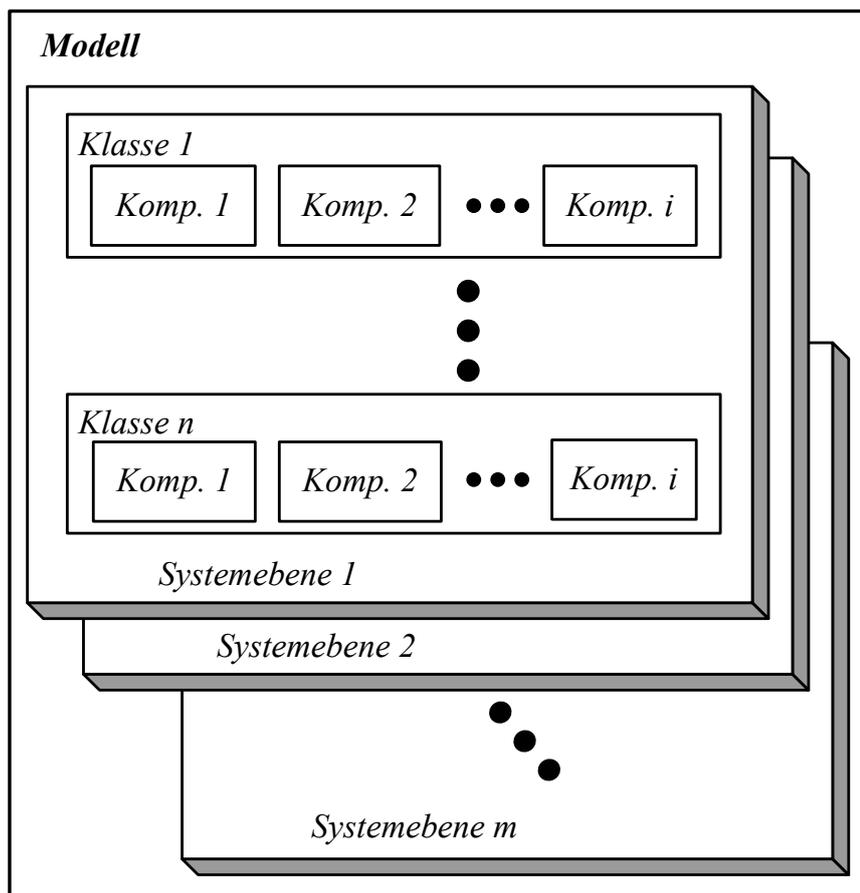
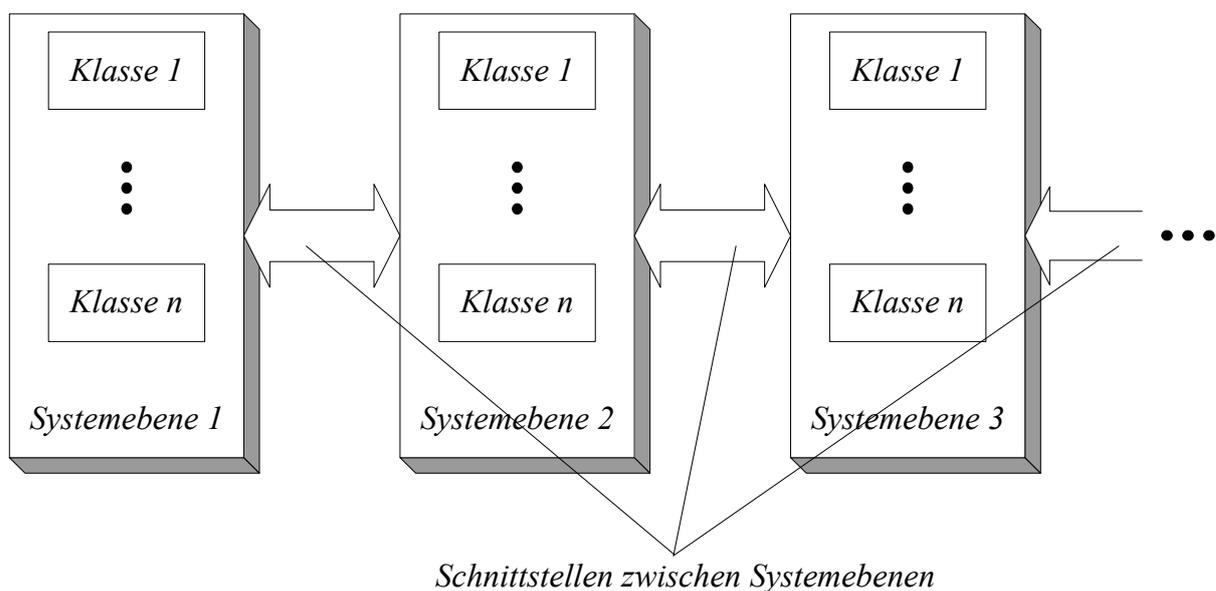


Abbildung 5.2 Schematische Darstellung der MultiLayer-Modellstruktur mit den Klassen  $1 \dots n$  und deren Komponenten  $1 \dots i$  in den verschiedenen Systemebenen.

Die einzelnen Ebenen mit deren Klassen werden untereinander durch Schnittstellen verbunden, bei denen die Informationen bzw. Signale vektoriell übergeben werden (Abbildung 5.3). Eingangsseitig erfolgt in den einzelnen Ebenen jeweils eine Sortierung bzw. Zuordnung der Vektorelemente zu den einzelnen Klassen. In den einzelnen Klassen erfolgt wiederum eine Zuordnung der Komponenten (Objekte) zu den Eingangssignalen. Durch diese vektorielle Zuordnung wird die Topologie des Gesamtsystems festgelegt. Topologieänderungen im System, was bei modellgestützter Entwicklung häufig gefordert wird, können somit ohne großen Aufwand durch Parametrierung umgesetzt werden.



*Abbildung 5.3 Visualisierung der Schnittstellen zwischen den Systemebenen.*

Die Modellierung in der MultiLayer-Struktur ermöglicht es, komplexe Systeme mit relativ geringem Aufwand nachzubilden. Die hier beschriebene Modellstruktur ermöglicht zudem in gewissen Bereichen eine Automatisierung der Modellbildung, wodurch Fehler bei der Modellierung minimiert werden können.

### **5.3.2 Anwendung auf Bordnetzstrukturen**

Im Folgenden wird die Anwendung der zuvor vorgestellten MultiLayer-Modellstruktur auf Fahrzeugbordnetze anhand eines einfachen Beispiels erläutert. In Abbildung 5.4 ist hierfür der schematische Aufbau einer Baumstruktur von Bordnetzen dargestellt. Die Systemebenen werden bei Bordnetzen in die Energieversorgungsebene und drei Verbraucherebenen aufgeteilt. Mehr Ebenen sind bei dieser Anwendung nicht erforderlich, da tiefere Verzweigungsebenen aus energetischer Sicht nicht mehr

sinnvoll sind. An die Energieversorgungsebene, auf die im Folgenden noch näher eingegangen wird, können Steuergeräte oder Endverbraucher in der Verbraucherebene 1 angeschlossen werden. Das gleiche gilt für die Verbraucherebene 2 mit dem Anschluss an Steuergeräte aus der Verbraucherebene 1. In der Verbraucherebene 3 können sich nur noch Endverbraucher befinden, die an Steuergeräte der Verbraucherebene 2 angeschlossen sind.

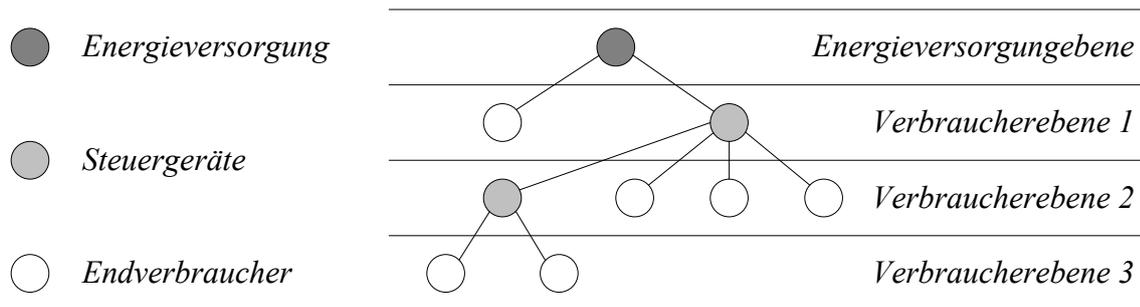


Abbildung 5.4 Darstellung einer einfachen Baumstruktur angewendet auf Bordnetze. Knotenpunkte sind hier Anschlüsse an die Energieversorgung und Steuergeräte, Endpunkte sind die Verbraucher.

Die Energieversorgungsebene stellt in dieser Anwendung einen Ausnahmefall dar. Auf Grund der unterschiedlichsten Möglichkeiten zum topologischen Aufbau von Energieversorgungssystemen und der Variationsmöglichkeiten bei den verwendeten Energieversorgungskomponenten wird diese Ebene nicht mit der zuvor beschriebenen Vorgehensweise erstellt. Für diese Ebene ist es geeigneter ein Modell von Hand zu erstellen.

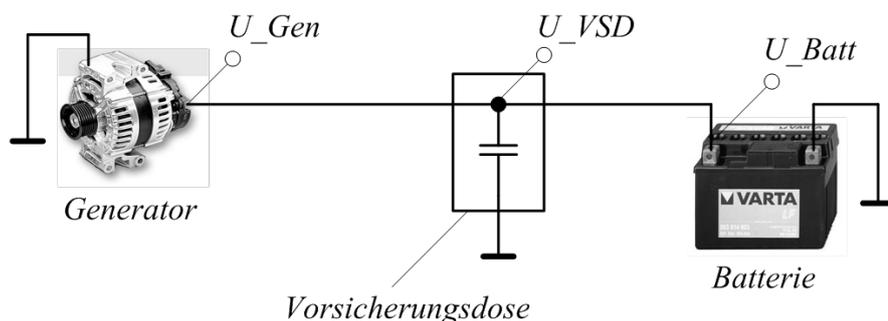


Abbildung 5.5 Vereinfachte Darstellung der Versorgungstopologie eines Bordnetzes mit einer Batterie, einem Generator und einer Sicherungsdose mit Bordnetzkapazitor.

Für die beispielhafte Versorgungstopologie, wie sie in Abbildung 5.5 dargestellt ist, wird ein Modell erstellt, das als Eingangsgröße einen Vektor der Ströme aller

Verbraucher und Steuergeräte hat, die an dieser Ebene angeschlossen sind. Als Ausgangsgröße wird ein Vektor, der alle Spannungen der Anschlusspunkte von Steuergeräten und Verbrauchern an dieser Ebene beinhaltet, ausgegeben (Abbildung 5.6). Die Verbraucherebenen 1...3 haben, wie zuvor beschrieben und in Abbildung 5.2 dargestellt, einen in Verbraucherklassen unterteilten Aufbau. Welche einzelnen Verbraucherklassen dabei gebildet werden, wird im Abschnitt 6.4 bei der Analyse der elektrischen Verbraucher festgelegt.

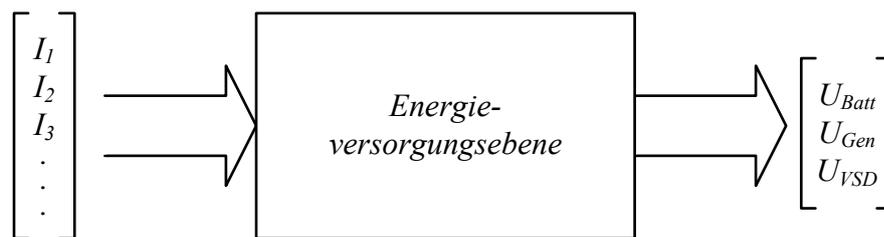


Abbildung 5.6 Blockschaltbild einer beispielhaften Energieversorgungsebene mit einem Stromvektor als Eingangsgröße und einem Spannungsvektor als Ausgangsgröße.

Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Ebenen bilden die Strom- und Spannungsvektoren. Dabei werden die Spannungsvektoren an die jeweils nächsthöhere Ebene übergeben und die Stromvektoren werden an die jeweils nächstniedrigere Ebene übergeben. Abbildung 5.7 verdeutlicht diese Zusammenhänge.

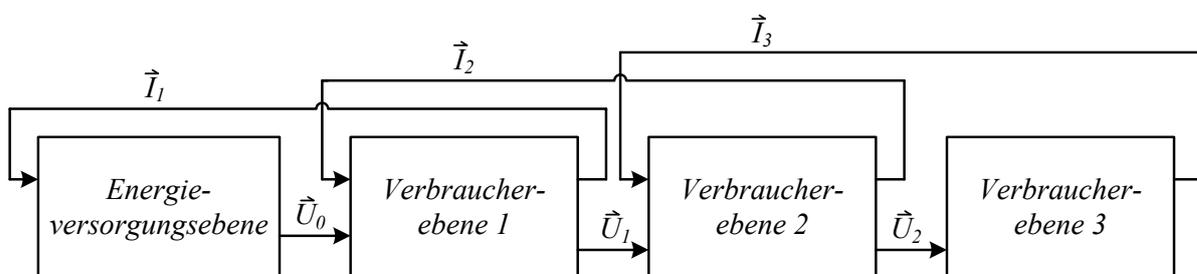


Abbildung 5.7 Modellstruktur für Fahrzeugbordnetze mit vier Ebenen. Die Spannungs- und Stromvektoren bilden die Schnittstellen zwischen den Ebenen.

### 5.4 Modellgenerierung

Durch eine Modellgenerierung kann ein weiterer Teil der Anforderungen an die Modellierung erfüllt werden. Fehler bei der Modellbildung können hierdurch minimiert werden. Die grundlegende Vorgabe zur Generierung von Bordnetzmodellen ist die zuvor beschriebene MultiLayer-Modellstruktur. Zusätzlich müssen alle Vorgaben, wie die Bordnetztopologie, Komponentendaten, usw., erfasst und aufbereitet werden.

Dies wird hier über eine Generierungsumgebung bewerkstelligt. In Abbildung 5.8 sind diese Zusammenhänge und Abläufe dargestellt.

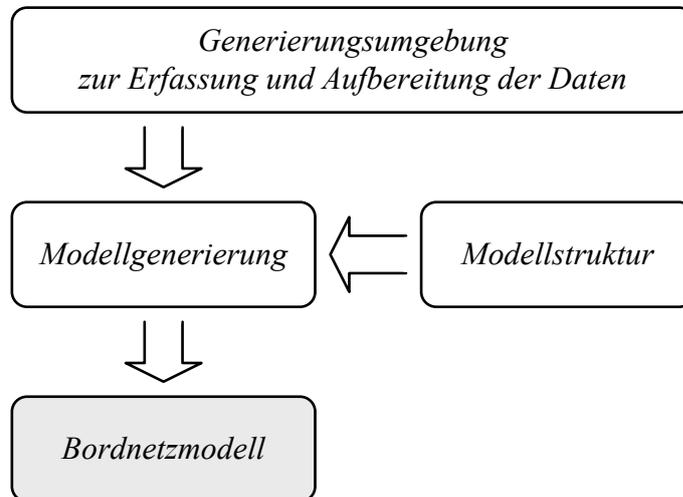


Abbildung 5.8 Darstellung der Zusammenhänge und des Ablaufs bei der Modellgenerierung.

Im Folgenden wird eine Generierungsumgebung vorgestellt, die unter anderem die Daten für die Modellgenerierung bereitstellt. Danach werden drei Ansätze zur Umsetzung der Modellgenerierung vorgestellt, welche die zuvor beschriebenen Anforderungen berücksichtigen und es wird ein geeigneter Ansatz für diese Anwendung ausgewählt. Als Modellierungsumgebung wird bei allen Ansätzen auf Grund der in Abschnitt 5.3 erwähnten Vorteile MATLAB® bzw. MATLAB®/SIMULINK® verwendet.

#### 5.4.1 Generierungsumgebung

Die Modellgenerierung benötigt eine Umgebung, in der die Bordnetzdaten erfasst und aufbereitet werden, unabhängig davon, welcher Generierungsansatz gewählt wird. In welcher Form die Daten an die Modellgenerierung übergeben werden, hängt wiederum vom gewählten Ansatz ab. Zur Generierung eines vollständigen Bordnetzmodells werden folgende Daten benötigt, die von der Generierungsumgebung erfasst werden müssen:

- Topologie der Energieversorgung
- Parameter der einzelnen Energieversorgungskomponenten
- Topologie der Verbraucher
- Parameter der Anschlussleitungen der einzelnen Verbraucher
- Parameter der einzelnen Verbraucher

Für die Energieversorgungsstrukturen ist es, wie in Abschnitt 5.3.2 bei der Anwendung der MultiLayer-Modellstruktur auf Bordnetzstrukturen bereits erwähnt, sinnvoll, diese von Hand zu modellieren. Bei der Modellgenerierung wird daher eine Bibliothek angelegt, in der alle verwendeten Energieversorgungsstrukturen hinterlegt werden. In der Generierungsumgebung wird für das aktuelle Projekt eine Kopie des Modells der gewählten Energieversorgungsstruktur hinterlegt. Diese, wie auch die folgenden Zusammenhänge, werden durch Abbildung 5.9 verdeutlicht.

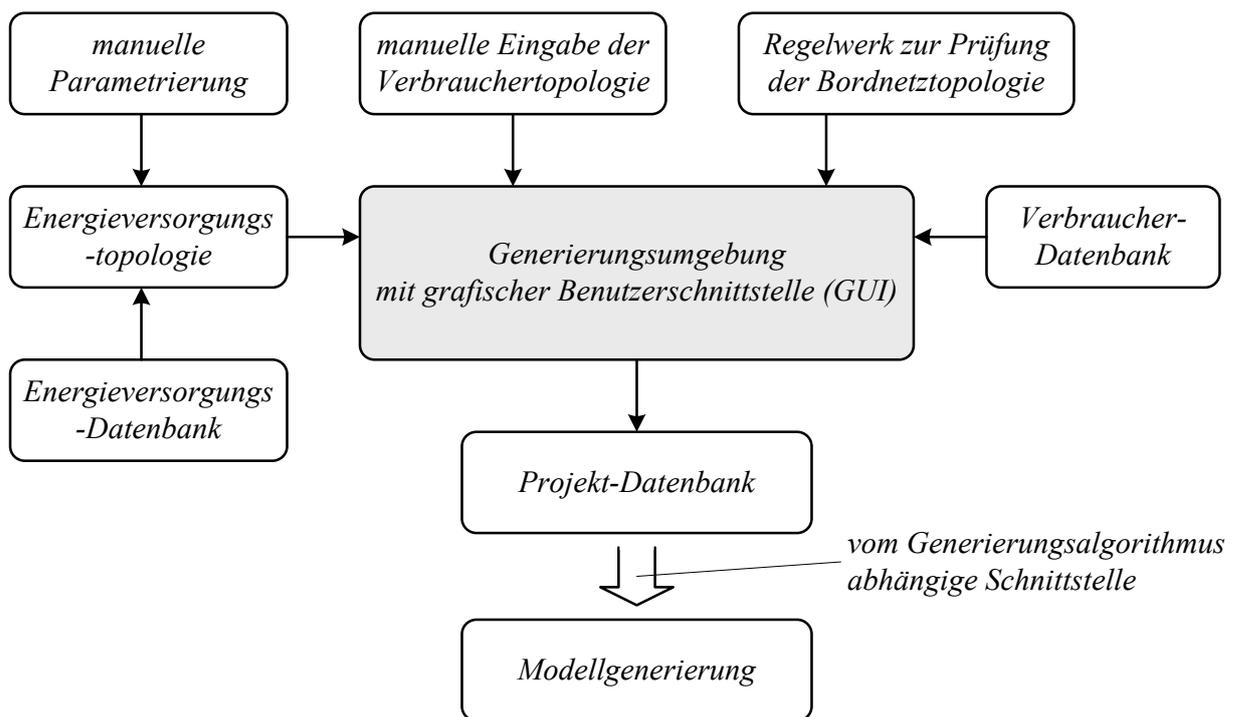


Abbildung 5.9 Darstellung der Zusammenhänge bei der Erfassung und Aufbereitung der für die Beschreibung von Bordnetzen benötigten Daten.

Die Parametrierung der einzelnen Energieversorgungs-komponenten wird manuell durchgeführt, da hier für jedes Bordnetz sehr individuelle Einstellungen gemacht werden müssen. Die Einstellungen werden in der lokalen Kopie der Energieversorgungsstruktur gespeichert. Für die Verbraucher wird eine Datenbank angelegt, in der für jeden Verbraucher alle für die Modellierung benötigten Parameter hinterlegt werden. In der Generierungsumgebung kann auf diese Datenbank zugegriffen werden. Die topologische Anordnung der Verbraucher wird über eine grafische Benutzeroberfläche der Generierungsumgebung, eingegeben. Um eine höhere Sicherheit gegenüber Eingabefehlern zu bekommen, sind bei der Eingabe der Topologiedaten bereits Funktionen implementiert, die nach vorgegebenen Regeln den topologischen Aufbau des Bordnetzes prüfen und ggf. eingreifen. Ein Verbraucher *A* in Ebene 3 kann

beispielsweise nicht eingefügt werden, wenn der Verbraucher *B* in Ebene 2, an den der Verbraucher *A* angeschlossen werden soll, noch nicht angelegt wurde. Gleichmaßen werden mit dem Entfernen eines Verbrauchers alle an ihm angeschlossenen Komponenten ebenfalls entfernt.

Alle Daten die zur Beschreibung des Bordnetzes notwendig sind, wurden somit erfasst und werden in einer lokalen Projekt-Datenbank abgelegt. Die Daten können über eine auf den Generierungsalgorithmus angepasste Schnittstelle von der Modellgenerierung abgerufen werden.

### **5.4.2 Textbasierter Ansatz**

Der textbasierte Ansatz wird zur direkten Erzeugung der von MATLAB®/SIMULINK® verwendeten Modelldateien genutzt. Hierfür wird zunächst auf den Aufbau der erzeugten Modelldateien eingegangen.

Eine Modelldatei von MATLAB®/SIMULINK® (\*.mdl) enthält die Beschreibung des Modells in Textform und ist mit einem einfachen Texteditor lesbar. Die Modelldateien sind strukturiert aufgebaut und bestehen neben dem Modellabschnitt aus verschiedenen Abschnitten für Standardeinstellungen und dem Systemabschnitt. Der Aufbau sieht wie folgt aus:

```
Model {...}
Simulink.ConfigSet {...}
BlockDefaults {...}
BlockParameterDefaults {...}
AnnotationDefaults {...}
LineDeaufaults {...}
System {...}
```

Der Modellabschnitt befindet sich am Anfang der Datei und beschreibt verschiedene Parameter des Modells wie z.B. den Modellname und die SIMULINK® Version. Die darauf folgenden Abschnitte enthalten diverse Standardeinstellungen, z.B. für Blöcke und Beschriftungen, die im gesamten Modell gültig sind. Bis zu diesem Punkt können die Modelldateien für verschiedene Modelle identisch sein. Erst im Systemabschnitt wird das Modell an sich beschrieben. Daher kann bei der textbasierten Generierung von Modelldateien eine Vorlage genommen werden, die bereits alle Abschnitte, bis auf den Systemabschnitt, enthält. Hierfür muss einmalig ein leeres Modell erstellt werden, in dem alle Einstellungen und Parameter auf die Modellierung und Simulation von Bordnetzen angepasst werden.

Der Systemabschnitt, der alle Blöcke und Verbindungen inklusive ihrer Anordnung und ihrer Parameter enthält, muss jetzt entsprechend den Modellvorgaben generiert werden. Der Aufbau des Systemabschnitts sieht folgendermaßen aus:

```
System {
  Block {
    BlockType      [Typ des Blocks]
    Name           [Name des Blocks]
    Position       [Position des Blocks]
    ...           [Weiter blockspezifische Angaben]
  }
  Line {
    SrcBlock      [Quellblock]
    SrcPort       [Port des Quellblocks]
    DstBlock      [Zielblock]
    DstPort       [Port des Zielblocks]
  }
  ...
}
...
```

Auf Grund dieses strukturierten Aufbaus ist es möglich, aus gegebenen Komponentenparametern und den topologischen Verbindungen SIMULINK® Modelldateien textbasiert zu generieren, die die entsprechenden Bordnetze beschreiben. Die Algorithmen, um die benötigten Textbausteine zu generieren, können direkt in MATLAB® programmiert werden. Das Schreiben der Textbausteine in die Modelldateien ist mit dem *fprintf*-Befehl möglich.

Ein Vorteil dieser Art der Modellgenerierung ist, dass sie sich auch mit anderen gängigen Programmiersprachen realisieren lässt. Dieser Ansatz hat jedoch den Nachteil, dass komplexe Algorithmen notwendig sind, um die Textbausteine in die vorgegebene Syntax zu formatieren. Die Parametrierung, die Blockanordnung und die Verknüpfung der Blöcke sind hiermit ebenfalls sehr aufwendig. Bei einem Versionswechsel von SIMULINK® können zusätzlich noch Kompatibilitätsprobleme auftreten. Auf Grund der Komplexität der benötigten Algorithmen wird dieser Ansatz hier nicht weiter verfolgt.

### 5.4.3 Befehlsbasierter Ansatz

Der zweite Ansatz zur Modellgenerierung verfolgt das Prinzip, Blöcke und Verbindungen in den SIMULINK® Modellen über Befehle aus MATLAB® heraus zu erzeugen. Die Befehle hierfür sind unter der Kategorie „Model Construction“ in der MATLAB®-Hilfe zu finden. Als ein Beispiel sieht das Einfügen eines *Gain*-Blocks in das Subsystem *Volume* im Modell *mymodel* mit dem Parameter *Gain*=4 folgendermaßen aus:

```
add_block('built-in/Gain','mymodel/Volume','Gain','4')
```

Gleichermaßen kann das Einfügen von Verbindungslinien über entsprechende Befehle erfolgen. Der Befehl für das Einfügen einer Verbindungslinie im Modell *mymodel* zwischen *Block1, Port1* und dem *Block2, Port1* mit automatischem Routing hat beispielsweise die Form:

```
add_line('mymodel','Block1/1','Block2/1','autorouting','on')
```

Über die Befehle können auch Parameter von bereits im Modell vorhandenen Blöcken geändert werden. Zum Ändern des Parameters *p* auf den Wert 10 von *Block1* im Modell *mymodel* sieht der Befehl wie folgt aus:

```
set_param('mymodel/Block1','p','10')
```

Mit den Befehlen für die Modellbildung ist es möglich, die Komponenten als fertige Blöcke einzufügen, sie zu parametrieren und die Verbindungen zwischen den Blöcken zu erstellen. Auf diese Weise kann über entsprechende Algorithmen aus den Topologie- und Komponentendaten ein fertiges Simulationsmodell des Bordnetzes generieren werden. Ein Basismodell, das alle für Bordnetzmodelle benötigten Einstellungen enthält, kann dabei als Vorlage herangezogen werden.

Ein Vorteil bei diesem Ansatz der Modellgenerierung gegenüber der textbasierten Generierung ist, dass das Einfügen und Verknüpfen der einzelnen Blöcke einfacher ist. Jedoch erfordert die Umsetzung der vorgegebenen MultiLayer-Modellstruktur auch mit diesem Ansatz sehr komplexe Algorithmen. Daher wird dieser Ansatz hier ebenfalls nicht weiter verwendet.

### 5.4.4 Ansatz über parametrierbares Mastermodell

Wie in Abschnitt 5.3.2 bei der Anwendung der MultiLayer-Modellstruktur auf Bordnetzstrukturen erwähnt, werden für Bordnetze maximal vier Ebenen benötigt. Auf Grund dieser überschaubaren Modellstruktur verfolgt dieser Ansatz die Idee, die gesamte Modellstruktur als Mastermodell vorzugeben. Das Vorgehen, wie man mit

diesem Ansatz aus der Bordnetzbeschreibung in der Projekt-Datenbank ein vollständiges Bordnetzmodell generiert, wird in Abbildung 5.10 gezeigt.

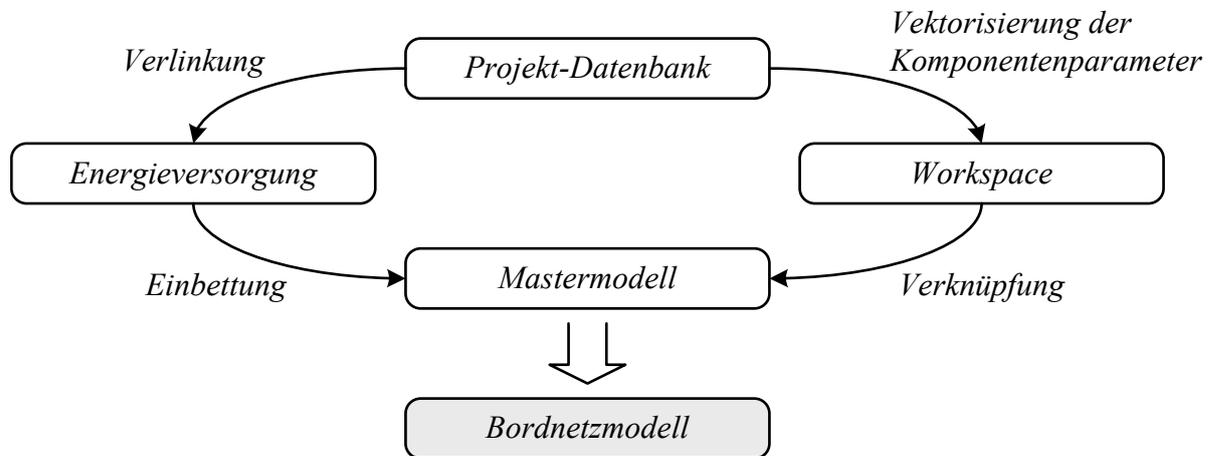


Abbildung 5.10 Auf den Ansatz des „parametrierbaren Mastermodells“ angepasste Zusammenhänge und Abläufe bei der Modellgenerierung.

Bevor ein Bordnetzmodell generiert werden kann, muss zunächst das Mastermodell erstellt werden. Hierfür wird eine MultiLayer-Modellstruktur mit vier Ebenen angelegt. Die erste Ebene ist die Energieversorgungsebene, die im Mastermodell leer bleibt. Die Ebenen zwei bis vier sind die Verbraucherebenen. In ihnen müssen alle möglichen Verbraucherklassen eingefügt werden, auch wenn nicht alle Klassen von jedem hieraus generierten Bordnetzmodell genutzt werden. Welche Verbraucherklassen hierzu gehören, wird in Abschnitt 6.4 bei der Analyse und Modellierung der Verbraucher festgelegt. Alle Parameter der einzelnen Blöcke, die einen Einfluss auf die Topologie und das Verhalten des Bordnetzes haben, werden bei diesem Ansatz als Variablen deklariert.

Die Implementierung der Energieversorgung in das Mastermodell erfolgt über die Verlinkung in der Projekt-Datenbank. Hierbei wird das Modell, auf das der Link zeigt, in das Mastermodell kopiert.

Um die einzelnen Verbraucher in diese Modellstruktur einzubinden, müssen die Verbraucherdaten aus der Projekt-Datenbank aufbereitet werden. Für jede Verbraucherebene müssen die verschiedenen Parameter der Verbraucher, unterteilt in die einzelnen Klassen, vektoriell zusammengefasst werden. Z.B. wird für jede Ebene ein Vektor des Parameters *Widerstand* für die Klasse *spannungsgesteuerte Aktoren* (ohmsche Verbraucher) angelegt. Jedem Verbraucher ist dabei eine Zeile in den Vektoren zugeordnet. Welche Zeile in den Vektoren zu welchem Verbraucher gehört, ist hierbei jedoch nicht von Bedeutung. Über einen eindeutigen Namen, für den ebenfalls ein

Vektor angelegt wird, können die Parameter wieder einem Verbraucher zugeordnet werden. Alle Vektoren werden im *Workspace* von MATLAB® abgelegt, da aus dem Modell heraus hierauf zugegriffen werden kann. Diese Vektorisierung und die Ablage der Vektoren im *Workspace* bilden die in Abbildung 5.9 dargestellte Schnittstelle zwischen der Projekt-Datenbank und der Modellgenerierung.

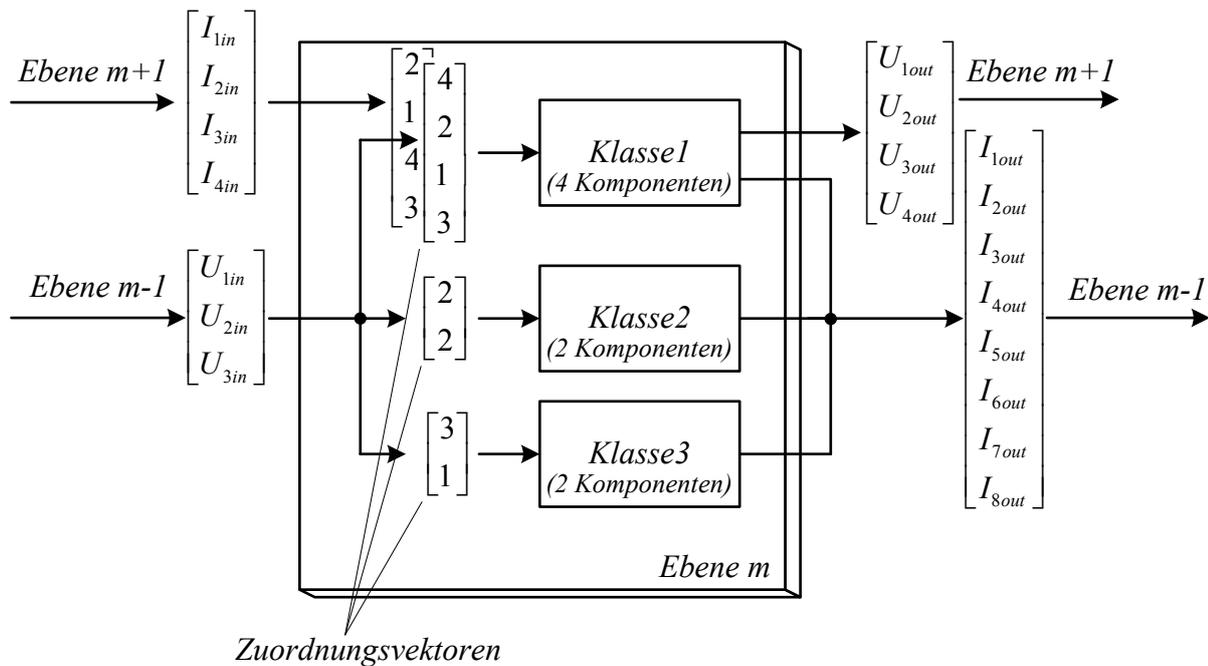


Abbildung 5.11 Topologische Zuordnung der Komponenten in einer Ebene. In diesem Beispiel werden insgesamt acht Komponenten drei Eingangsspannungen und 4 Eingangsströme zugeordnet. Ausgangsseitig gibt jede Komponente einen Strom aus. Die Klasse 1 hat in diesem Beispiel noch die Eigenschaft, dass an ihr weitere Komponenten der nächsten Ebene angeschlossen werden können.

Die Topologie der Verbraucher wird über Zuordnungsvektoren im Modell nach den Vorgaben aus der Projekt-Datenbank erstellt und ebenfalls im *Workspace* abgelegt. Die Zuordnungsvektoren ordnen jedem Verbraucher eine Eingangsspannung aus dem Spannungseingangsvektor der Ebene zu. Aus dem Stromeingangsvektor werden jedem Verbraucher der Klasse der Steuergeräte zusätzlich die Ströme der an dem Steuergerät angeschlossenen Verbraucher zugeordnet. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 5.11 ein Beispiel dargestellt. Hier wird z.B. die Spannung  $U_{3in}$  der ersten Komponente aus Klasse 3 zugeordnet und die Spannung  $U_{1in}$  wird deren zweiten Komponente zugeordnet.

Die Modellgenerierung mit Hilfe eines parametrierbaren Mastermodells ermöglicht es, komplexe Strukturen mit relativ geringem Aufwand nachzubilden. Topologieände-

rungen in einem bestehenden System, was bei modellgestützter Entwicklung häufig gefordert wird, können somit ohne großen Aufwand durch Parametrierung umgesetzt werden. Dieser Ansatz wird daher hier zur Generierung von Bordnetzmodellen verwendet.



# 6 ANALYSE UND MODELLIERUNG DER BORDNETZKOMPONENTEN

Die Betrachtungen in dieser Arbeit konzentrieren sich auf 14V-Bordnetze, wie sie in aktuellen Fahrzeugen zu finden sind. Bei den Energie erzeugenden Elementen werden daher insbesondere riemengetriebene Generatoren betrachtet. Hierfür wird ein Modell entwickelt, das bisher nicht berücksichtigte Eigenschaften abbildet. Bei den Energiespeichern wird das Hauptaugenmerk auf herkömmliche Bleibatterien gelegt, für deren Modellierung auf bereits vorhandene Modelle zurückgegriffen wird. Bleibatterien wurden bereits in vielen Arbeiten untersucht und es existieren Modelle, die die verschiedenen Eigenschaften abbilden. Die Methoden und Verfahren in dieser Arbeit können jedoch auch auf Energiequellen und -speicher anderer Technologien wie z.B. Integrierte-Startergeneratoren (ISG) oder Lithium-Ionen Speicher angewendet werden. Bei den elektrischen Verbrauchern und den Elementen der Energieverteilung werden alle aktuell verfügbaren Typen und Varianten betrachtet. Die Modelle hierfür werden auf Grund der hohen Anzahl dieser Elemente möglichst einfach gehalten.

Die Untersuchungen der einzelnen Systeme werden unter den Aspekten der statischen und dynamischen Leistungsfähigkeit betrachtet. Bei den statischen Betrachtungen wird der Wert der Ausgangsgröße  $y$  zum Zeitpunkt  $t$  nur durch den zum gleichen Zeitpunkt anstehenden Wert der Eingangsgröße  $u$  ermittelt, so dass die Gleichung

$$y(t) = S(u(t)) \tag{6.1}$$

gilt, wobei  $S$  eine Funktion ist, die den Wertebereich der Eingangsgröße in den Wertebereich der Ausgangsgröße abbildet [Lun03]. Bei den dynamischen Betrachtungen hängt der Wert der Ausgangsgröße nicht nur von der zu diesem Zeitpunkt anstehenden Eingangsgröße ab, sondern ist zusätzlich vom bisherigen Verlauf der Eingangsgröße abhängig [Lun03]:

$$y(t) = S(u_{[-\infty, t]}) \tag{6.2}$$

Die Untersuchung der einzelnen Systeme bzw. Systemeigenschaften kann über die theoretische oder über die experimentelle Prozessanalyse angegangen werden, woraus die in Abschnitt 5.2 erläuterten physikalischen bzw. phänomenologischen Modelle erstellt werden können. Die folgenden Untersuchungen werden teils mit der theoretischen Prozessanalyse und teils mit der experimentellen Prozessanalyse durchgeführt, wodurch hier hybride Modelle entstehen.

## 6.1 Kfz-Generatoren

Seit Ende des 19. Jahrhunderts werden synchrone Drehstromgeneratoren in Klauenpolausführung zur Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie eingesetzt. Ein populäres Beispiel ist die erste Übertragung elektrischer Energie mit hochgespanntem Drehstrom zwischen Lauffen am Neckar und Frankfurt am Main. Durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger Halbleiterdioden werden Klauenpolgeneratoren seit Ende der 1960er Jahre auch in Kraftfahrzeugen flächendeckend eingesetzt. Die bis dahin eingesetzten Gleichstromgeneratoren wurden auf Grund der Robustheit, des besseren Leistungsgewichtes und des größeren Drehzahlbereichs, der von Klauenpolgeneratoren abgedeckt werden kann, verdrängt. Das Grundprinzip der Drehstromgeneratoren in Kraftfahrzeugen hat sich bis heute bewährt. Es wurden durch die stetige Weiterentwicklung und Optimierung lediglich kleinere Baugrößen und höhere Wirkungsgrade erreicht [Upp92] [Sch03].

### 6.1.1 Aufbau und Funktionsweise

*Klauenpolgeneratoren sind eine Sonderbauform der Schenkelpol-Synchronmaschine. Der Unterschied zur normalen Schenkelpol-Synchronmaschinen liegt darin, dass Klauenpolgeneratoren nur mit einer, konzentrisch auf dem rotierenden Teil der Maschine angeordneten Erregerwicklung aufgebaut werden. Normale Schenkelpol-maschinen dagegen verfügen meist über Pole mit Einzelzahnwicklungen [Sch06]. Die aktuell verbreitet eingesetzte Ausführungsform des Klauenpolgenerators in Kraftfahrzeugen ist der Compact-Generator, dessen Aufbau im Folgenden anhand von*

Abbildung 6.1 erläutert wird. Der Compact-Generator hat seine Bezeichnung durch die kompakte Bauform bekommen, die durch die zweiflutige Belüftung mittels zwei im Inneren der Maschine liegenden Lüftern (7) erreicht wird [Mey02]. In dem Aluminium-Druckgussgehäuse (1) sind mit Nuten versehene Blechpakete angebracht, in denen die dreiphasigen Statorwicklungen (2) untergebracht sind. Zusammen werden diese feststehenden Komponenten als Stator oder auch als Ständer bezeichnet. Der

Läufer, oder auch Rotor genannt, dient als Aufnahme für die klauenförmigen Magnetpole (3), die Erregerwicklung und die beiden Lüfter (7).

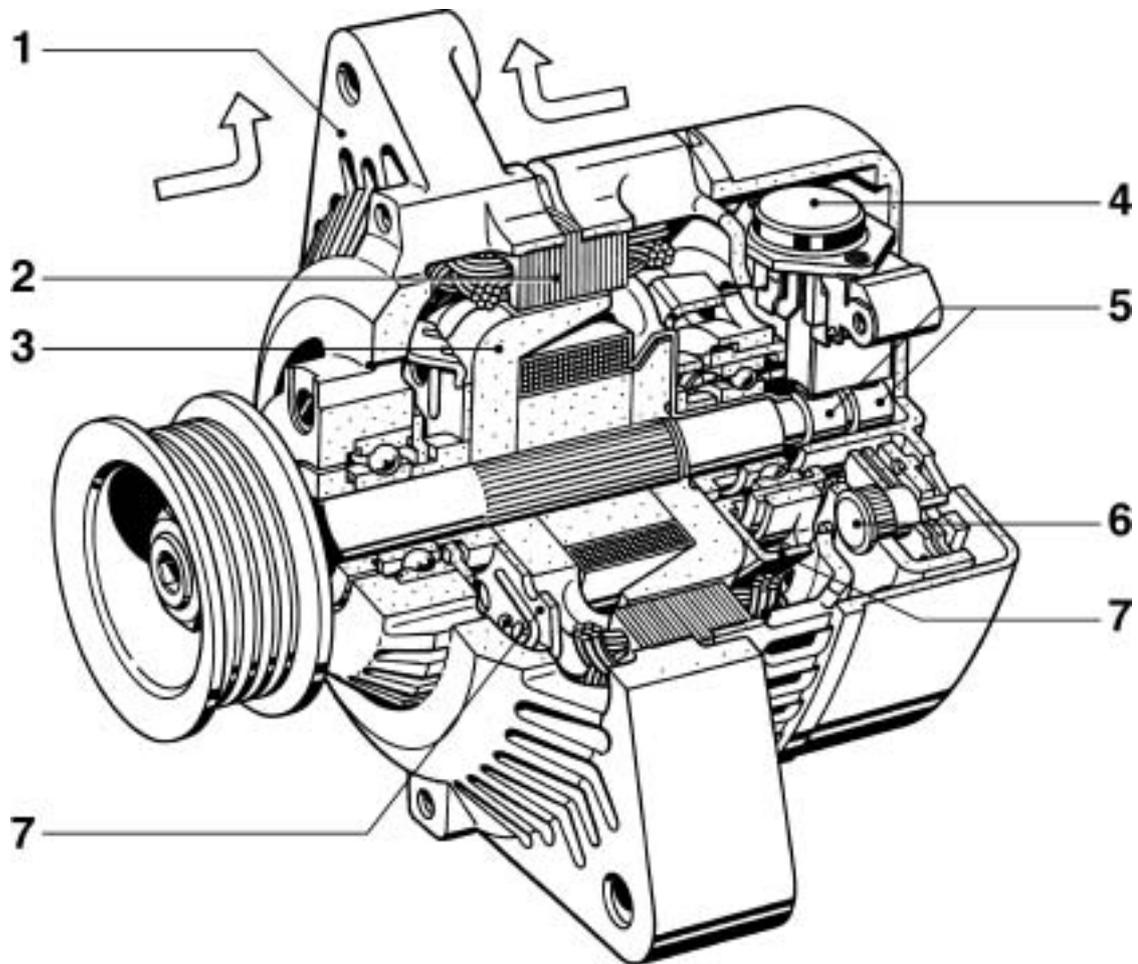


Abbildung 6.1 Schnittbild eines Klauenpolgenerators in Compact-Bauform mit den gekennzeichneten Elementen: (1) Gehäuse, (2) Statorwicklung, (3) Magnetpole, (4) Spannungsregler, (5) Schleifringe, (6) Gleichrichterdiode und (7) Lüftern [Mey02].

Über die Schleifringe (5) wird mittels der Kohlebürsten der Kontakt von der Erregerwicklung zum elektronischen Spannungsregler (4), der am Lagerschild angebracht ist, hergestellt. Neben dem Spannungsregler ist am Lagerschild auch der Gleichrichter, der aus einer Schaltung von mehreren, in Kühlbleche gepressten Gleichrichterdiode (6) besteht, angebracht [Mey02].

Dieser Aufbau ermöglicht die Wandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie basierend auf dem elektrodynamischen Prinzip der Selbsterregung das erstmals 1851 von Søren Hjorth<sup>2</sup> formuliert wurde:

*„By passing the current on the said way round the electromagnets, these will of course be excited in proportion to the strength of the same, and the more they are excited, the more will the discs be influenced by the magnets, a mutual action thus taking place.“ [Smi12].*

Durch die auf dem Läufer aufgebrachte Erregerwicklung wird bei einer angelegten Gleichspannung ein Magnetfeld erzeugt. Zusammen mit der Rotation des Läufers und somit auch der Rotation des Magnetfeldes werden in den Statorwicklungen Spannungen induziert, die durch das allgemeine, durch Michael Faraday<sup>3</sup> aufgestellte Induktionsgesetz nach Gleichung (6.3) beschrieben werden können [Küp08].

$$u_i = \oint E \cdot ds = -\frac{d\phi}{dt} \quad (6.3)$$

Es besagt, dass die Umlaufspannung  $u_i$  in einer geschlossenen Schleife gleich der Abnahmegeschwindigkeit des magnetischen Flusses ist. Für einen geschlossenen Stromkreis kann diese Umlaufspannung wie eine Quellspannung behandelt werden [Küp08]. Durch die versetzt angeordneten Statorwicklungen wird in der Maschine eine dreiphasigen Wechselspannung erzeugt, die über eine Gleichrichterschaltung in eine Gleichspannung umgeformt wird. Um eine möglichst geringe Welligkeit der Gleichspannung zu bekommen, wird in aktuellen Generatoren ein B6-Brückengleichrichter mit einem Glättungskondensator eingesetzt. In Abbildung 6.2 im Bereich 3 ist die Verschaltung des Generators mit dem Gleichrichter, der Glättungskondensator und die Erregerwicklung dargestellt. Die Anschlusspunkte des Gleichrichters werden mit  $B+$  und  $B-$  bezeichnet. An der Erregerwicklung liegt ebenfalls die Klemme  $B+$  zur Versorgung der Wicklung an und die Klemme  $DF$  (Dynamo Feld), über die durch Taktung die Höhe des Erregerstroms eingestellt wird. Da der Generator nach dem Anlaufen seinen Erregerstrom selbst erzeugt, spricht man hier von Selbsterregung. Der Phasenanschluss  $V$  dient zur Bestimmung der Generator Drehzahl. Über die Frequenz der induzierten Spannung kann die Drehzahl der Maschine abgeleitet werden. Aktiviert wird der Generator, wenn er über den Anschluss  $L$  das Signal „Zündung ein“ erhält. Der Anschluss  $DFM$  (Dynamo Feld Monitor) dient zur Ausgabe der Auslastung des Generators. Moderne Generatoren verfügen anstatt der Anschlüsse  $L$  und  $DFM$

---

<sup>2</sup> Søren Hjorth war ein dänischer Eisenbahn pionier und Erfinder († 28. August 1870).

<sup>3</sup> Michael Faraday war ein englischer Physiker und Chemiker († 25. August 1867).

über eine LIN-Schnittstelle, über die diese Informationen sowie weitere Parameter und Diagnosesignale übertragen werden können.

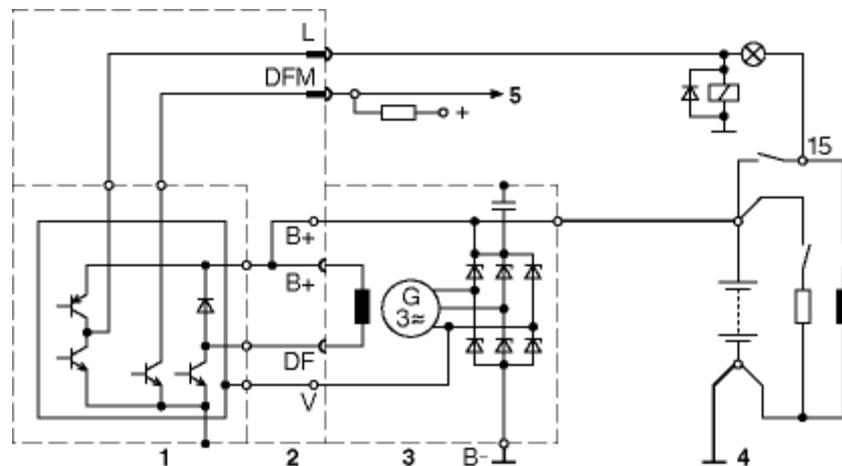


Abbildung 6.2 Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Drehstromgenerators (3) mit Multifunktionsregler (1), Schnittstellen und Klemmenbezeichnungen (2) sowie einem exemplarischen Bordnetz (4) [Mey02].

Durch den beschriebenen mechanischen Aufbau von Klauenpolgeneratoren haben diese prinzipbedingt statische und dynamische Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Betrachtungen ist es von großer Bedeutung diese Leistungsgrenzen und deren Abhängigkeiten zu kennen. Wichtige Größen, von denen die Leistungsfähigkeit der Maschine abhängig ist, sind die Temperaturen der Wicklungen. Gerade in Kraftfahrzeugen ist der thermische Einfluss durch die extremen Betriebsbedingungen besonders groß. Auf Grund der komplexen Zusammenhänge zwischen dem Temperatureinfluss und der Leistungsfähigkeit der Maschine wird dieser Einfluss hier gesondert betrachtet.

### 6.1.2 Thermische Betrachtungen

In Kraftfahrzeugen werden Generatoren in einem großen Temperaturbereich betrieben. Die Ursachen für die Temperaturänderungen können die variable Außentemperatur, die Erwärmung durch den Verbrennungsmotor, die Erwärmung durch die Lagerreibung, die Erwärmung auf Grund des Stromflusses und die Kühlung durch die integrierten Lüfter sein. Die Temperaturänderungen wirken sich auf die Statorwicklung und die Erregerwicklung aus und beeinflussen dadurch die elektrische Leistungsfähigkeit des Generators.

Zunächst wird eine Ausgangstemperatur  $T_0$  im Inneren der Maschine bestimmt, die als Basis für die Ermittlung der Wicklungstemperaturen dient. Sie ist von der Umge-

bungstemperatur abhängig, der sich die Wicklungstemperatur nach endlicher Zeit angleicht. Zusätzlich enthält sie einen von der Rotordrehzahl  $n_{Rot}$  abhängigen Temperaturanteil  $\mathcal{G}_n$ . Hierin sind verschiedene Einflüsse durch Reibung und Belüftung enthalten. Gleichung (6.4) beschreibt diese Zusammenhänge.

$$T_0 = T_U + \mathcal{G}_n(n_{Rot}) \quad (6.4)$$

Der Generator wird in Fahrzeugen so positioniert, dass er sich im Luftstrom des Motorlüfters befindet. Eine beispielhafte Temperaturverteilung vor dem Motorblock bei Leerlaufdrehzahl ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

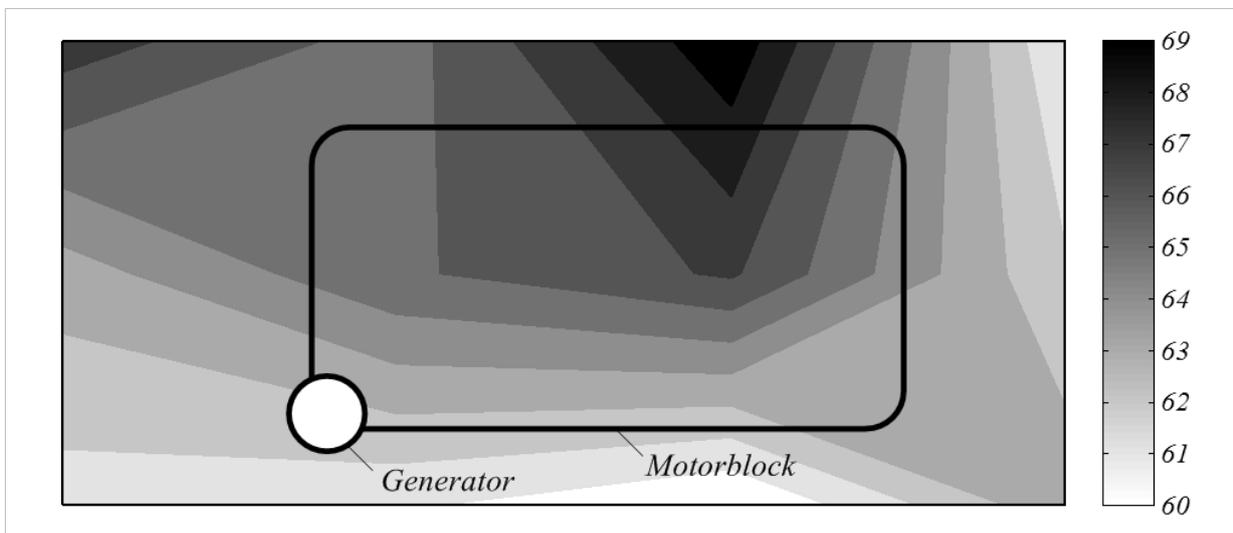


Abbildung 6.3 Temperaturverteilung im Motorraum mit Blick von vorne auf den Motor und eingezeichneter Position des Generators am Beispiel eines Motors vom Typ M271 bei Leerlaufdrehzahl. Die Messstellen wurden etwa 5cm vor dem Motorblock angebracht. Die Außentemperatur betrug bei dieser Messung 23 °C.

Für die Umgebungstemperatur  $T_U$  stellen sich unter diesen Bedingungen Temperaturen von maximal 80 °C ein. Die exakte Umgebungstemperatur  $T_U$  ist jedoch motor- und fahrzeugspezifisch und muss speziell für den jeweiligen Einsatzort ermittelt werden. Im Weiteren wird diese als gegeben angenommen.

Zur Bestimmung des Temperaturanteils  $\mathcal{G}_n$  wurden Messwerte bei verschiedenen Drehzahlen und Umgebungstemperaturen aufgenommen, bei denen der Generator keine Leistung abgibt. Die Messwerte sind in Abbildung 6.4 dargestellt. Die Messwerte des drehzahlabhängigen Temperaturanteils  $\mathcal{G}_n$  können über die Exponentialfunktion nach Gleichung (6.5) angenähert werden.

$$\mathcal{G}_n = p_{n2} \cdot e^{p_{n1} \cdot n_{Rot}} + p_{n0} \quad (6.5)$$

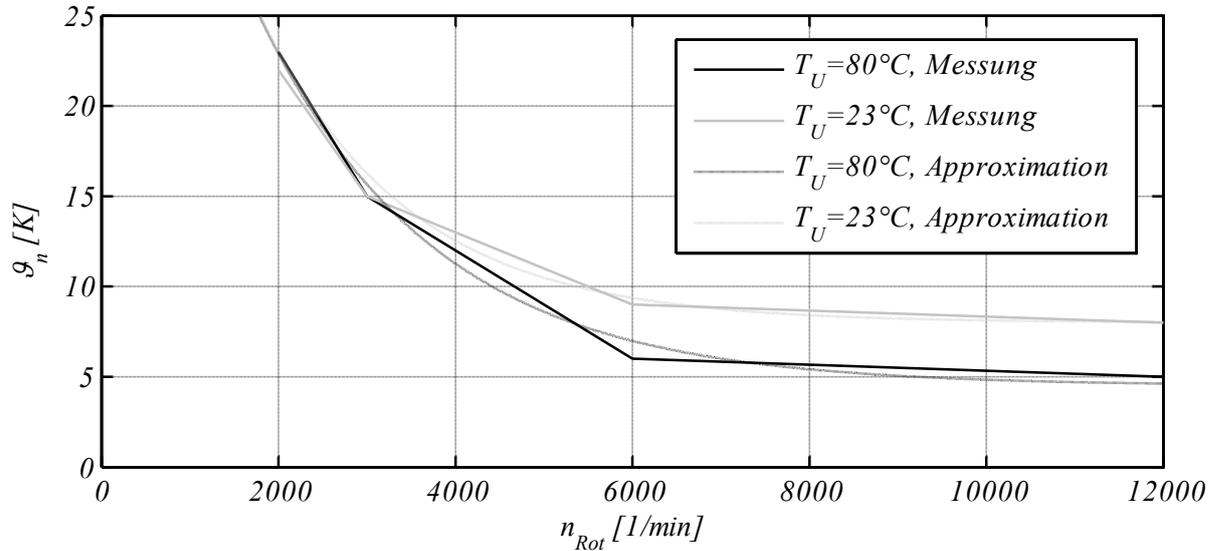


Abbildung 6.4 Abhängigkeit des Temperaturanteils  $\vartheta_n$  von der Rotordrehzahl  $n_{Rot}$ . Durch den überwiegenden Einfluss des am Rotor befestigten Lüfters sinkt der Temperaturanteil  $\vartheta_n$  mit steigender Drehzahl.

Die Parameter aus Gleichung (6.5) zur Approximation der Kennlinie an die Messwerte sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Sie wurden durch heuristische Methoden ermittelt. Die beiden Parameter  $p_{n0}$  und  $p_{n1}$  sind wiederum von der Umgebungstemperatur abhängig und können durch die linearen Funktionen

$$p_{n0} = p_{n02} \cdot T_U + p_{n01} \quad (6.6)$$

und 
$$p_{n1} = p_{n12} \cdot T_U + p_{n11} \quad (6.7)$$

mit den ermittelten Parametern aus Tabelle 6.4 berechnet werden.

Tabelle 6.1 Parameter der Approximationsgleichung des drehzahlabhängigen Temperaturanteils.

$T_U$ [°C]	$p_{n2}$ [K]	$p_{n1}$ [s]	$p_{n0}$ [K]
23	50	$-6 \cdot 10^{-4}$	8
80	50	$-5 \cdot 10^{-4}$	4,5

Aus Gleichung (6.4) bis (6.7) ergibt sich für  $T_\theta$  die Gleichung

$$T_\theta = T_U + p_{n2} \cdot e^{(p_{n12} \cdot T_U + p_{n11}) \cdot n_{Rot}} + p_{n02} \cdot T_U + p_{n01} \cdot \quad (6.8)$$

Ausgehend von der maximalen Umgebungstemperatur von  $T_{U,\max} = 80 \text{ °C}$  ergibt sich für die Temperatur  $T_0$  ein maximaler Wert von  $104 \text{ °C}$  bei der minimalen Rotordrehzahl bei laufendem Verbrennungsmotor von etwa  $1500 \text{ 1/min}$ .

Im Folgenden wird der Temperatureinfluss auf die Statorwicklung betrachtet. Aus Überlegungen und vorhergehenden Untersuchungen heraus wird das System mit den in Abbildung 6.5 angegebenen Ein- und Ausgangsgrößen betrachtet. Die Ausgangstemperatur  $T_0$ , der Generatorstrom  $I_{Gen}$  und die Rotordrehzahl  $n_{Rot}$  sind die Haupteinflussgrößen dieses Systems. Der Wärmeeintrag des Erregerstroms auf die Statorwicklung wird auf Grund der Geringfügigkeit vernachlässigt.



Abbildung 6.5 Blockschaltbild der Statorwicklung mit den Eingangsgrößen Umgebungstemperatur  $T_U$ , Generatorstrom  $I_{Gen}$  und Rotordrehzahl  $n_{Rot}$  sowie der Temperatur der Statorwicklung  $T_S$  als Ausgangsgröße.

Zur Ermittlung des Systemverhaltens werden Messungen herangezogen, welche die Abhängigkeiten der erwähnten Einflussfaktoren beinhalten. In Abbildung 6.6 sind die aus den Messungen extrahierten Kennlinien dargestellt, deren jeweilige Parameter Tabelle 6.2 entnommen werden können. Aus dem Verlauf der Kennlinien kann die Abhängigkeit vom Generatorstrom direkt abgeleitet werden. Die Ausgangstemperatur  $T_0$  bewirkt hierbei einen direkten Versatz der Temperatur der Statorwicklung, wodurch dieser als Summenanteil in Gleichung (6.9) eingeht.

$$T_S = T_0 + \mathcal{G}_I(I_{Gen}) \quad (6.9)$$

Die Abhängigkeit der Wicklungstemperatur vom Generatorstrom kann über eine quadratische Funktion beschrieben werden. Es kann die Gleichung

$$\mathcal{G}_I = p_I \cdot I_{Gen}^2 \quad (6.10)$$

aufgestellt werden um den charakteristische Verlauf der gemessenen Kennlinien zu approximieren.

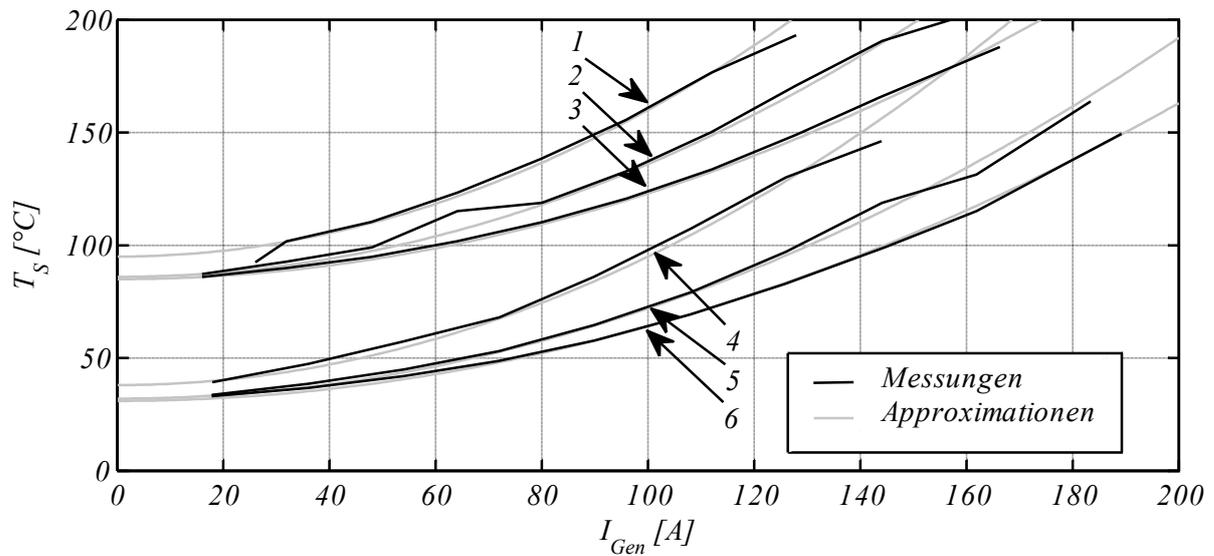


Abbildung 6.6 Abhängigkeit der Wicklungstemperatur  $T_S$  vom Generatorstrom  $I_{Gen}$  bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und Rotordrehzahlen am Beispiel eines Valeo Generators vom Typ TG17. Die durch Messungen ermittelten Kennlinien sind schwarz dargestellt und die durch Gleichungen (6.9) und (6.10) approximierten Kennlinien sind grau dargestellt. Die Parameter der approximierten Kennlinien sind Tabelle 6.2 zu entnehmen.

Der Parameter  $p_I$  ist die einzige noch unbekannte Größe in Gleichung (6.10). Durch heuristische Verfahren wurden für die in Abbildung 6.6 dargestellten Kennlinien der jeweils optimale Parameter  $p_I$  ermittelt.

Tabelle 6.2 Parameter  $n_{Rot}$ ,  $T_U$  und  $T_0$  sowie der zugehörigen Parameter  $p_I$  der Approximationsgleichung des stromabhängigen Temperaturanteils.

Messung	$n_{Rot}$ [1/min]	$T_U$ [°C]	$T_0$ [°C]	$p_I$ [K/A <sup>2</sup> ]
1	12000	80	85	$3,3 \cdot 10^{-3}$
2	6000	80	86	$4 \cdot 10^{-3}$
3	3000	80	95	$5,7 \cdot 10^{-2}$
4	12000	23	31	$3,8 \cdot 10^{-3}$
5	6000	23	32	$5 \cdot 10^{-3}$
6	3000	23	38	$6,5 \cdot 10^{-3}$

Die approximierten Kennlinien mit dem Versatz um die Ausgangstemperatur  $T_0$  sind ebenfalls in Abbildung 6.6 dargestellt und die Werte der ermittelten Parameter sind in Tabelle 6.2 aufgeführt.

Aus der grafischen Darstellung des Parameters  $p_I$  in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl in Abbildung 6.7 wird dessen Einfluss verdeutlicht. Die Messungen wurden bei zwei verschiedenen Temperaturen aufgenommen, um auch diesen Einfluss sichtbar zu machen.

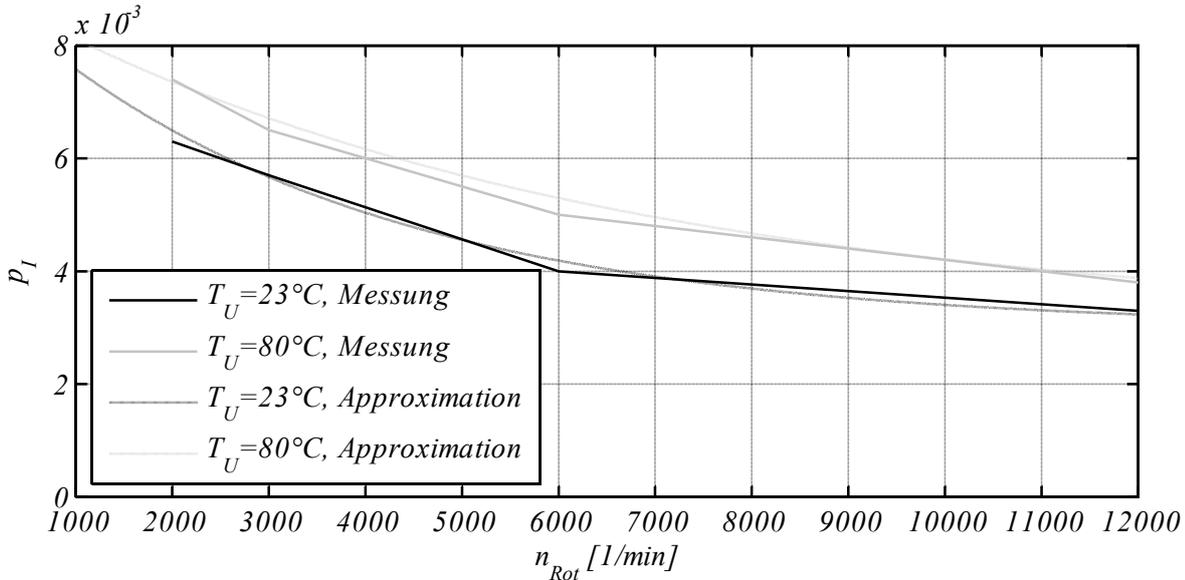


Abbildung 6.7 Abhängigkeit des Parameters  $p_I$  von der Rotordrehzahl am Beispiel eines Valeo Generators vom Typ TG17.

Es ist ein exponentieller Zusammenhang zwischen dem Parameter  $p_I$  und der Rotordrehzahl erkennbar, der über die Gleichung

$$p_I = p_{I2} \cdot e^{p_{I1} \cdot n_{Rot}} + p_{I0} \quad (6.11)$$

beschrieben werden kann. Die Parameter der Approximationsgleichung wurden wieder für die jeweilige Messung ermittelt und in Tabelle 6.3 eingetragen.

Tabelle 6.3 Parameter der Approximationsgleichung der Temperaturabhängigkeit von  $p_I$  für zwei Umgebungstemperaturen.

$T_U$ [°C]	$p_{I2}$ [K/A <sup>2</sup> ]	$p_{I1}$ [s]	$p_{I0}$ [K/A <sup>2</sup> ]
23	$6 \cdot 10^{-3}$	$-2,7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
80	$6 \cdot 10^{-3}$	$-1,6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$

Wie in Tabelle 6.3 zu sehen, ist nur der Parameter  $p_I$  von der Umgebungstemperatur abhängig. Die Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur wird auf Grund der

wenigen Messdaten als linear angenommen. Die Beziehung kann über die Geradengleichung

$$p_{I1} = p_{I11} \cdot T_U + p_{I10} \quad (6.12)$$

mit  $p_{I10} = -3,1 \cdot 10^{-4} \text{ s}$  und  $p_{I11} = -1,9 \cdot 10^{-6} \text{ s/}^\circ\text{C}$  beschrieben werden. Die Parameter wurden aus den Stützstellen in Tabelle 6.3 ermittelt. Aus den zuvor aufgestellten Gleichungen kann die Berechnung der Wicklungstemperatur durch die Gleichung

$$T_S = \left( p_{I2} \cdot e^{-(p_{I11} \cdot T_U + p_{I10}) \cdot n_{Rot}} + p_{I10} \right) \cdot I_{Gen}^2 - p_{n02} \cdot n_{Rot} + p_{n2} \cdot e^{-(p_{n12} \cdot n_{Rot} + p_{n11})} + T_U + p_{n01} \quad (6.13)$$

mit den Parametern aus Tabelle 6.4 erfolgen.

*Tabelle 6.4 Übersicht der ermittelten Parameter für das Temperaturmodell der Statorwicklung.*

$p_{I2}$ [K/A <sup>2</sup> ]	$p_{I10}$ [K/A <sup>2</sup> ]	$p_{I11}$ [s/°C]	$p_{I10}$ [s]	$p_{n2}$ [K]	$p_{n12}$ [s]	$p_{n11}$	$p_{n02}$ [K·s]	$p_{n01}$ [K]
$6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$-3,1 \cdot 10^{-4}$	50	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$-6,4 \cdot 10^{-4}$	$-6,1 \cdot 10^{-2}$	9,4

Der Temperaturbereich, dem die Statorwicklung ausgesetzt sein kann, geht bei den aktuell verfügbaren Leistungsklassen der Generatoren nach oben hin bis zu einem Maximalwert von in etwa 250 °C. Die untere Grenze ist abhängig von der Umgebungstemperatur, die sich in Kaltländern auch unter -25 °C befinden kann. Hier kommt man jedoch in einen Bereich, in dem die Startfähigkeit des Fahrzeuges nicht mehr gewährleistet werden kann, und somit der Generator auch nicht angetrieben werden kann.

Der Temperatureinfluss auf die Erregerwicklung wird ebenfalls durch die Analyse von Messreihen bestimmt. Die möglichen Abhängigkeiten hierbei sind die statische Temperatur der Maschine und der Erregerstroms, der ebenfalls einen Wärmeeintrag verursacht. Für die Temperatur der Erregerwicklung wird die bereits beim Temperaturmodell der Statorwicklung ermittelte Temperatur  $T_0$  aus Gleichung (6.8) als Ausgangstemperatur angenommen. Die Temperaturerhöhung durch den Stromeintrag kann nur indirekt bestimmt werden, da es nicht möglich ist, die Temperatur der Erregerwicklung während des Betriebs zu messen. Als eine geeignete Messgröße wird die Temperatur am Reglergehäuse als Basis genommen, da die Erregerwicklung direkt an den Regler angeschlossen ist.

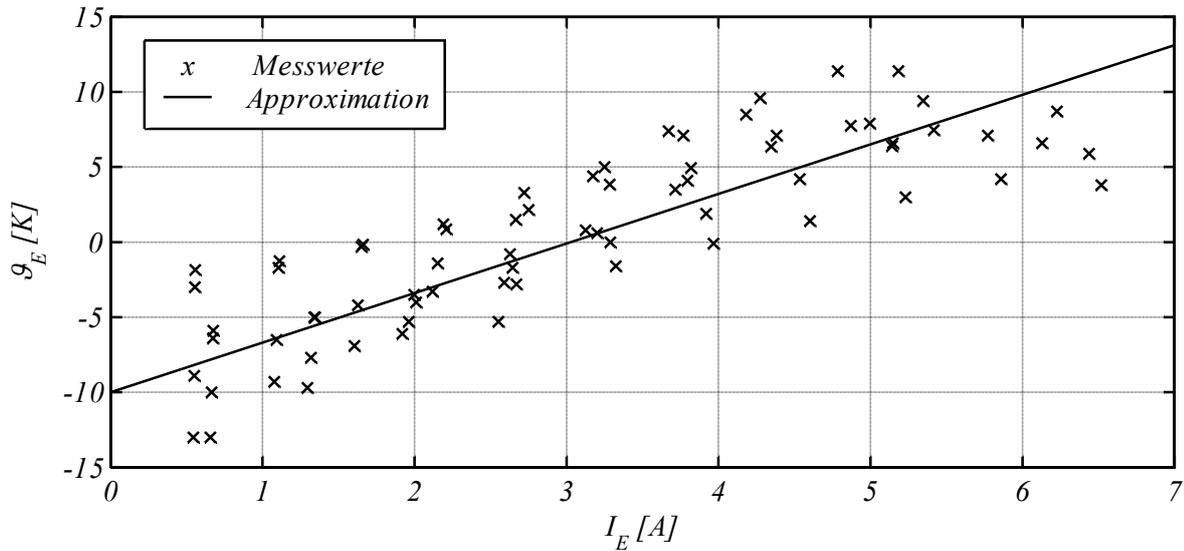


Abbildung 6.8 Temperatur am Reglergehäuse abzüglich der Temperatur  $T_0$ , aufgetragen über den Erregerstrom. Es wurden mehrere Messwerte bei verschiedenen Rotordrehzahlen und Umgebungstemperaturen aufgenommen. Auf Grund der Streuung der Messwerte wurde als Näherung eine Approximationsgerade eingezeichnet.

In Abbildung 6.8 ist die Temperatur am Reglergehäuse  $T_R$  abzüglich der Temperatur  $T_0$  aus mehreren Messungen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und Rotordrehzahlen eingetragen. Durch die Streuung der Messwerte konnte kein weiterer Einfluss, wie z.B. der Wärmeeintrag durch den Strom der Statorwicklung, einzeln herausgelöst werden. Es wird folgender Zusammenhang angenommen:

$$T_E = T_0 + g_E(I_E) \quad (6.14)$$

Eine Approximation durch eine Gerade wird an dieser Stelle als ausreichend genau erachtet. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird deutlich, dass Abweichungen in dieser Größenordnung einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf das Verhalten der Maschine haben. Durch die höheren Temperaturen im Inneren der Maschine, wo sich die Erregerwicklung befindet, als außen am Reglergehäuse, kommt es bei den eingetragenen Werten in Abbildung 6.8 zu einer Verschiebung um ein Temperaturanteil  $g_{E,0}$ . Für die Approximationsgerade kann die Gleichung

$$g_E = p_E \cdot I_E + g_{E,0} \quad (6.15)$$

aufgestellt werden. Da hier jedoch die Temperatur an der Erregerwicklung gesucht ist, kann der Temperaturversatz  $g_{E,0}$  an dieser Stelle auf

$$\vartheta_{E,0} = 0 \text{ K} \quad (6.16)$$

gesetzt werden. Für Gleichung (6.15) wurde mit  $p_E = 3,3 \text{ K/A}$  ein geeigneter Wert für diesen Parameter ermittelt. Die Gleichung für das Temperaturmodell der Erregerwicklung ergibt sich aus den beiden Gleichungen (6.14) und (6.15) zu:

$$T_E = T_0 + p_E \cdot I_E. \quad (6.17)$$

Für die Temperatur der Erregerwicklung ergibt sich mit dem zuvor bereits bestimmten maximalen Wert der Temperatur  $T_0$  eine maximale Temperatur  $T_E$  von  $125 \text{ °C}$ . In Abbildung 6.9 ist das Blockschaltbild des Temperaturmodells der Erregerwicklung mit den aus den Abhängigkeiten abgeleiteten Eingangsgrößen dargestellt.

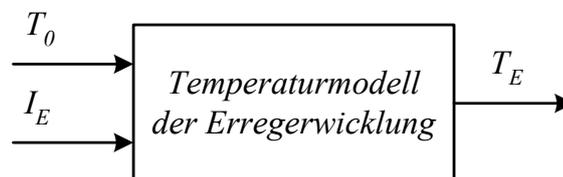


Abbildung 6.9 Blockschaltbild der Erregerwicklung mit den Eingangsgrößen der Temperatur  $T_0$  und dem Erregerstrom  $I_E$  sowie der Temperatur der Erregerwicklung  $T_E$  als Ausgangsgröße.

Die in diesem Abschnitt aufgestellten Temperaturmodelle wurden mit den Messwerten eines Generatortyps ermittelt. Ein anschließender Vergleich des Temperaturmodells mit den Messwerten anderer Generatortypen ergab eine Übereinstimmung der Ergebnisse. Das Temperaturmodell ist somit universell für Generatoren mit dieser Aufbauform einsetzbar. Mit Hilfe der Teilmodelle der Temperatur der Stator- und der Erregerwicklung kann im Folgenden die Leistungsfähigkeit der Maschine unter den Betriebsbedingungen im Fahrzeug betrachtet werden.

### 6.1.3 Statische Leistungsfähigkeit

Klauenpolgeneratoren haben durch langjährige Optimierungsprozesse hinsichtlich ihrer Baugrößen und ihres Wirkungsgrades einen sehr komplexen inneren Aufbau bekommen. Durch die ausgeprägte dreidimensionale Flussführung über die Klauenpole lassen sich alleine unter Verwendung der theoretischen Prozessanalyse, durch die analytische Beschreibung von Klemmengrößen und inneren Größen über Knoten-, Maschen- und Bewegungsgleichungen, keine ausreichend genauen Aussagen über das Betriebsverhalten der Maschine treffen. Diese Behauptung wird in [Sch06] durch ausführliche analytische Untersuchungen bestätigt.

Für die Betrachtungen in dieser Arbeit wird daher die mathematische Beschreibung der Schenkelpol-Synchronmaschine herangezogen, und es werden zusätzlich die hierin nicht berücksichtigten Einflussgrößen auf das elektrische Verhalten des Generators analysiert und bewertet, um daraus das Gesamtverhalten ableiten zu können. Zur Vereinfachung der mathematischen Beschreibung wird die Raumzeigerdarstellung verwendet, bei der die dreiphasigen, um jeweils  $120^\circ$  versetzt angeordneten, Statorwicklungen in zwei senkrecht zueinander angeordneten Wicklungen transformiert werden. Aus der Darstellung der Synchron-Schenkelpolmaschine im d-q-System in Abbildung 6.10 können direkt, unter Berücksichtigung der grundlegenden Zusammenhänge aus der Feldtheorie, die Gleichungen der Flussverkettungen aufgestellt werden:

$$\Psi_d = L_d \cdot I_d + M_{dE} \cdot I_E \quad (6.18)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot I_q \quad (6.19)$$

$$\Psi_E = L_E \cdot I_E + M_{dE} \cdot I_d \quad (6.20)$$

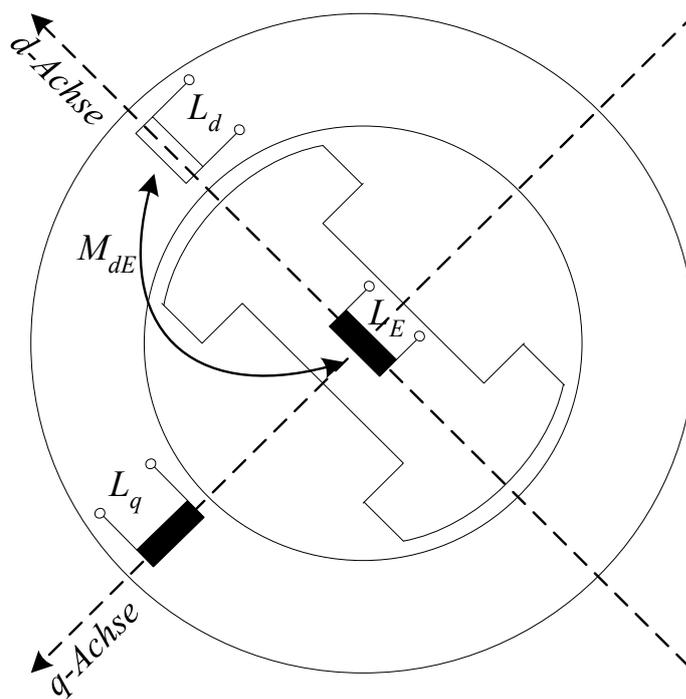


Abbildung 6.10 Darstellung der Synchron-Schenkelpolmaschine im d-q-System mit der Erregerinduktivität  $L_E$  und den abstrahierten Induktivitäten  $L_d$  und  $L_q$ .

Die Erregerinduktivität  $L_E$  und die Induktivität auf der q-Achse  $L_q$  sind bei diesem Aufbau der Maschine nicht miteinander verkettet. Daraus folgt:

$$M_{qE} = 0 \quad (6.21)$$

Die beiden Induktivitäten der d- und q-Achse werden für die weiteren Betrachtungen in Haupt- und Streuinduktivität zerlegt:

$$L_d = L_{\sigma d} + L_{hd} \quad (6.22)$$

$$L_q = L_{\sigma q} + L_{hq} \quad (6.23)$$

Die Hauptinduktivität der d-Achse  $L_{hd}$  entspricht dabei der Gegeninduktivität  $M_{dE}$ :

$$L_{hd} = M_{dE} \quad (6.24)$$

Für die Vollständigkeit des Ersatzschaltbildes der Synchron-Schenkelpolmaschine im d-q-System in Abbildung 6.11 wird noch der Magnetisierungsstrom in der d-Achse  $I_{\mu d}$  eingeführt:

$$I_{\mu d} = I_d + I_E \quad (6.25)$$

Aus dem Ersatzschaltbild können die Spannungsgleichungen, die für die weiteren Betrachtungen relevant sind, abgeleitet werden:

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{d}{dt} (M_{dE} \cdot I_{\mu d} + L_{\sigma d} \cdot I_d) - \omega_L \cdot \Psi_q + R_1 \cdot I_d \\ &= \frac{d}{dt} (M_{dE} \cdot I_{\mu d} + L_{\sigma d} \cdot I_d) - \omega_L \cdot L_q \cdot I_q + R_1 \cdot I_d \end{aligned} \quad (6.26)$$

$$\begin{aligned} U_q &= \frac{d}{dt} ((L_{\sigma q} + L_{hq}) \cdot I_q) + \omega_L \cdot \Psi_d + R_1 \cdot I_q \\ &= \frac{d}{dt} ((L_{\sigma q} + L_{hq}) \cdot I_q) + \omega_L (M_{dE} \cdot I_{\mu d} + L_{\sigma d} \cdot I_d) + R_1 \cdot I_q \end{aligned} \quad (6.27)$$

$$\begin{aligned} U_E &= \frac{d\Psi_E}{dt} + I_E \cdot R_E \\ &= \frac{d}{dt} (M_{dE} \cdot I_{\mu d} + L_{\sigma E} \cdot I_E) + I_E \cdot R_E. \end{aligned} \quad (6.28)$$

Da in diesem Abschnitt der stationäre Betrieb der Maschine betrachtet wird, können die Spannungsgleichungen mit  $d/dt=0$  zu

$$U_d = -\omega_L \cdot (L_{\sigma q} + L_{hq}) \cdot I_q + R_1 \cdot I_d \quad (6.29)$$

$$U_q = \omega_L \cdot (M_{dE} \cdot I_{\mu d} + L_{\sigma d} \cdot I_d) + R_1 \cdot I_q \quad (6.30)$$

$$U_E = R_E \cdot I_E \quad (6.31)$$

vereinfacht werden.

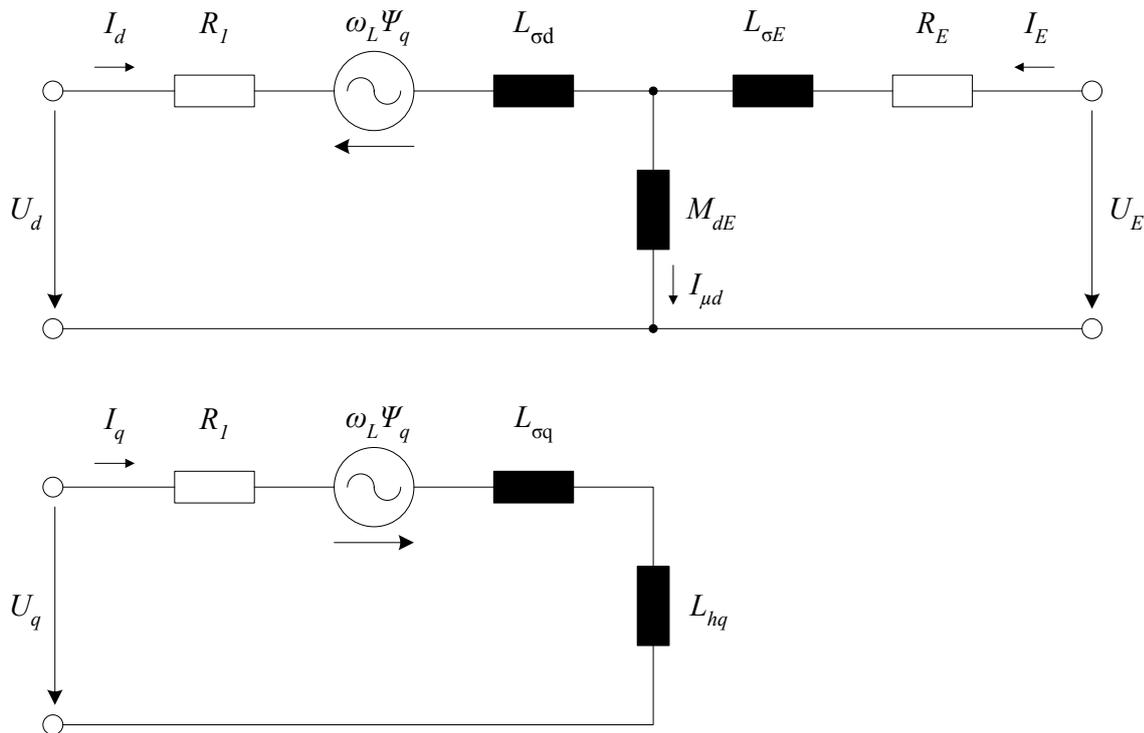


Abbildung 6.11 Ersatzschaltbild der Synchron-Schenkelpolmaschine im  $d$ - $q$ -System [Küp08].

Die im Stator induzierte Polradspannung wird durch den Erregerstrom  $I_E$  hervorgerufen. Der Term zur Berechnung der Polradspannung kann durch diese Erkenntnis aus Gleichung (6.30) mit Einsetzen der Gleichung (6.25) aufgestellt werden:

$$U_p = \omega_L \cdot M_{dE} \cdot I_E \quad (6.32)$$

Auf Basis der mathematischen Beschreibung und des Ersatzschaltbildes des Generators werden im Folgenden Effekte aufgezeigt, die in den bisherigen Betrachtungen vernachlässigt wurden, jedoch für statische Leistungsfähigkeit des Generators von Bedeutung sind.

Im Erregerkreis kann durch den Generatorregler die Spannung  $U_E$  und somit auch der Erregerstrom  $I_E$  beeinflusst werden. Durch das Umstellen von Gleichung (6.31) kann der Erregerstrom in Abhängigkeit des Erregerwiderstandes berechnet werden. In dieser Gleichung wird von einem konstanten Widerstand ausgegangen. In der Realität hingegen ist dieser jedoch durch die Temperaturabhängigkeit veränderlich. Auf Grund der großen Zeitkonstante der Temperaturänderung wird dieser Einfluss der statischen Betrachtung der Leistungsfähigkeit zugeordnet. Mit Hilfe der Gleichung

$$R_E = R_{E,20} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_E - 20 \text{ °C})) \quad (6.33)$$

ergibt sich für den betrachteten Temperaturbereich, bei einem typischen Erregerwiderstand von  $R_{E,20} = 2 \text{ } \Omega$  bei einer Wicklungstemperatur von  $T = 20 \text{ °C}$  und dem Temperaturkoeffizient von Kupfer mit  $\alpha_{cu} = 0,0039 \text{ 1/s}$ , ein Widerstand zwischen  $1,65 \text{ } \Omega$  und  $2,82 \text{ } \Omega$ . Dieser begrenzt den maximalen Strom in der Erregerwicklung, der für den Aufbau des Erregerfeldes bestimmend ist. In Abbildung 6.12 ist das Blockschaltbild der Erregerwicklung mit den ermittelten Eingangsgrößen dargestellt.

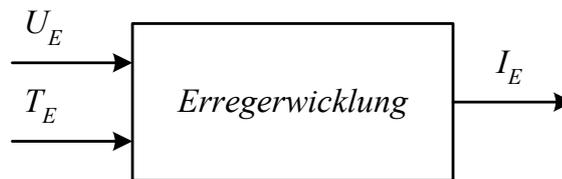


Abbildung 6.12 Blockschaltbild der Erregerwicklung mit den Eingangsgrößen der Erregerspannung  $U_E$  und der Temperatur der Erregerwicklung  $T_E$  sowie dem Erregerstrom  $I_E$  als Ausgangsgröße.

In Abbildung 6.13 sind die hieraus resultierenden Erregerströme in Abhängigkeit von der Temperatur für zwei unterschiedliche Spannungen dargestellt. In dem betrachteten Temperaturbereich sind relativ große Änderungen des maximalen Erregerstroms möglich, die sich nach Gleichung (6.32) direkt auf die maximale Polradspannung auswirken. Durch die Sättigung des Eisenkerns bei hohem Erregerstrom kann man den proportionalen Zusammenhang zwischen Erregerstrom und induzierter Polradspannung aus dieser Gleichung in eine nichtlineare Abhängigkeit überführen. Die maximale Höhe der Polradspannung in Gleichung (6.32) ist zusätzlich noch von der Kreisfrequenz der Statorströme abhängig. Über die Polpaarzahl  $p$  kann diese aus der Winkelgeschwindigkeit des Rotors  $\omega_m$  berechnet werden:

$$\omega_L = \omega_m \cdot p \quad (6.34)$$

Die Abhängigkeiten des maximalen Generatorstroms nach Gleichrichtung der Rotordrehzahl und des Erregerstroms sind in einem durch Messungen aufgenommenen Kennfeld eines beispielhaften Generators in Abbildung 6.14 dargestellt.

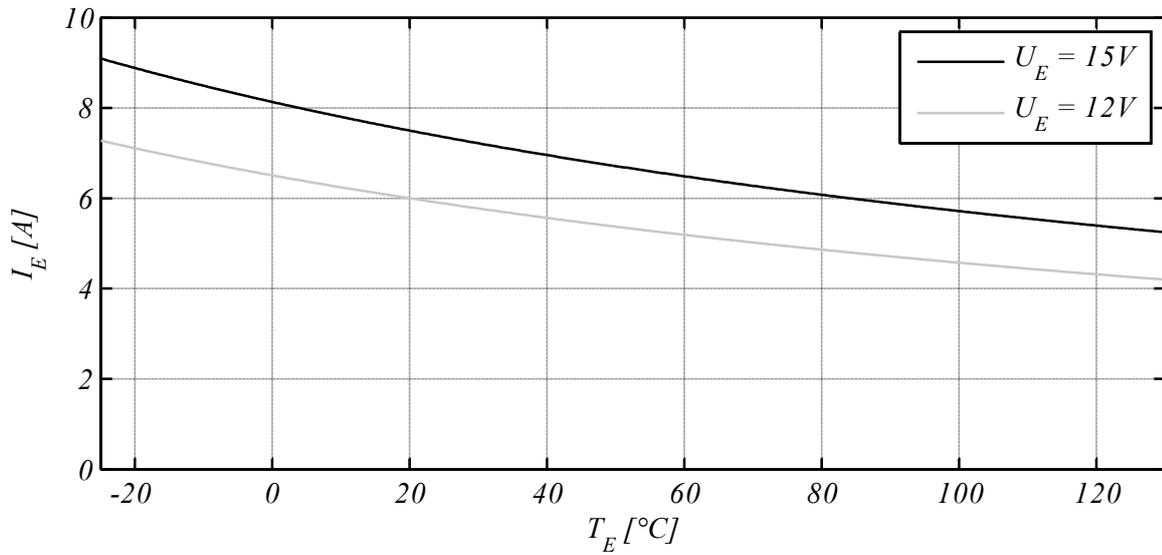


Abbildung 6.13 Abhängigkeit des maximalen Erregerstroms von der Wicklungstemperatur bei verschiedenen Erregerspannungen.

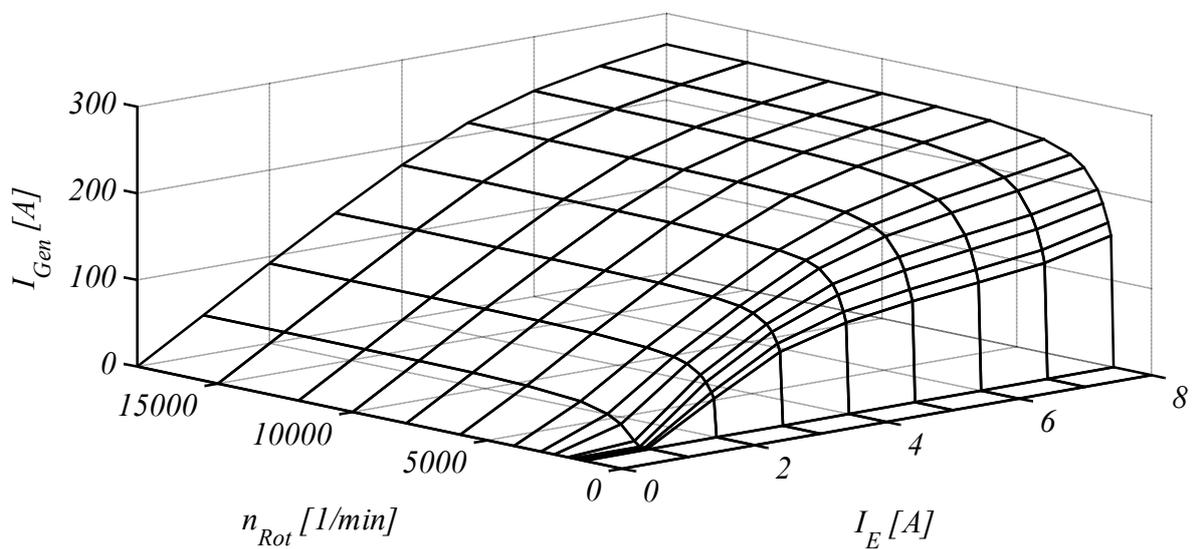


Abbildung 6.14 Abhängigkeit des maximalen Generatorstroms nach Gleichrichtung der Rotordrehzahl und des Erregerstroms am Beispiel eines Bosch Generators der LI-X Baureihe bei einer konstanten Generatorspannung von 11 V.

In der Grafik ist zu erkennen, dass der Generator erst ab einer gewissen Drehzahl einen Strom abgeben kann. Dies kann durch die an den Generatorklemmen bereits anliegende Spannung erklärt werden. Erst wenn die induzierte Spannung im Stator den Wert der außen anliegenden Spannung übersteigt, kann ein Stromfluss stattfinden. Die Drehzahlschwelle, ab der dies in Kraftfahrzeugen der Fall ist, liegt üblicherweise bei in etwa 1000 1/min. Da das Kennfeld in Abbildung 6.7 durch Messungen aufgenommen wurde, sind hierin noch weitere Effekte enthalten, die hierbei nicht umgangen werden konnten. Der ohmsche Anteil der Statorwicklung, im Ersatzschaltbild mit  $R_l$  bezeichnet, ist dem im vorigen Abschnitt ermittelten Temperatureinflüssen ausgesetzt. Bei einem Wicklungswiderstand von in etwa 10 m $\Omega$  bei 20 °C kann dieser durch die Temperaturabhängigkeit im betrachteten Temperaturbereich zwischen 8,2 m $\Omega$  und 19 m $\Omega$  liegen. Diesem Effekt wirkt die temperaturabhängige Widerstandsänderung der Gleichrichterioden entgegen. Die hier eingesetzten Dioden sind Halbleiter und haben somit bei hohen Temperaturen einen geringeren Widerstand [Her02]. Durch die Aufnahme von Kennlinien, welche die Abhängigkeit des Generatorstromes nach Gleichrichtung vom Erregerstrom bei konstanter Rotordrehzahl und verschiedenen Temperaturen zeigen, kann der Einfluss der Temperatur auf den Stator ermittelt werden. Der Temperatureinfluss auf die Erregerwicklung ist hier nicht relevant, da bei dieser Messung der Erregerstrom indirekt als Stellgröße vorgegeben wurde. Aus Abbildung 6.15 kann man sehen, dass sich die verschiedenen thermischen Effekte im Stator zusammen mit der Gleichrichterschaltung nahezu aufheben. Daher kann der Temperatureinfluss auf die Statorwicklung vernachlässigt werden.

Ein weiterer Effekt, der in den Gleichungen der Synchronmaschine nicht berücksichtigt wird, ist die Stromverdrängung im Leiter. Die Stromverdrängung ist von der Amplitude und der Frequenz des Stromes sowie von der Temperatur der Statorwicklung abhängig [Sch06]. In der Erregerwicklung kann dieser Effekt auf Grund der relativ kleinen Amplitude vernachlässigt werden. Durch die messtechnische Ermittlung des Kennfeldes in Abbildung 6.15 ist der Effekt der Stromverdrängung hierin enthalten und kann einzeln messtechnisch auch nicht ohne weiteres ermittelt werden. Die Eisenverluste, die ebenfalls im Kennfeld in Abbildung 6.15 enthalten sind, werden, wie auch die Stromverdrängung, in den Gleichungen der Synchronmaschine nicht berücksichtigt und sind isoliert messtechnisch nicht bestimmbar.

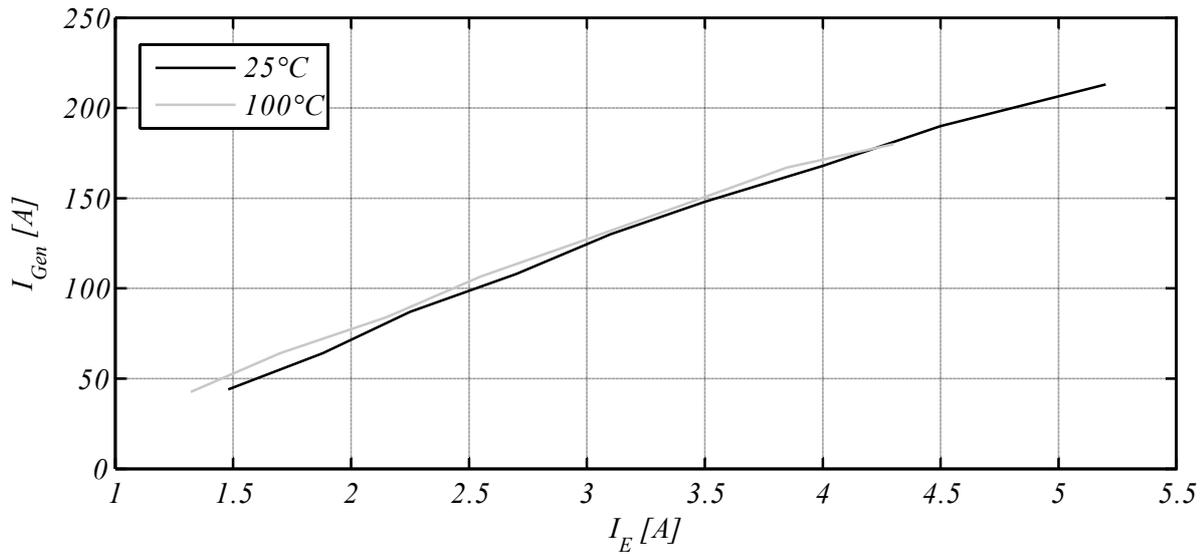


Abbildung 6.15 Darstellung des Generatorstroms nach Gleichrichtung in Abhängigkeit vom Erregerstrom bei 25 °C und 100 °C. Die Werte wurden aus Messungen ermittelt, die bei einer Rotordrehzahl von 6000 1/min aufgenommen wurden.

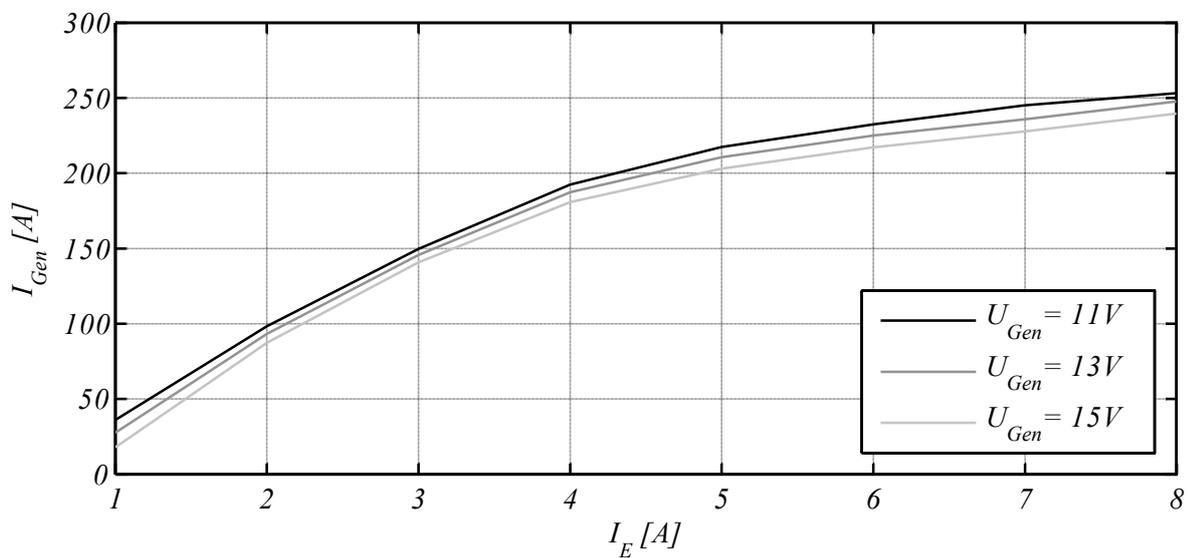


Abbildung 6.16 Abhängigkeit des Generatorstroms vom Erregerstrom für verschiedene Generatorspannungen. Die Messungen wurden bei einer Rotordrehzahl von 3000 1/min mit einem Bosch Generator der Baureihe LI-X aufgenommen.

Zuletzt wird noch die Abhängigkeit des Generatorstroms von der Generatorspannung untersucht. In Abbildung 6.16 ist die Abhängigkeit des Generatorstroms vom Erregerstrom für verschiedene Generatorspannungen bei konstanter Rotordrehzahl dargestellt.

Die Änderungen des Generatorstroms auf Grund der Spannungsänderung ist bei Betrachtung von Abbildung 6.16 nicht bzw. nur in einem sehr geringen Maß vom Erregerstrom abhängig. Die Abweichung des Stroms bei dieser Messung liegt in einem Bereich kleiner 5 A und kann im Mittel mit 3 A angenommen werden. Der Einfluss des Erregerstroms kann auf Grund dieser Erkenntnisse hierbei vernachlässigt werden.

Abbildung 6.17 zeigt die Abhängigkeit des Generatorstroms von der Rotordrehzahl bei verschiedenen Generatorspannungen. Es ist eine nichtlinearere Abhängigkeit erkennbar.

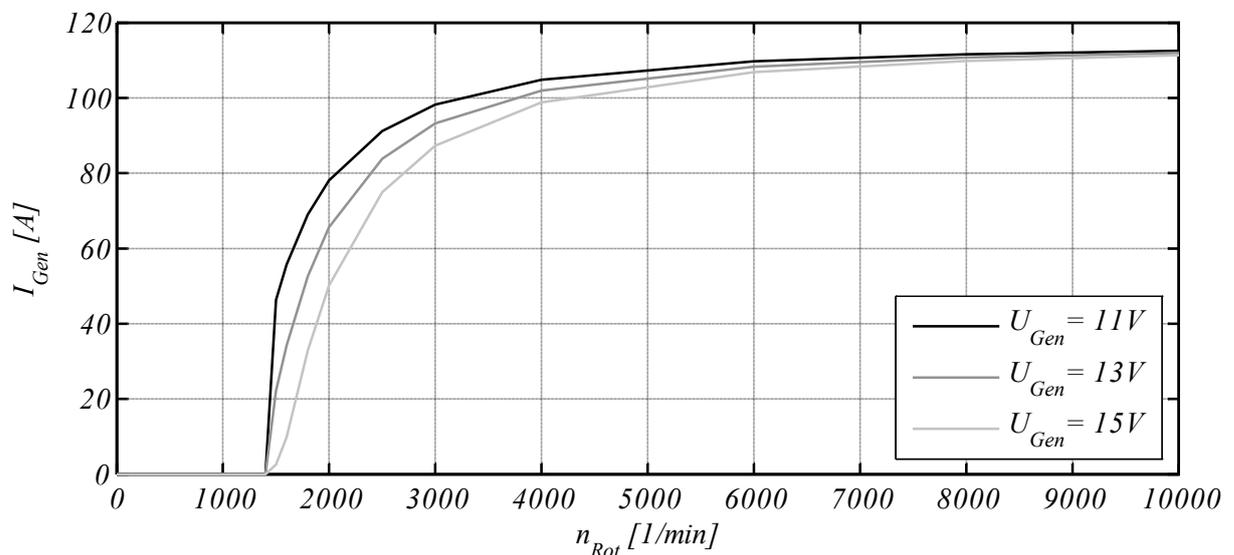


Abbildung 6.17 Abhängigkeit des Generatorstroms von der Rotordrehzahl für verschiedene Generatorspannungen. Die Messungen wurden bei einem konstanten Erregerstrom von  $I_E = 2 \text{ A}$  mit einem Bosch Generator der Baureihe LI-X aufgenommen.

Um den Zusammenhang zu verdeutlichen, sind in Abbildung 6.18 die Änderungen des Generatorstroms pro 1 V Spannungserhöhung aufgetragen. Hierfür wurden Messungen herangezogen, die zwischen 11 V und 15 V in 1 V Schritten aufgenommen wurden. Die Approximation des Verlaufs der Kennlinien aus Abbildung 6.18 kann über eine Funktion der Form

$$\frac{dI_{Gen}(n_{Rot})}{1 \text{ V}} = - \left( \frac{p_{U1}}{n_{Rot} - n_{Rot,0}} + p_{U0} \right) \quad (6.35)$$

nachgebildet werden. Dabei ist  $n_{Rot,0}$  die Angedrehzahl des Generators, ab der er einen Strom abgeben kann.

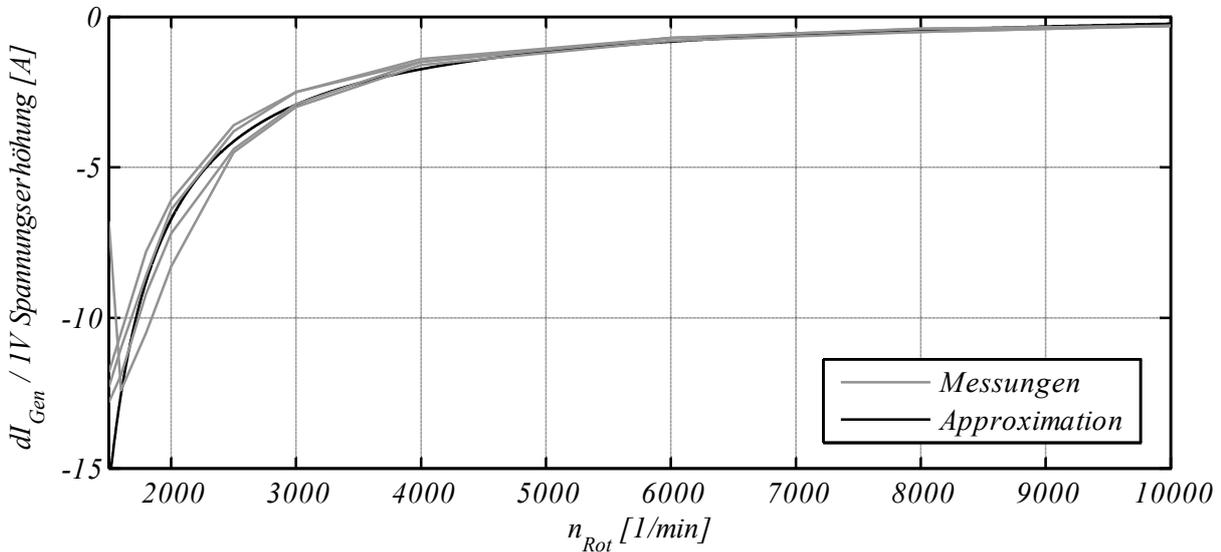


Abbildung 6.18 Darstellung der Abweichungen des Generatorstroms pro 1 V Spannungserhöhung am Generator, bei gleichbleibender Erregung. Bei den Messungen wurde ein Spannungsbereich von 11 V bis 15 V betrachtet.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die statische Leistungsfähigkeit des Klauenpolgenerators durch die Gleichungen (6.29), (6.30) und (6.31) nur annähernd beschrieben werden kann. Der spezifische Aufbau der Maschine und die Umgebungsbedingungen erfordern die Berücksichtigung verschiedener Effekte und Abhängigkeiten, die nicht oder nur mit hohem Aufwand mathematisch beschrieben werden können. Die Eingangsgrößen, die zur Bestimmung des Verhaltens der Statorwicklung erforderlich sind, sind in Abbildung 6.19, dem Blockschaltbild der Statorwicklung, dargestellt.

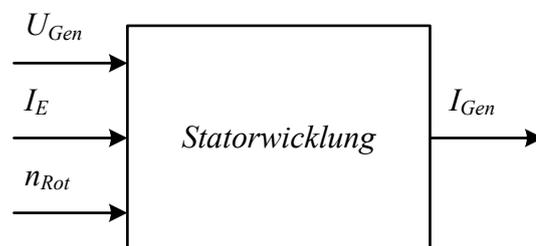


Abbildung 6.19 Blockschaltbild der Statorwicklung mit den Eingangsgrößen der Generatorspannung  $U_{Gen}$ , dem Erregerstrom  $I_E$  und der Rotordrehzahl  $n_{Rot}$  sowie dem Generatorstrom  $I_{Gen}$  als Ausgangsgröße.

### 6.1.4 Dynamische Leistungsfähigkeit

Bei der Betrachtung der dynamischen Leistungsfähigkeit der Maschine werden die Vorgänge untersucht, die stattfinden, bevor sich ein stationärer Zustand einstellt. Hierzu zählen beispielsweise harte Lastsprünge oder Lastabwürfe, sowie auch Situationen, bei denen sich noch kein thermischer Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Die Begrenzungen der Maschinendynamik durch Softwarefunktionen werden im nächsten Abschnitt erläutert.

Anhand der Gleichungen (6.26), (6.27) und (6.28) ist zu sehen, dass im theoretischen Modell der Maschine auch zeitabhängige Vorgänge berücksichtigt werden.

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = \frac{d}{dt} (M_{dE} \cdot I_{\mu d} + L_{\sigma d} \cdot I_d) \quad (6.36)$$

$$\frac{d\Psi_q}{dt} = \frac{d}{dt} ((L_{\sigma q} + L_{hq}) \cdot I_q) \quad (6.37)$$

$$\frac{d\Psi_E}{dt} = \frac{d}{dt} (M_{dE} \cdot I_{\mu d} + L_{\sigma E} \cdot I_E) \quad (6.38)$$

Die hierfür benötigten Parameter können jedoch nicht ohne weiteres bestimmt werden. Messtechnisch würde dies einen immensen Aufwand bedeuten, der den Nutzen der Ergebnisse hier nicht rechtfertigen würden. Über theoretische Betrachtungen ist es ebenfalls mit extrem hohem Aufwand verbunden, alle Effekte zu berücksichtigen und die Parameter hierfür zu bestimmen. Es müsste ein Modell entwickelt werden, das den geometrischen Aufbau der Maschine exakt nachbildet, um z.B. den Feldaufbau ausreichend genau beschreiben zu können. Auf Grund dieser Tatsachen wird hier wieder der experimentelle Ansatz zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens gewählt.

Bei der Betrachtung der dynamischen Vorgänge in der Erregerwicklung können die beiden Summanden aus Gleichung (6.38) einzeln analysiert werden. Der erste Teil der Gleichung ist dabei abhängig von der Gegeninduktivität  $M_{dE}$  und dem Magnetisierungsstrom  $I_{\mu d}$ . Die Gegeninduktivität ist von der Frequenz des Stromes und somit von der Rotordrehzahl abhängig. Bei dem in Abbildung 6.20 dargestellten Einfluss der Rotordrehzahl bzw. der Gegeninduktivität auf die Charakteristik der Sprungantwort des Erregerstroms sind keine merklichen Abweichungen zwischen den einzelnen Messungen erkennbar, und er kann daher vernachlässigt werden.

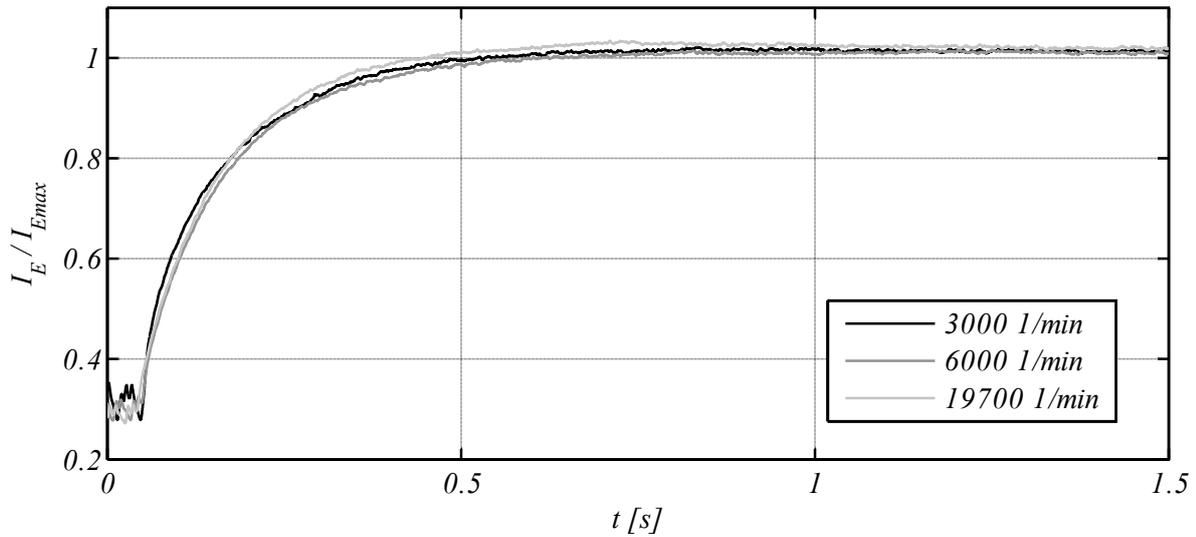


Abbildung 6.20 Darstellung des Einflusses der Rotordrehzahl auf die Charakteristik des normierten Erregerstroms.

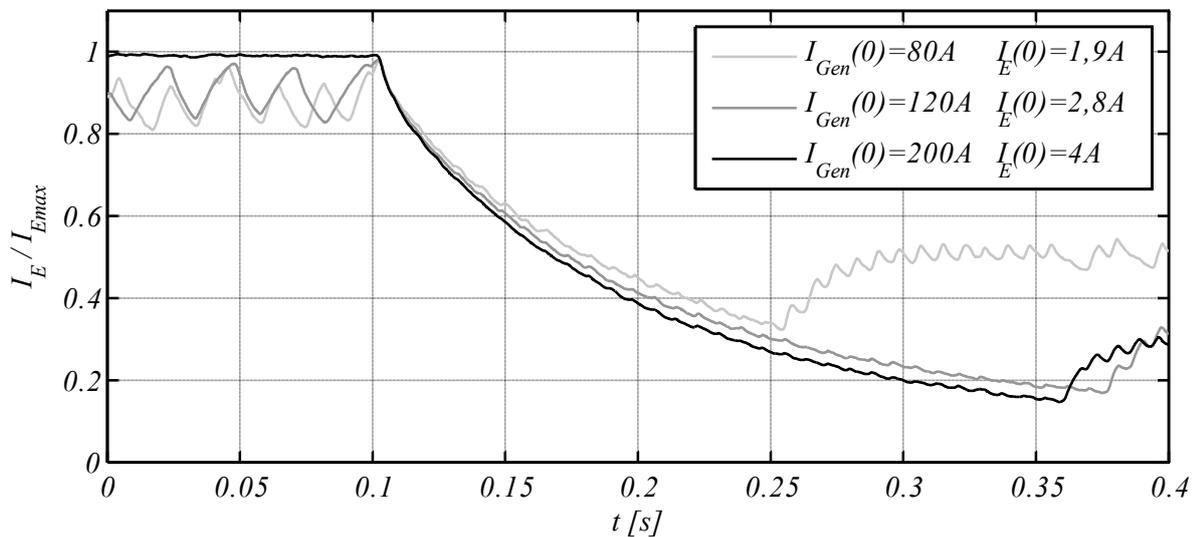


Abbildung 6.21 Darstellung des Einflusses der Amplitude des Erreger- und Generatorausgangsstroms auf die Charakteristik des normierten Erregerstroms bei einem Lastabwurf. Das Wiedereinschalten des Erregerstroms vor dem Erreichen eines statischen Zustandes kommt durch die aufgeschaltete Grundlast von 40 A bei allen drei Messungen.

Der ebenfalls in den ersten Summanden aus Gleichung (6.38) eingehende Magnetisierungsstrom ist von den Absolutwerten des Erreger- und des Generatorausgangsstroms abhängig. Der Einfluss dieser Parameter auf die Charakteristik der Sprungantwort des normierten Erregerstroms ist in Abbildung 6.21 am Beispiel eines Abschaltvorgangs dargestellt. Wie zu sehen ist, haben auch die Amplituden des Erreger- und des Generatorausgangsstroms nur einen marginal kleinen Einfluss auf das dynamische Verhalten des Erregerstroms.

Auf Grund der geringen Einflüsse der bisher betrachteten Elemente muss die Streuinduktivität  $L_{\sigma E}$  zusammen mit dem Erregerstrom  $I_E$  aus dem zweiten Summanden aus Gleichung (6.38) den Haupteinfluss auf die Dynamik des Erregerstroms haben. Zur Berechnung des Verlaufs können die Gleichungen für ein  $RL$ -Glied herangezogen werden. Für eine positive Stromänderung lautet die Gleichung zur Beschreibung des Erregerstroms

$$I_E(t) = \frac{U_{Gen}}{R_E} \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_E}\right) \quad (6.39)$$

sowie  $I_E(t) = I_E(0) \cdot e^{-t/\tau_E}$  (6.40)

für eine negative Stromänderung. Dabei ist die Zeitkonstante

$$\tau_E = \frac{L_{\sigma E}}{R_E}. \quad (6.41)$$

Als letzter Einfluss auf die dynamische Leistungsfähigkeit der Erregerwicklung wird noch der Temperatureinfluss untersucht. Für zwei unterschiedliche Wicklungstemperaturen ergeben sich in Abbildung 6.22 dargestellten Verläufe des Erregerstroms. Der Temperatureinfluss ist hierbei über die Temperaturabhängigkeit der Kupferverluste nach Gleichung (6.33) erklärbar. Die Gleichungen (6.39) und (6.41) können zu

$$I_E(t, T) = \frac{U_{Gen}}{R_E(T)} \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_E}\right) \quad (6.42)$$

und  $\tau_E(T) = \frac{L_{\sigma E}}{R_E(T)}$  (6.43)

erweitert werden.

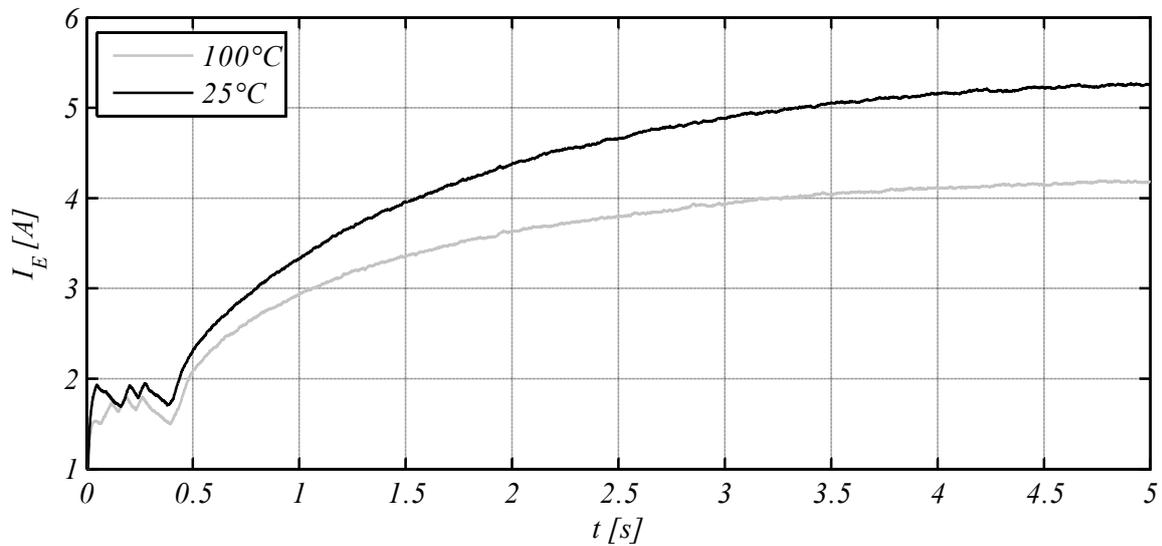


Abbildung 6.22 Messungen der Sprungantworten des Erregerstroms bei verschiedenen Wicklungstemperaturen mit gleicher Anregung.

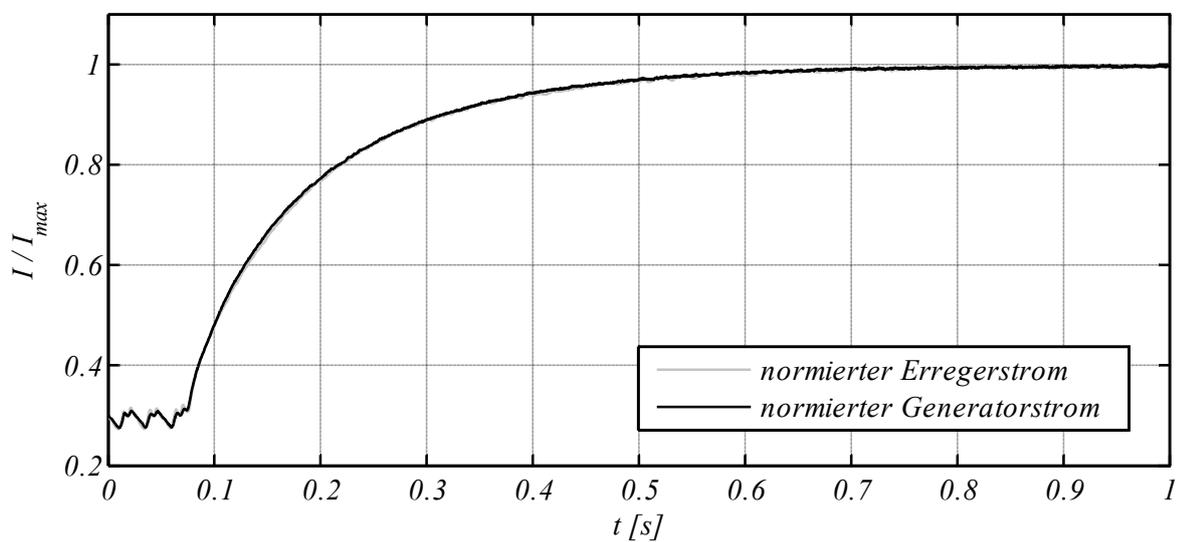


Abbildung 6.23 Darstellung des zeitlichen Verlaufs des normierten Generatorstroms bei einer Anregung mit dem ebenfalls dargestellten normierten Erregerstrom.

Zur Bestimmung des Temperatureinflusses auf die Dynamik der Statorwicklung wird ein Vergleich zwischen Messung und Simulation durchgeführt. In der Simulation wird die zuvor ermittelte Temperaturabhängigkeit der Erregerwicklung mit berücksichtigt, um alleine den Temperatureinfluss auf die Statorwicklung darzustellen. Die Spannung am Generator aus der Messung wird als Eingangsgröße in der Simulation verwendet, um auch diesen Einfluss auf den Ausgangsstrom zu eliminieren. Da in Abbildung 6.23 kein Unterschied im Verlauf des Generatorstroms im Vergleich zum Erregerstrom zu sehen ist, muss die Zeitkonstante des Statorstroms kleiner als die des Erregerstroms sein. Für die folgenden Betrachtungen ist es daher ausreichend, das dynamische Verhalten der Erregerwicklung zu berücksichtigen.

### 6.1.5 Reglerfunktionen

Die Erhöhung der abzugebenden Generatorleistung erfolgt über die Erhöhung der Erregerspannung, die über eine Pulsweitenmodulation vom Generatorregler ausgegeben wird. Die Ein- und Ausgangsgrößen sind im Blockschaltbild des Generatorreglers in Abbildung 6.24 dargestellt.



Abbildung 6.24 Blockschaltbild des Generatorreglers mit den Eingangsgrößen der aktuellen Generatorspannung  $U_{ist}$  und der vorgegebenen Sollspannung  $U_{soll}$  sowie der Erregerspannung  $U_E$  als Ausgangsgröße.

Der Generatorregler ist als Zweipunktregler mit mehreren überlagerten Zusatzfunktionen realisiert. Die Regeldifferenz  $x_d$  des Zweipunktreglers wird aus der Differenz von Soll- zu Ist-Spannung ermittelt:

$$x_d = U_{soll} - U_{ist} \quad (6.44)$$

Die Reglerausgangsgröße ist die getaktete Erregerspannung. Neben der eigentlichen Reglerfunktion werden noch weitere Funktionen im Generatorregler ausgeführt, die einen Einfluss auf die Stellgröße haben. Hierzu gehören beispielsweise die Load-Response Funktion, die Unterspannungsfunktion und die Erregerstrombegrenzung.

Über den Parameter Load-Response kann der Generatorregler die Dynamik des Generators begrenzen. Sie wird in Sekunden angegeben und ist als die Zeit definiert, in der das Tastverhältnis des Erregerstroms von 0 % auf 100 % erhöht wird. Ein großer

Generator weist daher bei gleicher Load-Response Zeit eine höhere Dynamik auf als ein kleiner Generator (siehe Abbildung 6.25). Zusätzlich ist der Load-Response Funktion eine Unterspannungsfunktion übergeordnet, um bei tiefen Spannungseinbrüchen die maximale Dynamik des Generators aktivieren zu können [Dai05].

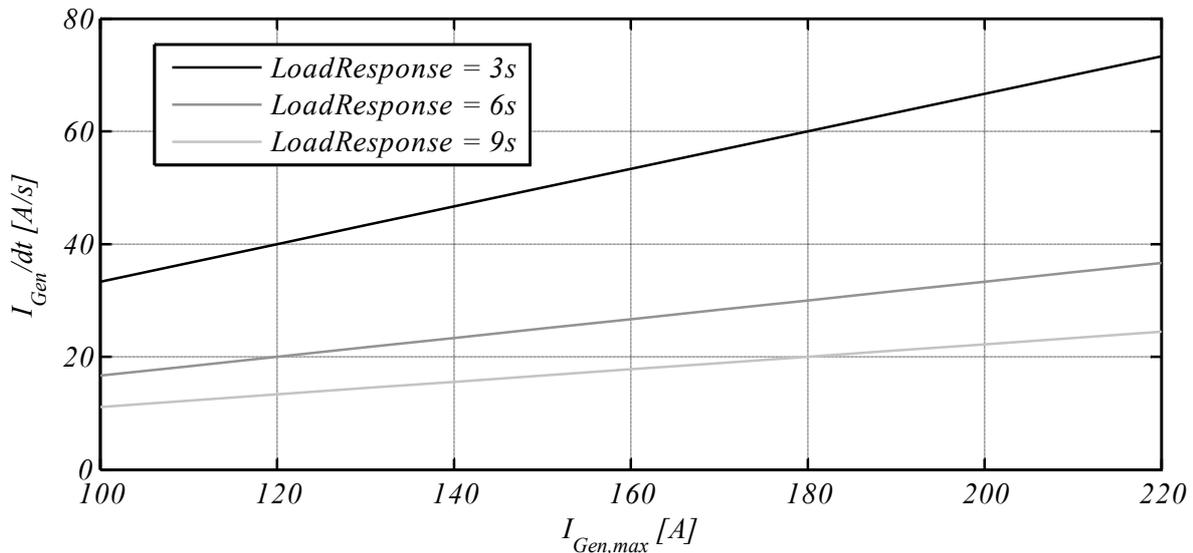


Abbildung 6.25 Dynamik des Generatorstroms bei verschiedenen Load-Response Zeiten, aufgetragen über den Maximalstrom von Generatoren.

Die statische Leistungsfähigkeit kann über die Begrenzung des Erregerstroms erfolgen, um das mechanische Moment auf den Verbrennungsmotor zu begrenzen. Auch hier ist wieder eine Unterspannungsfunktion überlagert, die beim Unterschreiten eines festgelegten Schwellenwertes die Begrenzung aufhebt [Dai05].

Die beiden zuvor beschriebenen Funktionen Load-Response und Erregerstrombegrenzung werden im Fahrzeug in Abhängigkeit von der Drehzahl des Verbrennungsmotors parametrisiert. Z.B. werden die Funktionen bei niedrigen Drehzahlen des Verbrennungsmotors, bei denen er nur ein niedriges Drehmoment hat und sensitiv auf dynamische Belastungen reagiert, so eingestellt, dass nur geringe dynamische Belastungen durch den Generator zugelassen werden.

Über eine Kommunikationsschnittstelle werden Informationen über den aktuellen Generatorzustand übermittelt, die vom Bordnetzmanagement verwendet werden. Zu den Informationen zählen beispielsweise Signale, die die aktuelle Auslastung und Leistungsabgabe des Generators enthalten [Dai05].

Neben den Softwarefunktionen, die im Generatorregler umgesetzt sind, wird die Dynamik des Generatorreglers noch durch den Hardwareaufbau begrenzt. Die

Reglertotzeit ist abhängig von der Filterung der Eingangssignale, der Geschwindigkeit des Prozessors und der Taktfrequenz, mit der das Ausgangssignal erzeugt wird. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Generatoren liegt die Reglertotzeit bei in etwa 5ms.

### 6.1.6 Modellbildung

Für die Klauenpolmaschine wird ein aus den Teilmodellen des Stators, der Erregerwicklung, des Temperaturmodells und des Generatorreglers bestehendes Modell verwendet. Diese Modellstruktur ist in Abbildung 6.26 dargestellt.

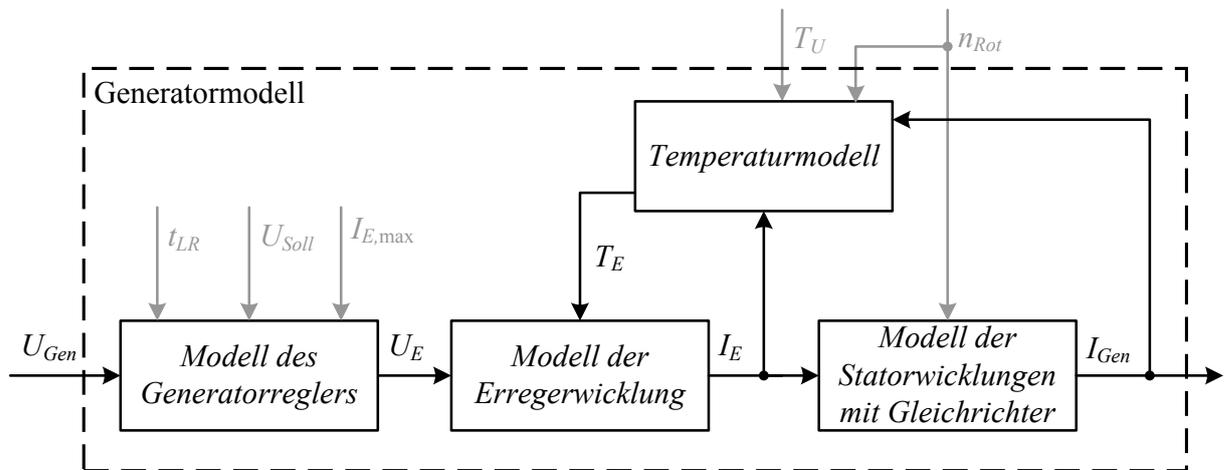


Abbildung 6.26 Struktur des Generatormodells mit den Einflussgrößen auf die einzelnen Teilmodelle.

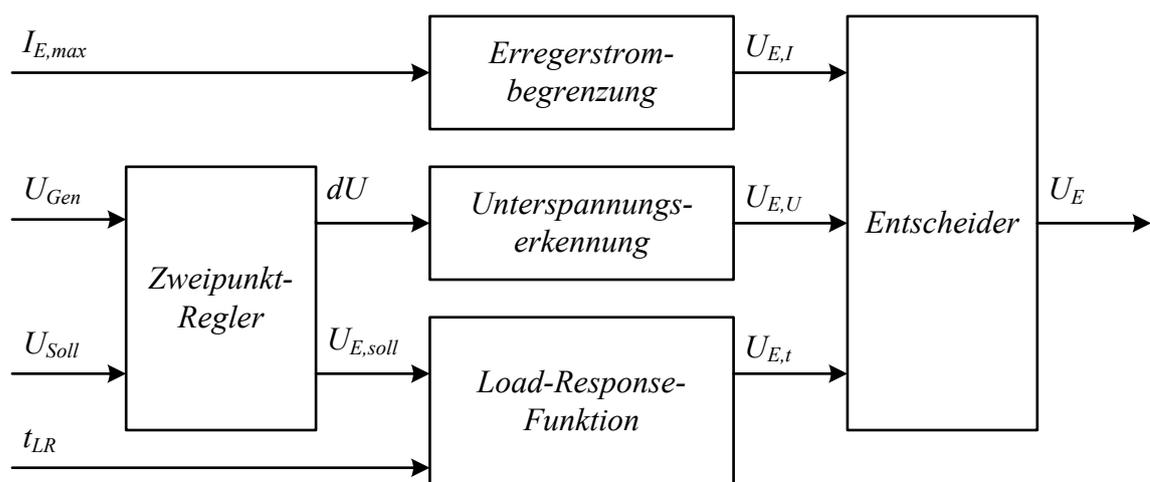


Abbildung 6.27 Struktur des Reglermodells bestehend aus einem Zweipunktregler, den einzelnen Zusatzfunktionen und einem Entscheider.

Das Modell des Generatorreglers besteht wiederum aus den Teilmodellen der einzelnen Funktionen, die in Abschnitt 6.1.5 beschrieben wurden. Die Verknüpfung der Reglerfunktionen im Modell ist in Abbildung 6.27 dargestellt.

Im Temperaturmodell in Abbildung 6.28 wird die benötigte Temperatur der Erregerwicklung berechnet. Nach der Berechnung der Temperatur  $T_0$  wird noch der Einfluss des Erregerstroms berücksichtigt.

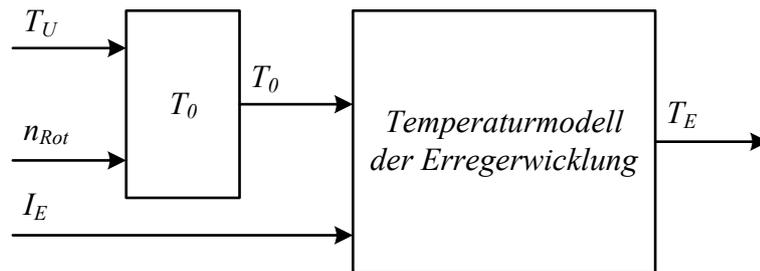


Abbildung 6.28 Struktur des gesamten Temperaturmodells des Klauenpolgenerators mit dem Blockschaltbild des Temperaturmodells der Erregerwicklung aus Abbildung 6.9.

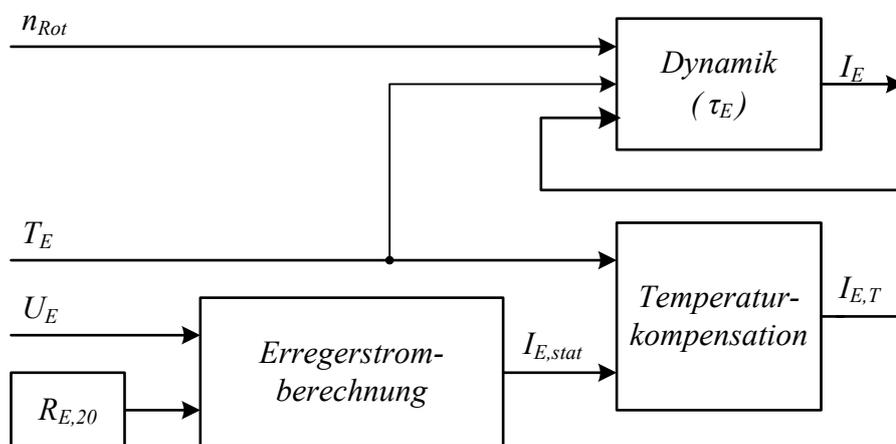


Abbildung 6.29 Struktur des Modells der Erregerwicklung mit dem Erregerwiderstand  $R_{E,20}$ , der statischen Erregerstromberechnung, der Temperaturkompensation und der nachträglichen Berücksichtigung der Dynamik.

Zur Berechnung des Erregerstroms wird in diesem Teilmodell zunächst der statische Wert hierfür berechnet. Dazu wird neben der Generatorspannung als Eingangsgröße der Wert des Erregerwiderstandes benötigt. Nachfolgend wird dieser Wert des Erregerstroms durch die Temperaturkompensation angepasst und anschließend im

Teilmodell der Dynamikberechnung in den gültigen Erregerstrom umgeformt. Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 6.29 dargestellt.

Das Statormodell wird über ein messtechnisch ermitteltes Kennfeld, das den Generatorstrom in Abhängigkeit vom Erregerstrom und der Generatorzahl angibt, nachgebildet. Durch diese Vorgehensweise müssen die von der Maschinengeometrie abhängigen Größen und Parameter nicht explizit bestimmt werden. Der hieraus resultierende Strom wird über eine Spannungskompensation angepasst (Abbildung 6.30).

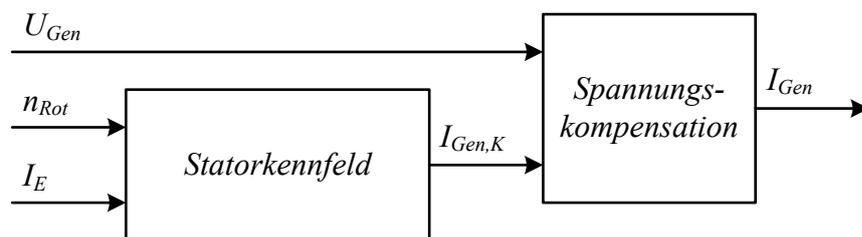


Abbildung 6.30 Struktur des Kennfeld-basierten Modells der Statorwicklung mit Spannungskompensation.

Eine Validierung des Modells erfolgte durch den Vergleich mehrerer Messungen mit dem simulierten Generatorverhalten. Wie in den beispielhaften Stromverläufen in Abbildung 6.31 zu sehen ist, zeigt das Modell eine relativ gute Übereinstimmung mit dem realen Generatorverhalten.

## 6.2 Kfz-Batterien

Die Voraussetzungen für die Entwicklung von Blei-Säure Batterien schaffte der italienische Naturforscher LUIGI GALVANI durch Experimente mit Froschschenkeln, bei denen er die Kontraktion der Muskeln unter dem Einfluss statischer Elektrizität beobachtete. ALESSANDRO VOLTA bewies Ende des 18. Jahrhunderts, dass diese Effekte auch von rein anorganischen Materialien hervorgerufen werden können. Er entwickelte die erste elektrochemische Zelle, die auch als galvanisches Element bezeichnet wird [Ber86]. Durch die Weiterentwicklung dieser Batterie zu einem Akkumulator durch JOHANN WILHELM RITTER und durch WILHELM JOSEF SINSTEDEN zum Bleiakkumulator entstanden die in ähnlicher Form auch heute noch in Kraftfahrzeugen eingesetzten Akkumulatoren. Es wurden im Laufe der Zeit noch Optimierungen durchgeführt, um die Akkumulatoren auf ihren Anwendungsbereich hin anzupassen.

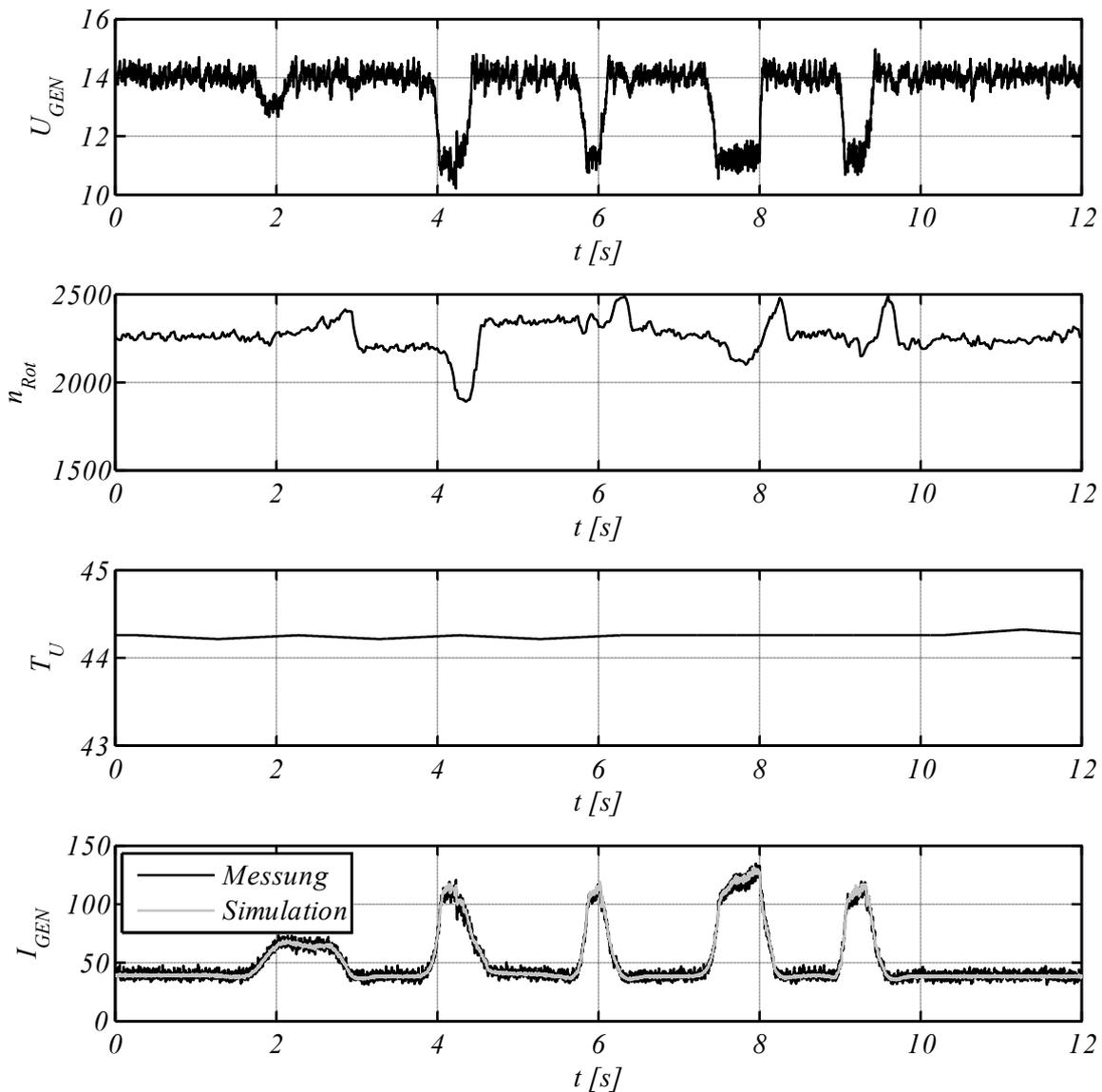


Abbildung 6.31 Vergleich eines gemessenen Generatorstroms mit dem aus der Simulation hervorgehenden Generatorstrom. Als Eingangsgrößen des Modells wurden die dargestellten Messwerte herangezogen. Die Messung wurde bei batterielosem Betrieb durchgeführt.

Akkumulatoren werden auch als Sekundär-Batterien bezeichnet, wobei sie im Kfz-Bereich umgangssprachlich und in der Literatur auch einfach als Batterien bezeichnet werden. In dieser Arbeit wird daher ebenfalls die Bezeichnung Batterie verwendet.

### 6.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Kfz-Batterien bestehen aus einer Verschaltung mehrerer elektrochemischer Zellen. Bei jeder dieser Zellen bestehen der Elektrolyt aus verdünnter Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ), die negative Elektrode aus Blei ( $Pb$ ) und die positive Elektrode aus Bleioxid ( $PbO_2$ ). Da die verwendeten Zellen lediglich eine Gleichgewichtszellspannung von 1,928 V haben, werden für die im Bordnetz benötigte Spannung sechs Zellen in Reihe geschaltet. Der Aufbau moderner Kfz-Batterien ist etwas komplexer geworden, das Prinzip ist jedoch gleich geblieben. Abbildung 6.32 zeigt den Aufbau einer aktuellen Kfz-Batterie mit AGM<sup>4</sup>-Technologie, bei der der Elektrolyt in Vliesmatten gebunden ist.

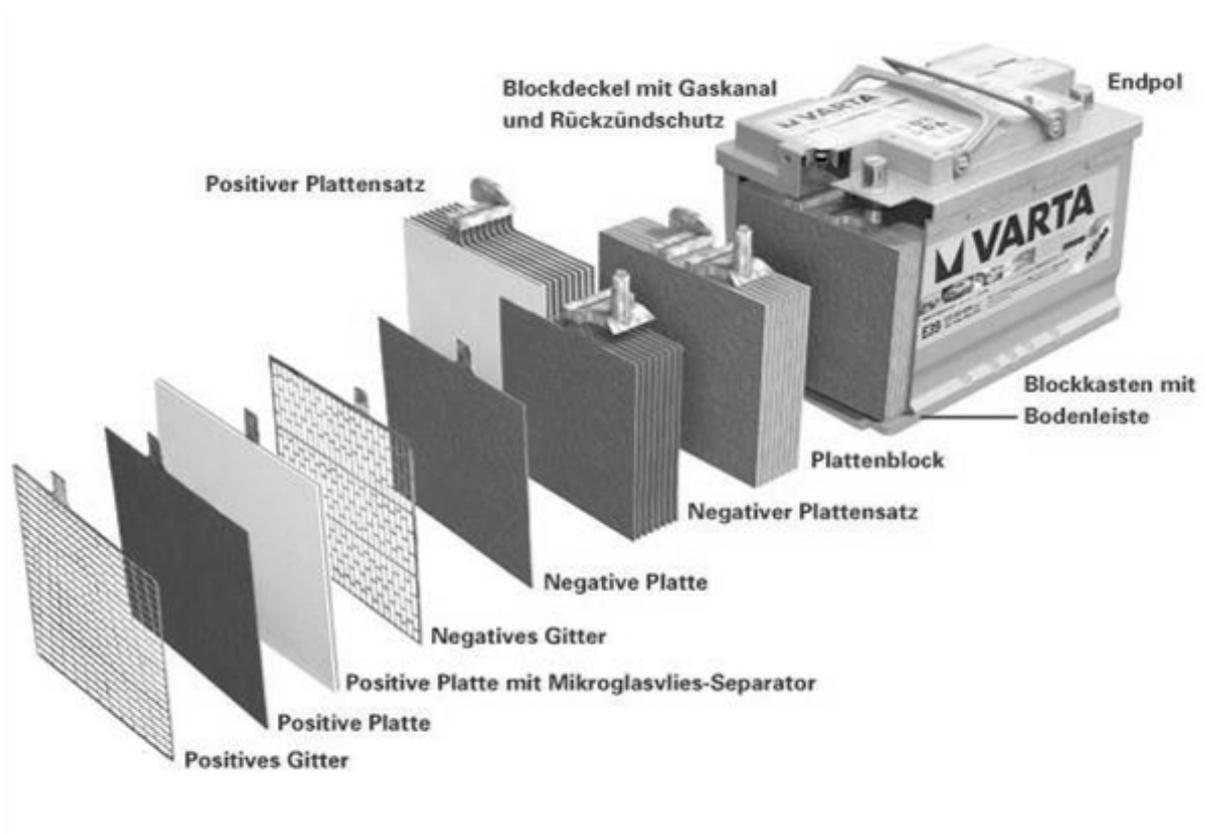


Abbildung 6.32 Aufbau eines Kfz-Bleiakkumulators mit AGM-Technologie (Quelle: [www.varta-automotive.de](http://www.varta-automotive.de)).

Die Funktionsweise von Kfz-Batterien kann durch die Hauptreaktionsgleichung (6.45) beschrieben werden. Sie beschreibt die Zustandsübergänge beim Laden und Entladen der Zellen [Ber86].



<sup>4</sup> Absorbed Glass Mat (AGM)

Neben der Hauptreaktion können noch verschiedenen Nebenreaktionen in der Batterie ablaufen. Durch verschiedene Belastungen und Zustände wie z.B. niedriger Ladezustand, Hochstrombelastungen oder starke Zyklisierung kann es in der Batterie zu Säureschichtung, Sulfatierung, Korrosion, Abschlämzung und Kurzschlüssen kommen. Für eine detaillierte Betrachtung dieser Alterungserscheinungen sei hier auf [Ber86] verwiesen.

### **6.2.2 Thermische Betrachtungen**

Die thermischen Betrachtungen der Batterie beschränken sich in dieser Arbeit auf die Bestimmung des Bereichs, in dem sich die Batterietemperatur befinden kann und den Grenzen des Betriebsbereichs der Batterie.

Der Temperaturbereich, dem die Batterie ausgesetzt ist, ist abhängig von ihrem Einbauort. Ist die Batterie im Aggregaterraum verbaut, hat neben der Umgebungstemperatur auch die durch den Verbrennungsmotor erzeugte Wärme einen großen Einfluss. Bei einem Einbauort im Heck des Fahrzeugs, z.B. in der Ersatzradmulde, muss unter anderem der Einfluss der Abgasanlage und die Wärmestauung am Einbauort berücksichtigt werden. Die Umgebungstemperaturen an den verschiedenen Einbauorten können zwischen  $-40\text{ °C}$  und  $+85\text{ °C}$  betragen.

Neben den Temperaturbereichen, denen die Batterie ausgesetzt sein kann, sind noch die prinzipbedingten Temperaturgrenzen der Batterie von Bedeutung. Die untere Temperaturgrenze ergibt sich durch Einfriereffekte, die bei tiefen Temperaturen in Abhängigkeit von der Säurekonzentration des Elektrolyts, die wiederum abhängig vom Ladezustand der Batterie ist, auftreten können. Mit steigender Säurekonzentration sinkt der Gefrierpunkt des Elektrolyts [Ber86].

Die obere prinzipbedingte Temperaturgrenze der Batterie ergibt sich durch den Siedepunkt der Schwefelsäure, der ebenfalls von der Säurekonzentration abhängig ist. Jedoch ist die Temperatur der Schwefelsäure nicht alleine von der Umgebungstemperatur abhängig, sondern auch die bei der Ladung der Batterie entstehenden Wärmeverluste haben einen Einfluss hierauf [Ber86].

In den Betrachtungen in dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Batterie innerhalb ihrer normalen Betriebsgrenzen eingesetzt und betrieben wird, so dass es zu keinen Effekten in der Batterie kommt, die ihre Eigenschaften wesentlich verändern.

### **6.2.3 Statische Leistungsfähigkeit**

Die statische Leistungsfähigkeit von Bleibatterien ist ein sehr komplexes Thema, mit dem sich schon viele wissenschaftliche Arbeiten befasst haben. Insbesondere

Alterungsprozesse, deren Verläufe nur schwer identifizierbar sind, haben einen großen Einfluss auf die statische Leistungsfähigkeit von Batterien. Algorithmen zur Bestimmung der statischen Leistungsfähigkeit und dem Alterungsverhalten werden in Arbeiten wie z.B. [Geu93], [Sch82] und [Sch88] ausführlich erläutert und sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Für die hier durchzuführenden Untersuchungen sind nur bestimmte statische Zustände von Bedeutung und nicht deren Entstehung. Für die im Zusammenhang mit dieser Arbeit durchgeführten Simulationen werden daher mit Experten im Bereich der Batteriemodellierung abgestimmte Parameter- und Kennfeldsätze verwendet und bei der Modellierung berücksichtigt.

Zum besseren Verständnis der Arbeit werden an dieser Stelle noch die den statischen Zustand beschreibenden Größen erläutert. Einige dieser Größen werden in der DIN40720 „Akkumulatoren“ definiert. In Tabelle 6.5 sind die für diese Arbeit wichtigen Größen mit Formelzeichen und Einheit aufgelistet.

*Tabelle 6.5 Übersicht einiger wichtiger Größen zur Beschreibung des statischen Zustandes von Batterien.*

<b>Größe</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
Kapazität	$K$	Ah	Unter den jeweiligen Bedingungen entnehmbare Ladungsmenge.
Ladezustand	$SOC$	%	Verhältnis der aktuell gespeicherten Ladungsmenge zu einer zugeordneten Kapazität der Batterie. In der Literatur wird meist die englische Bezeichnung „State of Charge“ (SOC) verwendet.
Leerlaufspannung	$U_0$	V	Spannung der unbelasteten Zelle oder Batterie.

#### **6.2.4 Dynamische Leistungsfähigkeit**

Das dynamische Verhalten von Bleiakkumulatoren ist abhängig von deren statischen Zustand. D.h. die dynamische Leistungsfähigkeit muss für jeden statischen Zustand der Batterie gesondert untersucht werden. Wie auch bei der statischen Leistungsfähigkeit wurden solche Untersuchungen bereits in zahlreichen Arbeiten wie z.B. [Hop10], [Rop07] und [Run74] durchgeführt. Bei der dynamischen Leistungsfähigkeit wird daher ebenfalls auf mit Experten im Bereich der Batteriemodellierung abge-

stimmte Parameter- und Kennfeldsätze zurückgegriffen, welche bei der Modellierung berücksichtigt werden.

Zur Veranschaulichung des charakteristischen dynamischen Verhaltens von Batterien ist in Abbildung 6.33 der Spannungsverlauf nach der Zuschaltung einer Strombelastung für verschiedene Belastungsströme an einer beispielhaften Batterie mit definiertem Zustand dargestellt. Speziell das in diesen Messungen dargestellte Entladeverhalten von Batterien im transienten Bereich ist in dieser Arbeit von großem Interesse. In dem betrachteten Zeitbereich ist das Verhalten direkt nach der Zuschaltung des Belastungsstroms von großer Bedeutung. Es ist aus Abbildung 6.33 zu ersehen, dass dieser erste Spannungseinbruch stark von der Stromstärke abhängt, mit der die Batterie belastet wird.

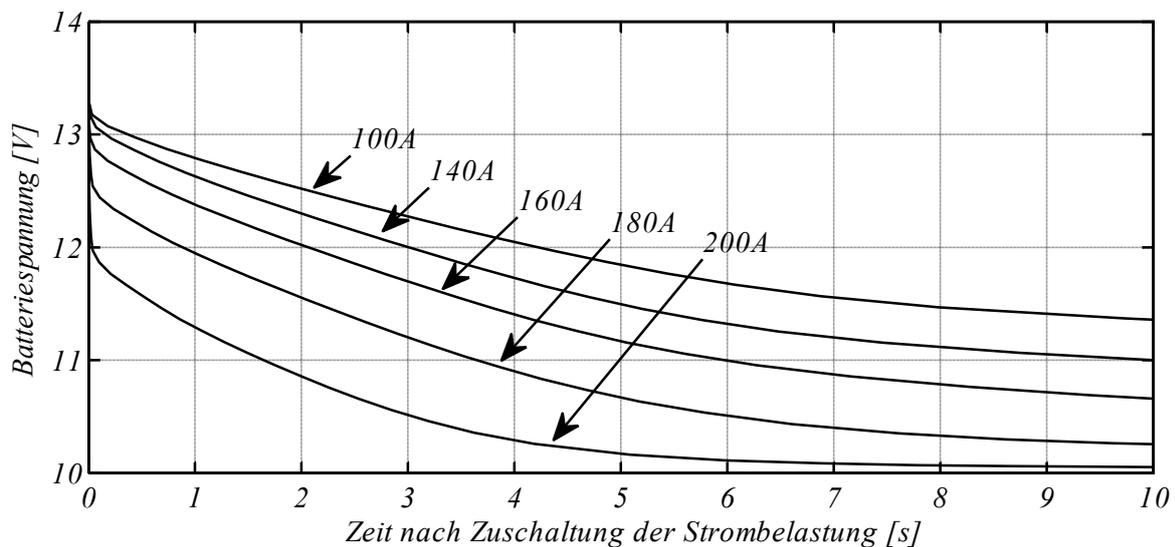


Abbildung 6.33 Kennlinien des Spannungsverlaufs einer Bleibatterie mit AGM Technologie, am Beispiel einer 74 Ah Batterie ohne Alterungserscheinungen mit 75 % SOC bei einer Temperatur von  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , über die Dauer der Belastung mit verschiedenen Strömen aus einer vorhergehenden Ladung heraus.

### 6.2.5 Modellbildung

Zur Modellierung von Bleiakkumulatoren gibt es in der Literatur sehr viele verschiedene Ansätze. Für diese Anwendung wird auf einen Modellansatz zur Simulation transienter Vorgänge aus [Hop10] verwiesen (Abbildung 6.34). In diesem Modellansatz werden speziell die für diese Anwendung benötigten Eigenschaften berücksichtigt. Die als variabel gekennzeichneten Elemente in diesem Ersatzschaltbild sind abhängig von verschiedenen Einflussgrößen. Der dynamische Innenwiderstand

$R_{di}$  sowie die beiden Elemente  $R_C$  und  $C$  des kapazitiven Gliedes sind abhängig von der Temperatur, der Stromrichtung und -amplitude sowie dem Alterungs- und Ladezustand.

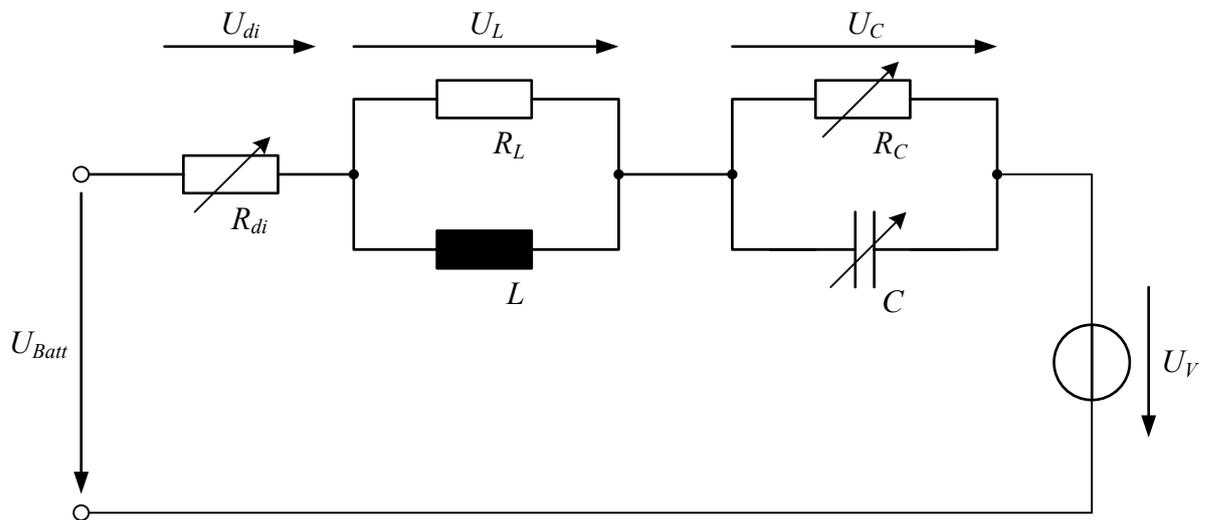


Abbildung 6.34 Modellansatz zur Simulation transienter Vorgänge nach [Hop10].

Da in dieser Arbeit speziell das Entladeverhalten von Batterien im transienten Bereich von Interesse ist, wird hier nur die Abhängigkeit vom Strom als variabel betrachtet. Die Abhängigkeiten von der Temperatur und dem Lade- und Alterungszustand werden ebenfalls berücksichtigt, jedoch werden diese im betrachteten Zeitraum als konstant angenommen. Für das Batteriemodell ergibt sich hieraus das in Abbildung 6.35 dargestellte Modell, mit einem stromabhängigen Parameter- und Kennfeldsatz, der das als adaptives Zustandsraummodell realisierte Modell des Bleiakкумуляtors beeinflusst.

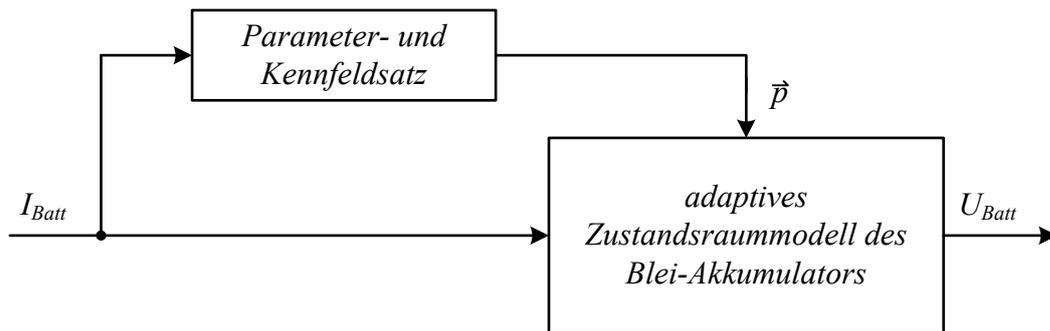


Abbildung 6.35 Struktur des Batteriemodells mit dem Batteriestrom  $I_{Batt}$  als Eingangsgrößen und der Batteriespannung  $U_{Batt}$  als Ausgangsgröße.

Das Modell ist ein System mit dem Batteriestrom  $I_{Batt}$  als Eingangsgrößen und der Batteriespannung  $U_{Batt}$  als Ausgangsgröße. In Abbildung 6.36 ist das Blockschaltbild für dieses System dargestellt.

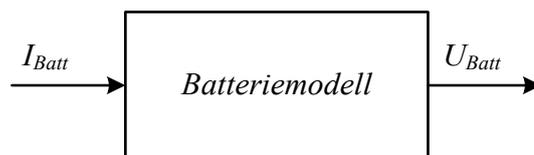


Abbildung 6.36 Blockschaltbild des Batteriemodells mit dem Batteriestrom  $I_{Batt}$  als Eingangsgrößen und der Batteriespannung  $U_{Batt}$  als Ausgangsgröße.

### 6.3 Komponenten zur Energieverteilung

Zu den Elementen der Energieverteilung zählen neben den Leitungen auch alle Sicherungen, Kontakte und Schaltelemente.

In Kraftfahrzeugen werden die Energieleitungen aus Kosten- und Gewichtsgründen als Eindrahtleitungen ausgeführt. Die Rückleitung des elektrischen Stroms erfolgt über die Karosserie, wobei eine kurze Leitung zum nächstgelegenen Anschlusspunkt an die Karosserie benötigt wird. Als Material für die Leitungen wird hochreines Kupfer mit einer elektrischen Leitfähigkeit von  $\chi_{Cu} = 58 \frac{\text{m}}{\Omega \times \text{mm}^2}$  oder auch Aluminium mit einer

Leitfähigkeit von  $\chi_{Al} = 36 \frac{\text{m}}{\Omega \times \text{mm}^2}$  verwendet. Wegen des geringeren spezifischen Gewichtes werden trotz der geringeren Leitfähigkeit verstärkt Aluminiumleitungen verwendet [Bec06]. Jede Leitung der Energieverteilung im Fahrzeug ist mit einer Sicherung versehen, außer die Leitung ist eigensicher ausgelegt (siehe Abschnitt 2.3.3). Als Sicherungselemente werden in Fahrzeugen aus Kostengründen einfache Schmelzsicherungen eingesetzt. Schaltelemente bei der Energieverteilung können z.B.

mechanische oder elektronische Relais sein, die in sehr speziellen Situationen im Bordnetz zum Einsatz kommen. Beispielsweise gibt es einen Ruhestromschalter, der nach dem Abstellen des Fahrzeugs die Versorgungsleitungen verschiedener Verbraucher von der Batterie trennt, um eine ungewollte Entladung der Batterie zu verhindern. Kontaktstellen sind überall dort zu finden, wo zwei Elemente miteinander verbunden werden.

### 6.3.1 Eigenschaften und Modellierung von Leitungen

Die elektrischen Eigenschaften der Versorgungsleitungen können über das allgemeine Ersatzschaltbild von elektrischen Leitungen beschrieben werden. Der Leitungswiderstand  $R$  stellt die ohmschen Verluste des Leiters dar. Er verursacht den Spannungsabfall über die Leitung. Der Isolationsleitwert  $G$  liegt bei den eingesetzten Isoliermaterialien in Bereichen, die um einen Faktor  $>1 \cdot 10^6$  kleiner sind als die Leitwerte der elektrischen Verbraucher. Daher kann er bei den weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden. Die Kapazität  $C$  wird durch die geometrische Anordnung der Leiter und der elektrischen Eigenschaften des Isoliermaterials bestimmt. Die Eigeninduktivität  $L$  des Leiters hängt ebenfalls von der geometrischen Anordnung des Leiters ab.

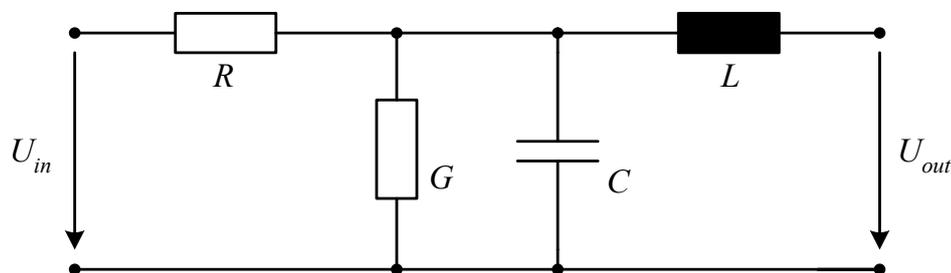


Abbildung 6.37 Allgemeines Ersatzschaltbild einer elektrischen Leitung.

In [Kul08] wurden diese elektrischen Parameter bereits für verschiedene Leitungen im Fahrzeug gemessen. In Tabelle 6.6 sind die Abmessungen und die gemessenen Parameter einiger untersuchter Leitungen aufgelistet.

Tabelle 6.6 Abmessungen und Parameter von untersuchten Leitungen.

Bezeichner	Querschnitt $A$	Länge $l$	$R_M$	$C_M$	$L_M$
L1	6 mm <sup>2</sup>	4555 mm	14,4 mΩ	646 pF	3,6 μH
L2	10 mm <sup>2</sup>	510 mm	0,81 mΩ	40 pF	0,3 μH
L3	10 mm <sup>2</sup>	4625 mm	8,9 mΩ	651 pF	4,1 μH
L4	16 mm <sup>2</sup>	970 mm	1,15 mΩ	43 pF	0,3 μH

Die Kapazitäten  $C_M$  der untersuchten Leitungen befinden sich in Größenordnungen, die in etwa um den Faktor 100 kleiner sind als die Eingangskapazitäten der Steuergeräte. Für das Gesamtsystem Bordnetz haben sie daher einen vernachlässigbar kleinen Einfluss. Durch die Vernachlässigung des Isolationsleitwertes und der Leitungskapazität kann im Weiteren mit dem reduzierten Ersatzschaltbild nach Abbildung 6.38 gearbeitet werden. Die Berechnung des ohmschen Widerstandes  $R$  der Leitung erfolgt nach Gleichung

$$R = \frac{l}{\chi \cdot A}. \quad (6.46)$$

Hierbei wird die Leitungslänge  $l$ , der Leitungsquerschnitt  $A$  sowie die materialabhängige elektrische Leitfähigkeit  $\chi$  berücksichtigt.

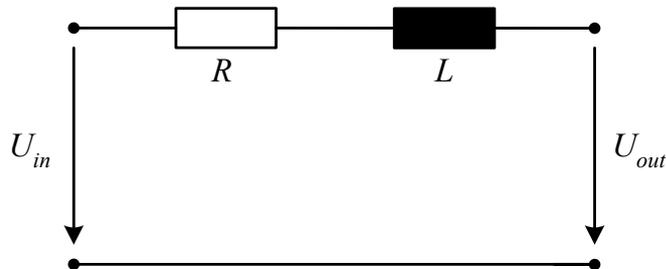


Abbildung 6.38 Reduziertes Ersatzschaltbild einer elektrischen Leitung, mit den für die Bordnetzsimulation relevanten Größen.

Die Berechnung der Induktivität einer im Fahrzeug verlegten Leitung kann nur näherungsweise geschehen. Als vereinfachte Annahme wird die Rückleitung über die Karosserie als ebene, leitende Fläche angenommen. Hierfür kann die Berechnungsvorschrift für einen kreisförmigen Leiter über einer ebenen Fläche nach [Del06] herangezogen werden.

$$L = l \cdot \frac{60 \Omega}{c_0} \cdot \ln \left( \frac{2h}{d} + \sqrt{\left( \frac{2h}{d} \right)^2 - 1} \right) \quad (6.47)$$

Der Abstand zwischen Leiter und Karosserie wird mit  $h$ , der Leitungsdurchmesser mit  $d$  und die Länge der Leitung mit  $l$  berücksichtigt. Da der Abstand  $h$  im Fahrzeug nicht eindeutig bestimmt werden kann, wird eine näherungsweise Annahme für diesen Wert gemacht. Leitungen in Fahrzeugen werden in geringem Abstand zur Karosserie verlegt. Für diesen Abstand hat sich ein Wert von  $h = 2 \text{ cm}$  als passend herausgestellt.

Zur Überprüfung, ob die gemachten Annahmen den realen Eigenschaften näherungsweise entsprechen, werden im Folgenden die Messungen der Leitungen aus Tabelle 6.6 mit den berechneten Werten verglichen. Die Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Leitungsparameter erfolgt in Tabelle 6.7. Die gemessenen Parameter sind dabei mit dem Index  $M$  versehen und die berechneten Parameter haben den Index  $R$ . Die Gegenüberstellung zeigt, dass mit der Berechnung nach Gleichung (6.46) eine ausreichend genaue Näherung erzielt werden kann. Die Abweichungen ergeben sich durch die Messtoleranzen und die Toleranzen der Abmessungen der Leitungen. Bei den Leitungsinduktivitäten sind die Abweichungen teilweise etwas größer. Diese Abweichungen sind durch die zusätzliche Ungenauigkeit des Abstandes  $h$  zwischen Leiter und Karosserie zu erklären. Jedoch sind die berechneten Werte in einer ähnlichen Größenordnung wie die gemessenen Werte, was für die Untersuchungen in dieser Arbeit als ausreichend genau erachtet wird.

*Tabelle 6.7 Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Werte der Leitungsparameter.*

<b>Bezeichner</b>	<b><math>R_M</math></b>	<b><math>R_R</math></b>	<b><math>L_M</math></b>	<b><math>L_R</math></b>
L1	14,4 mΩ	13,1 mΩ	3,6 μH	3,07 μH
L2	0,81 mΩ	0,87 mΩ	0,3 μH	0,31 μH
L3	8,9 mΩ	8,0 mΩ	4,1 μH	2,84 μH
L4	1,15 mΩ	1,04 mΩ	0,3 μH	0,57 μH

Die Modellierung der Leitungen erfolgt durch die Gleichung

$$U_{out} = U_{in} - R \cdot I_{in} - L \cdot \frac{dI_{in}}{dt}. \quad (6.48)$$

Daraus ergibt sich ein System mit den Eingangsgrößen  $I_{in}$  und  $U_{in}$  und der Ausgangsgröße  $U_{out}$ , das in Abbildung 6.39 dargestellt ist.

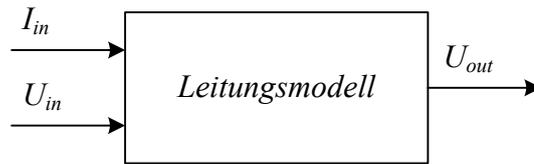


Abbildung 6.39 Blockschaltbild des Leitungsmodells mit den Eingangsgrößen  $I_{in}$  und  $U_{in}$  und der Ausgangsgröße  $U_{out}$ .

### 6.3.2 Eigenschaften und Modellierung von Sicherungen, Kontaktstellen und Schaltelementen

Die elektrischen Eigenschaften von Sicherungen und Kontaktstellen sind identisch. Sie können als rein ohmsche Widerstände betrachtet werden. Schaltelemente in der Energieverteilung werden bei diesen Untersuchungen im statischen Zustand betrachtet. Daher können die Schaltelemente hier ebenfalls als ohmsche Widerstände betrachtet werden. Die Spannungsabfälle werden bei den Sicherungen und Schaltelementen durch den typenspezifischen Durchgangswiderstand und bei den Kontakten durch die Übergangswiderstände verursacht. Die Modellierung der drei Elemente erfolgt durch die Gleichung

$$U_{out} = U_{in} - R \cdot I_{in} . \quad (6.49)$$

Daraus ergibt sich ein System mit den Eingangsgrößen  $I_{in}$  und  $U_{in}$  und der Ausgangsgröße  $U_{out}$ , das in Abbildung 6.40 dargestellt ist.

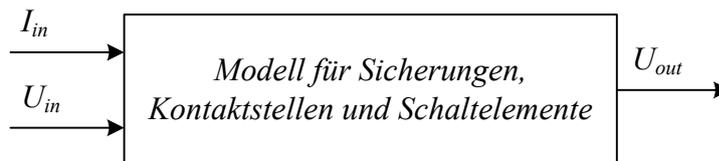


Abbildung 6.40 Blockschaltbild des Modells für Sicherungen, Kontaktstellen und Schaltelemente im statischen Zustand mit den Eingangsgrößen  $I_{in}$  und  $U_{in}$  und der Ausgangsgröße  $U_{out}$ .

## 6.4 Elektrische Verbraucher

In Kraftfahrzeugen gibt es sehr viele elektrische Verbraucher, die zum Teil auch sehr unterschiedliche elektrische Eigenschaften haben. Für Untersuchungen des gesamten Bordnetzes ist es notwendig, diese Verbraucher unterteilt in verschiedenen Klassen und Leistungskategorien zu betrachten. Die Unterteilung in verschiedene Klassen basiert auf den unterschiedlichen elektrischen Verhalten der Verbraucher. Die Katego-

risierung erfolgt auf Grund der Leistungen, die von den Verbrauchern aufgenommen werden können.

#### **6.4.1 Klassifizierung von Verbrauchern**

Elektrische Verbraucher in Kraftfahrzeugen kann man in mehrerer Hinsicht in unterschiedliche Klassen einteilen. Auf Grund ihrer Funktion im System werden die Verbraucher hier in Sensoren, Steuergeräte und Aktoren unterteilt. Sensoren haben die Aufgabe, physikalische Eigenschaften zu erfassen und in elektrische Signale zu wandeln. Die Steuergeräte dienen als Schnittstelle zwischen den Sensoren und den Aktoren. Die Sensorsignale und weitere Informationen, die über die Kommunikationsleitungen empfangen werden, werden in den Steuergeräten eingelesen und verarbeitet. Über Algorithmen werden hiermit die Ansteuersignale für die Aktoren beeinflusst. Zu den Aktoren zählen alle Systeme, die die elektrische Energie in eine andere Energieform wandeln, um eine Funktion zu erfüllen.

Die Aktoren sind die leistungsstärksten Verbraucher im System und haben einen wesentlichen Einfluss auf das Bordnetz und seine Auslegung. Sie können auf Grund ihres elektrischen Verhaltens in spannungsgesteuerte und leistungsgeregelte Aktoren unterteilt werden. Das Verhalten dieser beiden Aktorklassen unterscheidet sich in der Abhängigkeit ihrer Stromaufnahme von der anliegenden Spannung.

#### **6.4.2 Eigenschaften von Sensoren**

Sensoren haben nur einen sehr geringen, vernachlässigbaren Energiebedarf. Ihre Funktion ist jedoch nicht vernachlässigbar. Die Signale von Sensoren werden von den Steuergeräten benötigt, damit diese wiederum ihre Funktion erfüllen können. Eine stabile Versorgungsspannung der Sensoren muss daher sichergestellt werden. Auf Grund der Komplexität des Gesamtsystems wird die Sicherstellung einer ausreichenden Energieversorgung der Sensoren jedoch den Steuergeräten überlassen und muss somit bei der Architekturauslegung des Bordnetzes nicht explizit berücksichtigt werden. Sensoren werden daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

#### **6.4.3 Eigenschaften und Modellierung von Steuergeräten**

Wie bereits erwähnt dienen Steuergeräte der Ansteuerung von Aktoren unter Berücksichtigung der eingelesenen Sensorsignale und der Informationen über die Kommunikationsleitungen. Aus Sicht der Aktoren können Steuergeräte als Schaltelemente betrachtet werden. Aus Bordnetz-sicht müssen jedoch zusätzlich noch die Verluste und

die Eingangsbeschaltung des Steuergeräts berücksichtigt werden. Die für dieses System benötigten Ein- und Ausgangsgrößen sind in Abbildung 6.41 dargestellt.



Abbildung 6.41 Blockschaltbild des Systems „Steuergerät“ mit dem Stromvektor  $I_{in}$  und der Spannung  $U_{in}$  als Eingangsgrößen und dem Strom  $I_{out}$  und der Spannung  $U_{out}$  als Ausgangsgrößen.

Das Modell des Steuergeräts kann in mehrere funktionelle Blöcke aufgeteilt werden. Der Eigenverbrauch wird als ohmscher Verbraucher modelliert. Der resultierende Ausgangsstrom  $I_{out}$  ist dann die Summe aus dem Stromverbrauch des Steuergeräts und dem bekannten Eingangsstrom  $I_{in}$ . Der Eingangsstrom  $I_{in}$  ist als Vektor dargestellt, da hier die Summe der Ströme der angeschlossenen Aktoren verwendet wird. Als ein weiteres Teilmodell wird die kapazitive Eingangsbeschaltung des Steuergeräts nachgebildet. Sie dient zur Stützung der internen Versorgungsspannung bei Spannungsschwankungen und kann dadurch einen zusätzlichen Stromanteil erzeugen. Auch dieser Anteil wird dem Eingangsstrom hinzuaddiert. Die Ausgangsspannung wird, unter Berücksichtigung des im Steuergerät vorhandenen Spannungsabfalls, aus der Eingangsspannung und dem Eingangsstrom berechnet. In Abbildung 6.42 werden diese Zusammenhänge verdeutlicht.

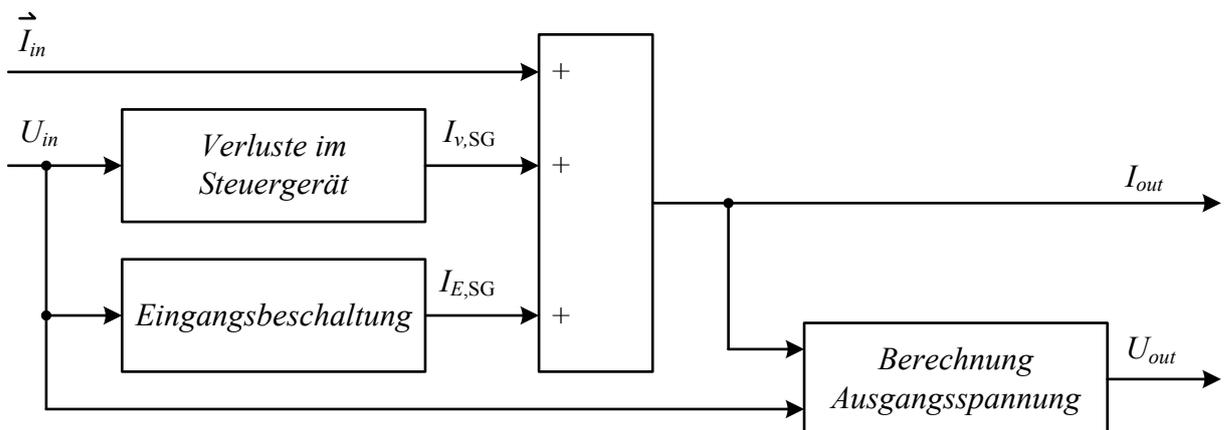


Abbildung 6.42 Struktur des Modells eines Steuergerätes.

#### 6.4.4 Eigenschaften und Modellierung spannungsgesteuerter Aktoren

Spannungsgesteuerte Aktoren verändern ihre Leistungs- bzw. Stromaufnahme in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung. Jeder ohmsche Verbraucher zählt zu den spannungsgesteuerten Aktoren. Über die Gleichung

$$I_A = \frac{U_{in} \cdot I_N}{U_N}, \quad (6.50)$$

mit  $U_{in}$  als Eingangsspannung,  $I_N$  als Nennstrom und  $U_N$  als Nennspannung, kann der Aktorstrom  $I_A$  berechnet werden. Die Leistung dieser Aktoren muss so ausgelegt werden, dass sie bei der niedrigsten dauerhaft anliegenden Spannung im Bordnetz ihre Funktion vollständig bzw. mit der geforderten Performance erfüllen. Für eine Sitzheizung würde dies z.B. bedeuten, dass die geforderte Heizleistung auch bei niedrigen Spannungen erbracht werden muss. Bei hohen Spannungen kann durch das spannungsgesteuerte Verhalten somit auch Energie verbraucht werden, die für die Funktions- bzw. Performanceanforderung nicht benötigt wird. Neben den bereits erwähnten Heizelementen zählen in Fahrzeugbordnetzen z.B. auch Glühlampen und Verstellmotoren zu den spannungsgesteuerten Aktoren.

Für die Modellierung dieses Verbrauchertyps werden lediglich die Variablen und Parameter aus Gleichung (6.50) benötigt. Das Blockschaltbild des Systems mit den benötigten Ein- und Ausgangsgrößen ist in Abbildung 6.43 dargestellt.



Abbildung 6.43 Blockschaltbild des Systems „spannungsgesteuerter Aktor“ mit der Spannung  $U_{in}$  als Eingangsgröße und dem Aktorstrom  $I_A$  als Ausgangsgröße.

#### 6.4.5 Eigenschaften und Modellierung leistungsgeregelter Aktoren

Durch die technische Weiterentwicklung vieler Komponenten wird zunehmend eine Leistungsregelung bei Aktoren eingesetzt, um eine spannungsunabhängige Performance der Systeme zu gewährleisten. Im Fall einer variablen Bordnetzspannung ist dies aus ökologischer Sicht sinnvoll, da hierdurch immer nur die tatsächlich benötigte Energie aus dem System entnommen wird. Für das Modell eines leistungsgeregelten Aktors ergibt sich für eine konstante Leistungsaufnahme in einem Spannungsbereich von  $U_{max} > U_{in} > U_{min}$  die folgende Berechnungsvorschrift für die Stromaufnahme des Aktors:

$$I_A = \frac{U_N \cdot I_N}{U_{in}}. \quad (6.51)$$

Für Spannungen außerhalb des Arbeitsbereiches der Leistungsregelung ( $U_{max} < U_{in} < U_{min}$ ) weisen diese Verbraucher ein spannungsgesteuertes Verhalten auf. Als Beispiele für leistungsgeregelte Verbraucher können die Xenon-Scheinwerfer, die Rückförderpumpe des Bremssystems und das Soundsysteme genannt werden.

Für das Modell des leistungsgeregelten Aktors werden die gleichen Ein- und Ausgangsgrößen wie bei einem spannungsgesteuerten Aktor benötigt (siehe Abbildung 6.44).



Abbildung 6.44 Blockschaltbild des Systems „leistungsgeregelter Aktor“ mit der Spannung  $U_{in}$  als Eingangsgröße und dem Aktorstrom  $I_A$  als Ausgangsgröße.

Die Struktur des Modells unterscheidet sich jedoch vom spannungsgesteuerten Aktor. Es muss sowohl die Leistungsregelung als auch die Spannungssteuerung modelliert werden. Ein Entscheider muss auf Grund der anliegenden Spannung den entsprechenden Strom des Aktors auswählen. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 6.45 die beschriebene Struktur des Modells dargestellt.

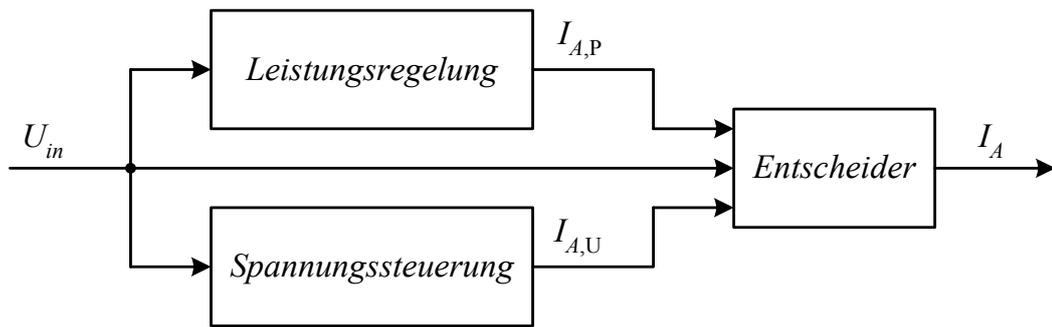


Abbildung 6.45 Struktur des Modells für leistungsgesteuerte Aktoren.

#### 6.4.6 Leistungskategorien von Verbrauchern

Für die Untersuchung dynamischer Belastungsvorgänge im Bordnetz müssen die Verbraucher identifiziert werden, durch die unerwünschte Spannungsschwankungen verursacht werden können. Durch die Kategorisierung der Verbraucher nach ihrer Leistung kann eine Vorauswahl der Verbraucher getroffen werden, die bei den weiteren Untersuchungen gesondert betrachtet werden müssen. Hierfür wird ein Verfahren vorgestellt, das es erlaubt, Verbraucher aller zuvor beschriebener Typen mit einer einheitlichen Vorgehensweise in verschiedene Leistungskategorien einzuteilen. Hierfür werden zunächst drei Leistungskategorien, die in Tabelle 6.8 beschrieben sind, aufgestellt.

Tabelle 6.8 Beschreibung der Leistungskategorien von Verbrauchern.

<b>Kategorie</b>	<b>Beschreibung</b>
0	Verbraucher, die alleine durch ihre Aktivität keine Spannungsschwankungen verursachen können, die im Fahrzeug wahrnehmbar werden.
1	Verbraucher, die alleine durch ihre Aktivität zu wahrnehmbaren Spannungsschwankungen führen können.
2	Verbraucher, die alleine durch ihre Aktivität zu unzulässigen Spannungsschwankungen führen können, d.h. Spannungsschwankungen die System- bzw. Funktionsausfälle im Fahrzeug verursachen können.

Wie bereits in Kapitel 3 angesprochen, werden Spannungseinbrüche durch die Überlastung der Energieversorgungselemente hervorgerufen. Die Tiefe der Spannungseinbrüche hängt dabei größtenteils von den dynamischen Eigenschaften der Batterie ab. Neben der Höhe der Ströme mit denen die Batterie belastet wird, spielt auch die Energiemenge, die hierbei aus der Batterie entnommen wird, eine tragende Rolle. Eine sinnvolle Kategorisierung muss daher die Leistung und die Energie berücksichtigen, mit der die Batterie belastet wird. Für die Festlegung der Grenzen der einzelnen

Leistungskategorien werden die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit den Erkenntnissen aus der Betrachtung der dynamischen Leistungsfähigkeit von Batterien vereint.

Die Grenze zwischen Kategorie 0 und Kategorie 1 wird mit Hilfe der in Abschnitt 3.2.2 festgelegten Grenzwerte für die komfortrelevante Sensitivität ermittelt. Hierfür werden Belastungsmessungen an Batterien durchgeführt, bei denen die Stromamplitude und die Ladungsmenge ermittelt werden, die nötig sind, um komfortrelevante Spannungseinbrüche an den Anschlussklemmen von Batterien zu verursachen. Die Batterien und deren Zustände werden dabei so gewählt, dass es den ungünstigsten Fall darstellt, für den komfortrelevante Spannungseinbrüche als vermeidbar betrachtet werden. Für die Batterieauswahl bedeutet dies, dass die Typen mit dem größten dynamischen Innenwiderstand zu nehmen sind. Ein niedriger Ladezustand und tiefe Temperaturen erhöhen z.B. den dynamischen Innenwiderstand. Für zwei beispielhafte Batterien, bei 75 % SOC und einer Temperatur von  $-25\text{ °C}$ , ergeben sich die in Abbildung 6.46 dargestellten Kennlinien. Auf Grund der Streuung der Messwerte wird die in Abbildung 6.46 eingezeichnete Approximationsgerade für die weiteren Betrachtungen herangezogen.

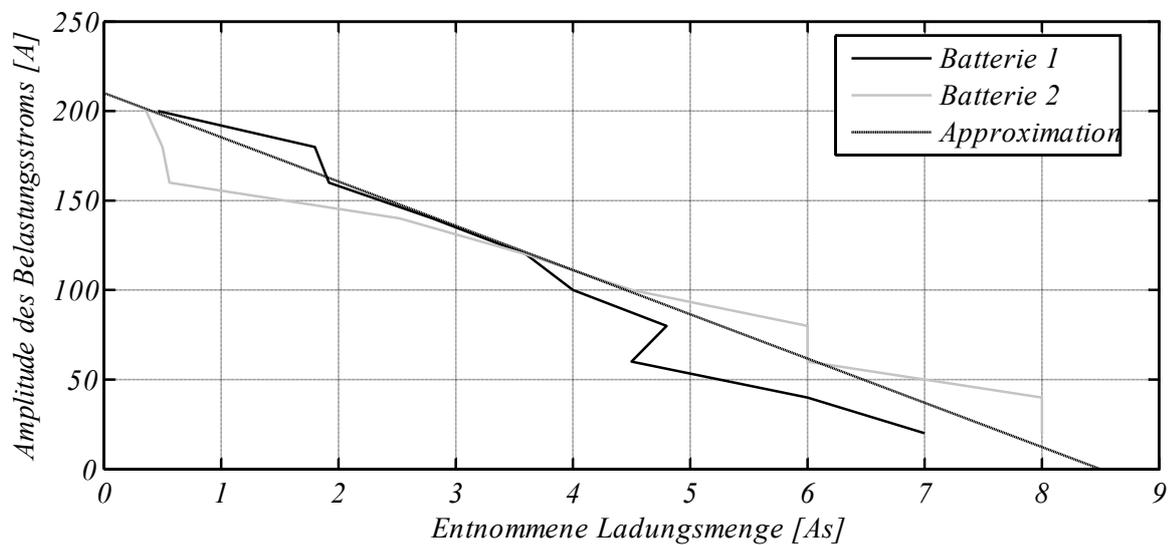


Abbildung 6.46 Messtechnisch ermittelte untere Grenzkennlinien sowie die Approximationskennlinie für die Leistungskategorie 1. Die Kennlinien der Batterien wurden mit einer 74 Ah Batterie (1) und einer 70 Ah Batterie (2) aufgenommen. Die Vorbedingungen waren bei beiden Batterien ein Ladezustand von 75 % SOC bei einer Temperatur von  $-25\text{ °C}$ .

Zur Bestimmung der Grenze zwischen den Leistungskategorien 1 und 2 werden die Grenzwerte für die funktionale Sensitivität herangezogen (siehe Abschnitt 3.3.1). Die hier angegebenen Spannungswerte beziehen sich auf die Spannung direkt an den einzelnen Komponenten. Damit diese Spannungswerte an den Verbrauchern nicht unterschritten werden muss der maximale Spannungsabfall über die Leitungen  $U_{L,max}$  mit berücksichtigt werden. Wie in Abschnitt 3.3.1 erwähnt, werden die Leitungen zwischen den Verbrauchern so dimensioniert, dass es zu keinem Spannungsabfall zwischen dem Verbraucher und dem Energiespeicher größer 1 V kommt. Um alle Unsicherheiten und Toleranzen zu berücksichtigen, wird noch ein Robustheitsabstand von  $U_R = 1$  V eingeführt, wodurch sich ein Wert von 11 V für die minimale Batteriespannung ergibt. Für diesen Spannungswert werden, unter den gleichen Prämissen wie bei der Grenze für die komfortrelevanten Spannungseinbrüche, die Belastungskennlinien von Batterien aufgenommen (Abbildung 6.47).

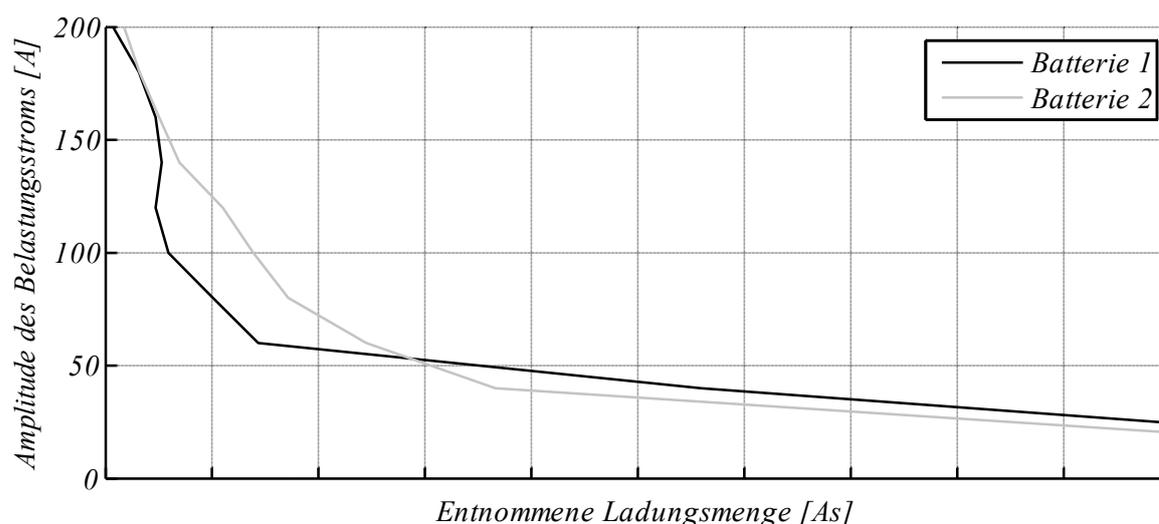


Abbildung 6.47 Messtechnisch ermittelte untere Grenzkennlinien für die Leistungskategorie 2. Die Kennlinien der Batterien wurden mit einer 70 Ah Batterie (1) und einer 74 Ah Batterie (2) aufgenommen. Die Vorbedingungen waren bei beiden Batterien ein Ladezustand von 75 % SOC bei einer Temperatur von  $-25$  °C.

## 6.5 Hochstromverbraucher

Der Begriff Hochstromverbraucher wird als eine größere Leistungszuordnung als bei der Leistungskategorisierung eingeführt. Während der Entwicklung neuer Komponenten kann meist noch keine genaue Abschätzung gemacht werden, welcher Leistungs-

kategorie diese Komponente später zuzuordnen ist. Für die Architekturentwicklung von Bordnetzen ist es jedoch von großer Bedeutung, frühzeitig alle Verbraucher zu kennen, die die Anforderungen an das Bordnetz erhöhen.

### 6.5.1 Definition

Als Hochstromverbraucher werden alle Verbraucher bezeichnet, die den zuvor definierten Leistungskategorien 1 und 2 zuzuordnen sind, d.h. alle Verbraucher, die durch ihre Aktivität mindestens zu wahrnehmbaren Spannungsschwankungen führen können. Zur Feststellung, ob ein Verbraucher zu solchen Spannungsschwankungen führen kann, müssen die beiden charakteristischen Größen Maximalstromstrom und Energiemenge, mit denen die Batterie belastet wird, bestimmt werden. Hierfür wird im Folgenden ein Prüfverfahren erläutert.

### 6.5.2 Prüfvorschrift

Zur Überprüfung, ob eine Komponente als Hochstromverbraucher zu klassifizieren ist, müssen alle Manöver/Schaltvorgänge der Komponente vermessen werden, bei denen die höchsten Leistungen von der Komponente benötigt werden.

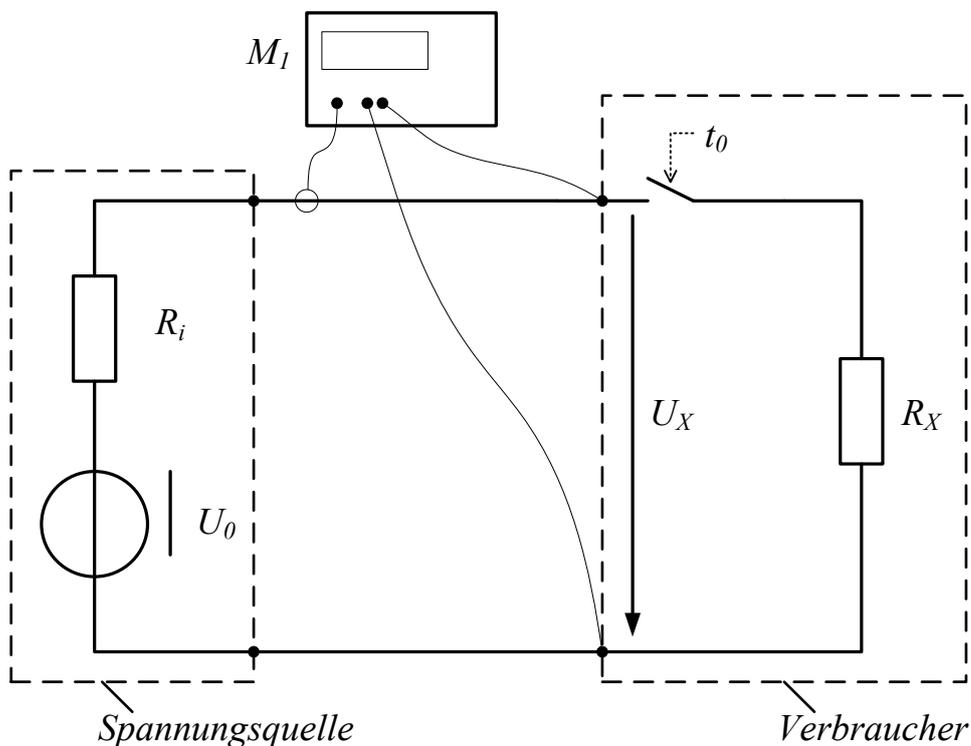


Abbildung 6.48 Messaufbau zur Aufnahme der Stromprofile, die für das Prüfverfahren zur Ermittlung der Leistungskategorien benötigt werden.

Zur Ermittlung der für die Klassifizierung des Verbrauchers benötigten charakteristischen elektrischen Größen ist bei den durchzuführenden Messungen der Messaufbau nach Abbildung 6.48 zu verwenden. Der Messaufbau besteht aus einer Gleichspannungsquelle, dem zu vermessenden Verbraucher sowie einem Messgerät, vorzugsweise ein Oszilloskop, zum Aufzeichnen von Spannung und Strom. Die Spannungsquelle muss so ausgelegt sein, dass die maximal benötigte Leistung des Verbrauchers sowohl statisch als auch dynamisch geliefert werden kann. Die Messung wird bei einer Spannung  $U_x = 11 \text{ V}$  durchgeführt, was der unteren Grenze des zulässigen Arbeitsbereichs der Energieversorgung entspricht. Die eingestellte Spannung darf während der Messung an der Komponente eine maximale Abweichung bezüglich der Versorgungsspannung von  $\pm 0,2 \text{ V}$  aufweisen. Die Darstellung des Verbrauchers in Abbildung 6.48, bestehend aus Schalter und Belastungswiderstand, hat nur symbolischen Charakter. Der innere Aufbau und die Art der Zuschaltung sind komponentenspezifisch und können vom Ersatzschaltbild abweichen. Mit diesem Prüfaufbau ist der zeitliche Verlauf der Ströme bei den ausgewählten Manövern aufzuzeichnen.

Zur Ermittlung der elektrischen Kenngrößen der Verbraucher müssen die aufgenommenen Stromprofile ausgewertet werden. Bei einem Lastsprung muss die Batterie die Energie aufbringen, welche durch die statische und dynamische Leistungsfähigkeit des Generators nicht von diesem abgedeckt werden kann. Für einen beispielhaften Lastsprung ergibt sich die in Abbildung 6.49 dargestellte Verteilung der Stromaufnahmen und Ladungsmengen. In diesem Diagramm ist noch der Verlauf des Generatorstroms zu definieren. Der Zeitpunkt

$$t_1 = t_0 + t_t \quad (6.52)$$

ergibt sich aus dem Zeitpunkt  $t_0$ , bei dem die Strombelastung beginnt, und der Totzeit  $t_t$  des Generatorreglers. Sie wird aus den Untersuchungen in Abschnitt 6.1.5 mit  $t_t = 5 \text{ ms}$  angenommen. Für die Anstiegsgeschwindigkeit des Generatorstroms wird angenommen, dass die Load-Response Funktion deaktiviert ist, was bei tiefen Spannungseinbrüchen durch den Generatorregler veranlasst wird. Gesucht ist unter diesen Bedingungen der minimale Stromgradient des Generators. Die Berechnung erfolgt über die Gleichung

$$\min \left( \frac{dI_{Gen}}{dt} \right) = \frac{\min \left( I_{Gen} \left( n_{rot}, T_{Gen}, I_{E,max} \right) \right)}{t_{LR,min}} \quad (6.53)$$

Dabei ist nach Abschnitt 6.1.4 das Minimum des Generatorstroms bei vorgegebenem maximalem Erregerstrom bei niedrigen Drehzahlen und hohen Temperaturen zu finden. Im Fahrzeug erreicht man diesen Zustand bei Leerlaufdrehzahl und maximaler Betriebstemperatur. Unter diesen Bedingungen ergibt sich für den Gradient des Generatorstroms, beim kleinsten eingesetzten Generatortyp, ein Wert von

$$\frac{dI_{Gen}}{dt} = \frac{70 \text{ A}}{0,35 \text{ s}} = 200 \frac{\text{A}}{\text{s}}. \quad (6.54)$$

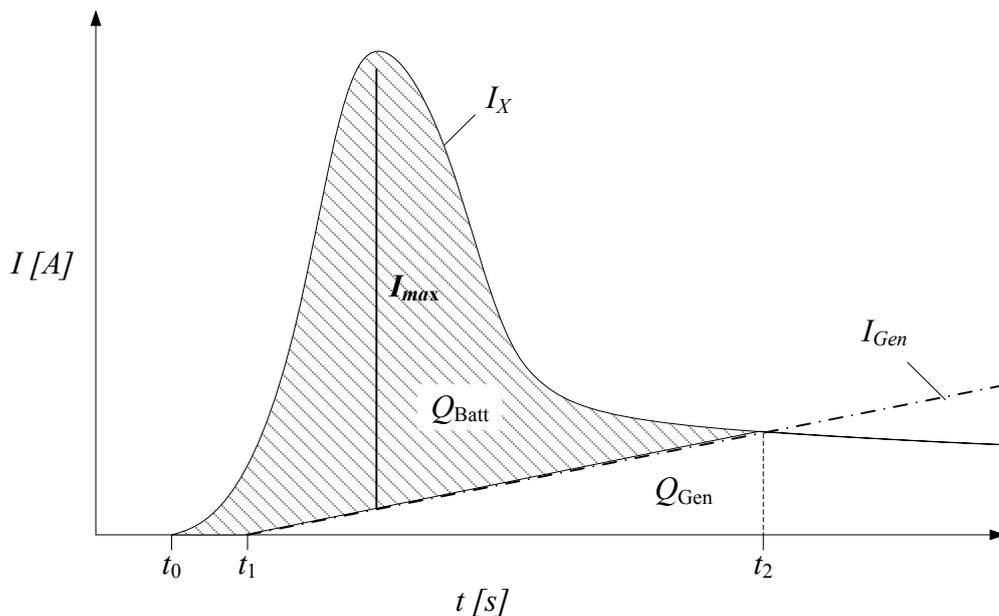


Abbildung 6.49 Diagramm zur Bestimmung der charakteristischen Kenngrößen eines Hochstromverbrauchers, dargestellt an einem beispielhaften Stromprofil.

Mit den beschriebenen Randbedingungen sind aus dem Diagramm in Abbildung 6.49 die charakteristischen Kenngrößen  $I_{\max}$  und  $Q_{Batt}$  des Verbrauchers zu ermitteln.

Der Strom  $I_{\max}$  ist der maximale Strom zwischen der Generatorkennlinie und dem Stromprofil des Verbrauchers:

$$I_{\max} = \max(I_X - I_{Gen}). \quad (6.55)$$

Die aus der Batterie zu entnehmende Energie ergibt sich hier durch die Gleichung

$$Q_{Batt} = \int_{t_0}^{t_2} (I_{\max} - I_{Gen}) \cdot dt. \quad (6.56)$$

Um einen Einblick in die Größenordnungen der maximalen Ströme  $I_{max}$  und der Ladungsmengen  $Q_{Batt}$  zu bekommen, sind in Abbildung 6.50 die charakteristischen Größen für einige beispielhafte Verbraucher im IQ-Diagramm eingetragen.

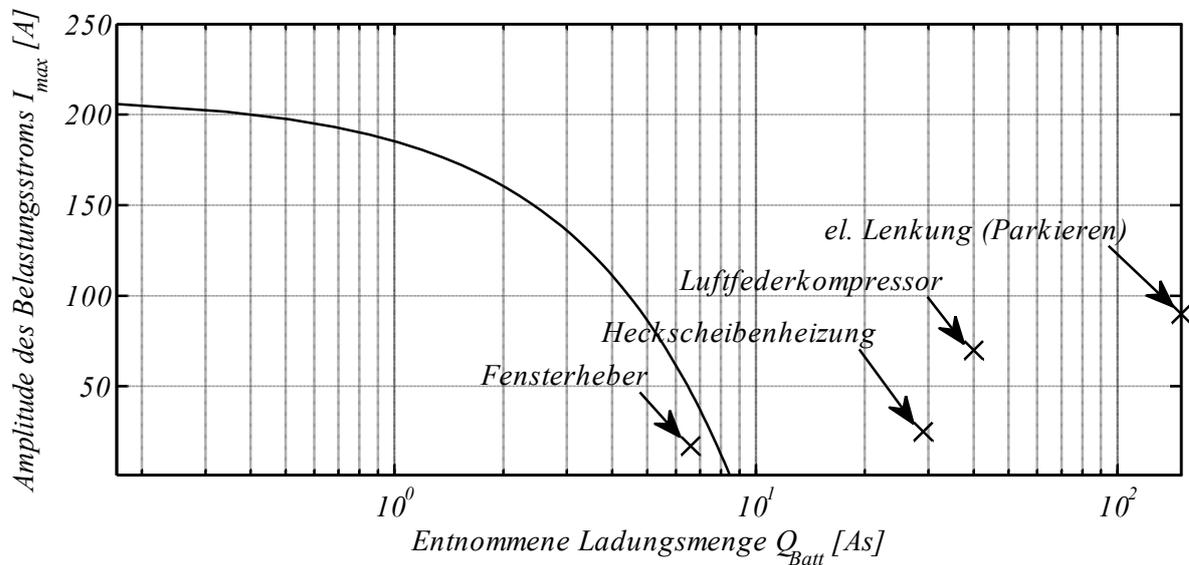


Abbildung 6.50 IQ-Diagramm in logarithmischer Darstellung zur Bestimmung von Hochstromverbrauchern mit eingetragenen beispielhaften Verbrauchern.

### 6.5.3 Modellbildung

Hochstromverbraucher sind Verbraucher vom Typ leistungsgeregelte Verbraucher oder spannungsgesteuerte Verbraucher. Daher sind die Ein- und Ausgangsgrößen des Systems „Hochstromverbraucher“, wie in Abbildung 6.51 dargestellt, gleich denen der beiden Verbrauchertypen.

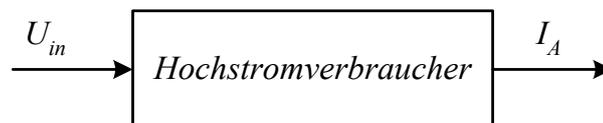


Abbildung 6.51 Blockschaltbild des Systems „Hochstromverbraucher“ mit der Spannung  $U_{in}$  als Eingangsgröße und dem Strom  $I_{out}$  als Ausgangsgröße.

Die Struktur des Systems unterscheidet sich jedoch von den Modellen der leistungsgeregelten und spannungsgesteuerten Verbraucher. Verbraucher dieser Kategorie haben meist ein hochdynamisches Verhalten und sind von vielen zusätzlichen Einflussgrößen abhängig. Es gibt mehrere Möglichkeiten, diese Verbraucher nachzubilden. Eine Möglichkeit ist es, für jeden Hochstromverbraucher ein komplexes Modell mit allen relevanten Eingangsgrößen zu erstellen. Hierfür müssten jedoch alle relevanten Systeme, die einen Einfluss auf den Hochstromverbraucher haben,

nachgebildet werden. Für ein elektrisches Lenksystem würde dies z.B. bedeuten, dass Lenkwinkel, Lenkwinkelgeschwindigkeit usw. bereitgestellt werden. Eine andere Möglichkeit der Modellierung basiert auf den Stromprofilen der verschiedenen Manöver einer Komponente. Die bei realen Manövern aufgenommenen Stromprofile werden dabei im Modell, aktiviert durch ein Triggersignal, wieder abgespielt. Über die am Eingang anliegende Spannung werden die Stromwerte zusätzlich noch korrigiert. Die beschriebene Modellierung ist in Abbildung 6.52 dargestellt.

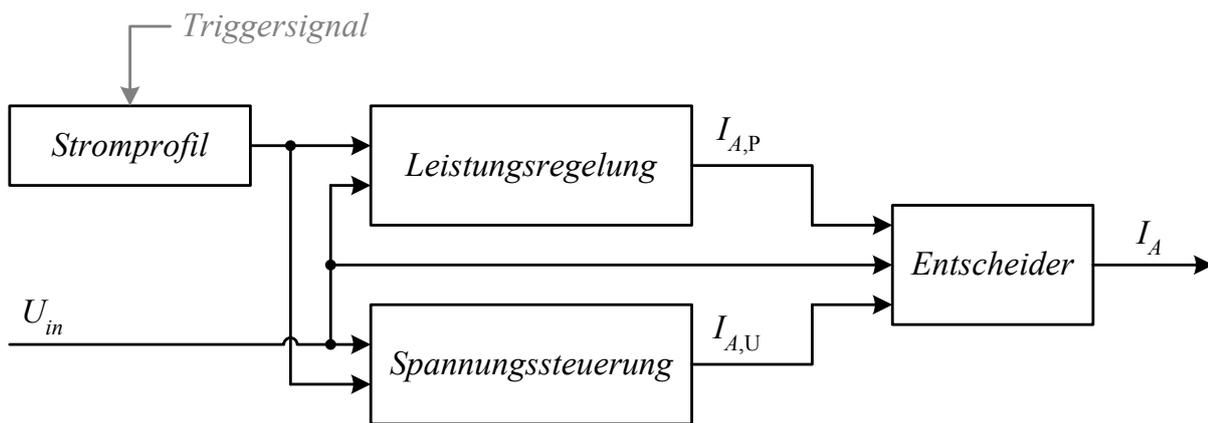


Abbildung 6.52 Struktur des Modells für Hochstromverbraucher.

# 7 *SIMULATIONSGESTÜTZTE ANALYSE DYNAMISCHER BELASTUNGS- VORGÄNGE IN BORDNETZEN*

Zu den dynamischen Belastungsvorgängen in Bordnetzen zählen alle Szenarien, bei denen sich der Belastungszustand für die Energieversorgungskomponenten ändert. Für ein Bordnetz mit  $n_V$  Verbrauchern können, unter der Annahme, dass maximal zwei Verbraucher gleichzeitig ihren Zustand ändern, theoretisch

$$n_S = \frac{n_V \cdot (n_V - 1)}{2} \quad (7.1)$$

verschiedene Szenarien auftreten. Für ein Bordnetz mit nur  $n_V = 50$  Verbrauchern sind das bereits 1225 Szenarien. Bei dieser Berechnung sind die verschiedenen Zustände der Energieversorgungskomponenten, die hierbei ebenfalls eine Rolle spielen, noch nicht berücksichtigt. Da die hier beschriebene Anzahl der Szenarien bei jeder Änderung im Bordnetz, was während der Entwicklung öfters vorkommen kann, erneut untersucht werden muss, ist dies selbst mit Hilfe der Simulation nicht mehr handhabbar. Daher wird zunächst eine Szenarienauswahl durchgeführt, deren Ziel es ist, die kritischen dynamischen Belastungsvorgänge bereits im Vorfeld zu ermitteln, um die Anzahl der zu untersuchenden Szenarien zu reduzieren. Anschließend werden diese ausgewählten Szenarien mit Hilfe der Simulation analysiert. Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse der Simulation richtig sind, wird noch eine Validierung anhand von Messungen durchgeführt.

## 7.1 *Szenarienauswahl*

Die Auswahl der Szenarien kann in Lastszenarien und Szenarien der Energieversorgung unterteilt werden. Bei den Verbrauchern müssen Lastszenarien bestimmt werden,

die den dynamischen Belastungsvorgängen eines oder mehrerer Verbraucher entsprechen. Bei der Energieversorgung müssen ebenfalls verschiedene Szenarien bestimmt werden, bei denen die Zustände der Energieversorgungskomponenten berücksichtigt werden. Die Gesamtheit der Szenarien ist dann eine Kombination aus den Lastszenarien und den Szenarien der Energieversorgung.

### 7.1.1 Lastszenarien

Bei der Betrachtung der Lastszenarien werden zunächst einige Einschränkungen gemacht. Bei den Verbrauchern, deren dynamisches Verhalten betrachtet wird, wird sich hier auf die Hochstromverbraucher beschränkt. Diese können, nach ihrer Definition, alleine zu komfortrelevanten Einschränkungen führen. Des Weiteren werden auf Grund der Auftrittswahrscheinlichkeit nur Szenarien untersucht, bei denen maximal zwei Hochstromverbraucher gleichzeitig aktiv werden.

Zur Identifikation dieser Szenarien müssen die Aktivitäten aller Hochstromverbraucher in allen Situationen bekannt sein. In Tabelle 7.1 sind hierfür die Aktivitäten von verschiedenen, derzeit verfügbaren Hochstromverbrauchern in den einzelnen Betriebszuständen des Fahrzeugs aufgeführt.

*Tabelle 7.1 Aktivitätsmatrix von beispielhaften Hochstromverbrauchern eines Fahrzeugs bei Standardbetrieb. Den verschiedenen Betriebszuständen des Fahrzeugs sind die Aktivitäten der Hochstromverbraucher zugeordnet.*

	<i>Motor aus</i>	<i>Kaltstart</i>	<i>Motor an, Stand</i>	<i>Motor an, Fahrt</i>
<i>Starter</i>	-	Kaltstart	-	-
<i>Glühzeitendstufen (Diesel)</i>	Vorglühen	Vorglühen	-	Nachheizen
<i>Motorlüfter</i>	Nachlauf	-	Kühlen	Kühlen
<i>ESP-Pumpe</i>	-	-	x	x
<i>Luftfederkompressor</i>	-	-	x	x
<i>Elektrisch Lenkung</i>	-	-	Parkieren	Ausweichmanöver
<i>Aktive Hinterachslenkung</i>	-	-	Parkieren	Ausweichmanöver
<i>Rev. Gurtstraffer</i>	-	-	x	x
<i>Airscarf</i>	x	x	x	x

Spezielle Funktionen und Fahrzeugtypen, wie z.B. die Stopp-/Start Funktionalität und Hybridfahrzeuge, benötigen zusätzliche Hochstromverbraucher und erweitern die Betriebszustände der Fahrzeuge. In Tabelle 7.2 sind die zusätzlichen benötigten

Umfänge und Betriebszustände für das Beispiel der Stopp/Start Funktionalität aufgeführt. Betrachtet man alle in diesem Beispiel aufgeführten Hochstromverbraucher mit deren unterschiedlichen Aktivitäten, so kommt man hier auf  $n=14$  verschiedene Aktivitäten, die untereinander kombinierbar sind. Mit der Einschränkung, dass höchstens zwei Hochstromverbraucher gleichzeitig aktiv sind, ergibt sich die maximale Anzahl der zu untersuchenden Lastszenarien aus der Summe der möglichen Kombinationen der einzelnen Verbraucheraktivitäten. Bei dem beispielhaften Bordnetz mit  $n=14$  verschiedenen Aktivitäten von Hochstromverbrauchern liegt die maximal Anzahl der Lastszenarien somit nach Gleichung (7.1) bei 91 Szenarien.

*Tabelle 7.2 Aktivitätsmatrix von beispielhaften Hochstromverbrauchern eines Fahrzeugs bei Stopp/Start-Betrieb. Den verschiedenen Betriebszuständen des Fahrzeugs sind die Aktivitäten der Hochstromverbraucher zugeordnet.*

	<i>Autostopp</i>	<i>Stoppphase</i>	<i>Warmstart</i>
<i>Starter</i>	-	-	Warmstart
<i>Glühzeitendstufen (Diesel)</i>	-	-	-
<i>Motorlüfter</i>	x	x	x
<i>ESP-Pumpe</i>	x	x	x
<i>Luftfederkompressor</i>	x	x	x
<i>Elektrisch Lenkung</i>	x	Parkieren light	x
<i>Aktive Hinterachslenkung</i>	x	x	x
<i>Reversible Gurtstraffer</i>	x	x	x
<i>Airscarf</i>	x	x	x

Zusätzlich zu den aufgelisteten Aktivitäten der Hochstromverbraucher in den einzelnen Betriebszuständen des Fahrzeugs können noch Kombinationen ausgeschlossen werden, die in keinem Betriebszustand des Fahrzeugs auftreten können. Z.B. ist der Motorlüfter nie gleichzeitig mit den Glühzeitendstufen aktiv. Hierfür wird in Tabelle 7.3 eine Kombinationsmatrix erstellt, aus der die möglichen Kombinationen hervorgehen. Die Matrix ist an der Diagonalachse gespiegelt, wodurch sich bei der Ermittlung der Anzahl der Kombinationen auf nur eine Seite der Spiegelachse beschränkt wird. Dies wird auch bereits in der Gleichung (7.1) berücksichtigt. Durch das Ausschließen von Kombinationen in der Kombinationsmatrix können die Lastszenarien in diesem Beispiel von 91 auf 50 mögliche Lastszenarien reduziert werden.

Tabelle 7.3 Beispielhafte Kombinationsmatrix für die zuvor aufgelisteten Aktivitäten der Hochstromverbraucher für ein Fahrzeug mit Stopp/Start-Funktion.

	<i>Starter, Kaltstart</i>	<i>Starter, Warmstart</i>	<i>Glühzeitendstufen, Vorglühen</i>	<i>Glühzeitendstufen, Nachheizen</i>	<i>Motorlüfter, Kühlen</i>	<i>Motorlüfter, Nachlauf</i>	<i>ESP-Pumpe</i>	<i>Luftfederkompressor</i>	<i>Elektrisch Lenkung, Parkieren</i>	<i>Elektrisch Lenkung, Parkieren light</i>	<i>Elektrisch Lenkung, Ausweichmanöver</i>	<i>Aktive Hinterachslenkung</i>	<i>Reversible Gurtstraffer</i>	<i>Airscarf</i>
<i>Starter, Kaltstart</i>	-	-	-*	-	-	-	-	-*	-	-	-	-	-	-*
<i>Starter, Warmstart</i>	-	-	-	X	X	-	X	X	-	X	-	X	X	X
<i>Glühzeitendstufen, Vorglühen</i>	-*	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	X
<i>Glühzeitendstufen, Nachheizen</i>	-	X	-	-	-	-	X	X	X	-	X	X	X	X
<i>Motorlüfter, Kühlen</i>	-	X	-	-	-	-	X	X	X	-	X	X	X	X
<i>Motorlüfter, Nachlauf</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>ESP-Pumpe</i>	-	X	-	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X
<i>Luftfederkompressor</i>	-*	X	X	X	X	-	X	-	X	X	X	X	X	X
<i>Elektrisch Lenkung, Parkieren</i>	-	-	-	X	X	-	X	X	-	-	-	X	X	X
<i>Elektrisch Lenkung, Parkieren light</i>	-	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-	X	X	X
<i>Elektrisch Lenkung, Ausweichmanöver</i>	-	-	-	X	X	-	X	X	-	-	-	X	X	X
<i>Aktive Hinterachslenkung</i>	-	X	-	X	X	-	X	X	X	X	X	-	X	X
<i>Reversible Gurtstraffer</i>	-	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	-	X
<i>Airscarf</i>	-*	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	-

\* Die Systeme können aktiv sein, es wird jedoch keine Funktion während des Startvorgangs gefordert.

### ***7.1.2 Szenarien der Energieversorgung***

Die Komponenten der Energieversorgung, im speziellen die Batterie und der Generator, können verschiedene Zustände annehmen, in denen sie jeweils sehr verschiedene Verhaltensweisen haben können. Um zu untersuchen, ob es zu funktionsrelevanten Einschränkungen kommen kann, müssen die dynamischen Belastungsvorgänge bei den Komponentenzuständen untersucht werden, die das schlechteste Verhalten in der jeweiligen Situation aufweisen, das auch im Feld vorkommen kann. Bei Bordnetzen mit weiteren oder anderen Energiequelle und -speichern gilt für diese die gleiche Vorgehensweise. Im Folgenden sind beispielhafte Zustände für ein Fahrzeug mit einer Batterie und einem Generator mit Stopp/Start Funktion aufgeführt.

Für die Batterie wird im Normalbetrieb der schlechteste Zustand angenommen, bei dem ein Motorstart ohne fremde Hilfe noch möglich ist (Batteriezustand 1). Bei Verbraucheraktivitäten, die nur im Autostopp-Betrieb bei Stopp/Start-Funktion auftreten können, kann ein besserer Batteriezustand angenommen werden als im Normalbetrieb (Batteriezustand 2). Das kommt daher, dass bei Stopp/Start-Funktion der Batteriezustand näherungsweise bestimmt wird und der Autostopp nur erfolgen darf, wenn der Batteriezustand ausreichend gut ist, um die Stopp-Phase überstehen zu können.

Beim Generator müssen ebenfalls die Zustände gewählt werden, bei denen er die schlechteste dynamische Leistungsfähigkeit hat. Der schlechteste Fall ist, wenn der Verbrennungsmotor nicht läuft und somit vom Generator keine Leistung abgegeben wird (Generatorzustand 1). Bei laufendem Verbrennungsmotor kann vom Generator bei niedriger Drehzahl weniger Leistung abgegeben werden, d.h. der schlechteste Fall ist hier der Betrieb bei Leerlaufdrehzahl.

In Tabelle 7.4 sind die Kombinationen der Energieversorgungskomponenten aufgeführt, die in den verschiedenen Betriebsszenarien vorkommen und dabei das schlechteste Verhalten aufweisen. Die Vereinigung der Kombinationsmatrix der Energieversorgung (Tabelle 7.4) mit der Kombinationsmatrix der Verbraucheraktivitäten (Tabelle 7.3) ist in Tabelle 7.5 dargestellt. Hieraus gehen alle zu untersuchenden Szenarien hervor. In dem aufgeführten Beispiel sind dies 70 zu untersuchende Szenarien. Im Vergleich dazu kommt man ohne die Kombinationsmatrizen mit vier Szenarien der Energieversorgung und 91 möglicher Lastszenarien auf 364 zu untersuchende Szenarien. Durch die Kombinationsmatrizen konnte somit in diesem Beispiel die Anzahl der Szenarien auf etwa 25 % der maximal möglichen Szenarien reduziert werden.

*Tabelle 7.4 Beispielhafte Kombinationsmatrix der Energieversorgungsszenarien. Der Batteriezustand „warm“ wurde mit aufgenommen, da die Stopp/Start-Funktion vom Bordnetzmanagement nur bei entsprechend gutem Batteriezustand zugelassen wird. Daher wird hier auch nur die Kombination mit „Generator aus“ berücksichtigt. Die für die Untersuchungen ausgewählten Kombinationen sind mit Buchstaben gekennzeichnet, auf die im Folgenden verwiesen wird.*

	<i>Batteriezustand „kalt“</i>	<i>Batteriezustand „warm“</i>	<i>Generator bei LL-Drehzahl</i>	<i>Generator aus</i>
<i>Batteriezustand „kalt“</i>	-	-	A	B
<i>Batteriezustand „warm“</i>	-	-	-	C
<i>Generator bei LL-Drehzahl</i>	A	-	-	-
<i>Generator aus</i>	B	C	-	-

## 7.2 Szenarienanalyse

Die Szenarienanalyse beinhaltet die Simulation der gewählten Szenarien und die Auswertung der Simulationsergebnisse. Um den Anforderungen an die Genauigkeit der Simulation gerecht zu werden, muss die Schrittweite in der Simulationsumgebung entsprechend klein gewählt werden. Aus den Betrachtungen der komfort- und funktionsrelevanten Sensitivität ergibt sich unter Berücksichtigung des Abtasttheorems eine maximale Schrittweite von 10 ms.

Bei den zu untersuchenden Szenarien werden zu den einzelnen Aktivitäten der Hochstromverbraucher noch die entsprechenden Stromprofile benötigt. Diese werden wie in Abschnitt 6.5.2 entsprechend den Prüfvorschriften der Hochstromverbraucher bestimmt. Für die Szenarienanalyse werden diese Stromprofile insoweit bearbeitet, dass sich ihr maximaler Stromgradient an einer definierten Position befindet. Dies ist für die zeitgleiche Aktivität mehrerer Verbraucher zwingend erforderlich.

### 7.2.1 Auswertung der Simulationsergebnisse

Das Ziel der Simulation ist es, die Verbraucherkombinationen zu identifizieren, bei denen es an mindestens einem Verbraucher im Bordnetz zu einer Spannung unterhalb der in Abschnitt 3.3.1 angegebenen Grenzwerte kommt.

Hierfür werden die Spannungen an alle Komponenten während der Simulation aufgezeichnet. Anschließend werden diese Spannungen auf Unterschreitung der in Abschnitt 3.3.1 ermittelten Grenzwerte geprüft. Hierüber können die Komponenten

identifiziert werden, bei denen es zu einer Funktionseinschränkung oder einem Funktionsausfall kommen kann.

*Tabelle 7.5 Beispielhafte Kombinationsmatrix zur Minimierung der kritischen Szenarien. Die Buchstaben in den Feldern verweisen auf die Szenarien der Energieversorgung aus Tabelle 7.4, die zusammen mit den jeweiligen Lastkombinationen zu prüfen sind.*

	<i>Starter, Kaltstart</i>	<i>Starter, Warmstart</i>	<i>Glühzeitendstufen, Vorglühen</i>	<i>Glühzeitendstufen, Nachheizen</i>	<i>Motorlüfter, Kühlen</i>	<i>Motorlüfter, Nachlauf</i>	<i>ESP-Pumpe</i>	<i>Luftfederkompressor</i>	<i>Elektrisch Lenkung, Parkieren</i>	<i>Elektrisch Lenkung, Parkieren light</i>	<i>Elektrisch Lenkung, Ausweichmanöver</i>	<i>Aktive Hinterachslenkung</i>	<i>Reversible Gurtstraffer</i>	<i>Airscarf</i>
<i>Starter, Kaltstart</i>														
<i>Starter, Warmstart</i>				C	C		C	C		C		C	C	C
<i>Glühzeitendstufen, Vorglühen</i>								B					B	B
<i>Glühzeitendstufen, Nachheizen</i>		C					A,B	A,B	A		A	A,B	A,B	A,B
<i>Motorlüfter, Kühlen</i>		C					A,B	A,B	A		A	A,B	A,B	A,B
<i>Motorlüfter, Nachlauf</i>														
<i>ESP-Pumpe</i>		C		A,B	A,B			A,B	A	B	A	A,B	A,B	A,B
<i>Luftfederkompressor</i>		C	B	A,B	A,B		A,B		A	B	A	A,B	A,B	A,B
<i>Elektrisch Lenkung, Parkieren</i>				A	A		A	A				A	A	A
<i>Elektrisch Lenkung, Parkieren light</i>		C					C	C				C	C	C
<i>Elektrisch Lenkung, Ausweichmanöver</i>				A	A		A	A				A	A	A
<i>Aktive Hinterachslenkung</i>		C		A,B	A,B		A,B	A,B	A	C	A		A,B	A,B
<i>Reversible Gurtstraffer</i>		C	B	A,B	A,B		A,B	A,B	A	C	A	A,B		A,B
<i>Airscarf</i>		C	B	A,B	A,B		A,B	A,B	A	C	A	A,B	A,B	

Für den hier vorgestellten Ansatz zur Auslegung von Bordnetzen werden im Weiteren noch die aus der Batterie entnommene Ladungsmenge und der maximale Strom, mit dem die Batterie belastet wird, benötigt. Diese Daten werden ebenfalls für jede untersuchte Verbraucherkombination bestimmt.

### 7.2.2 Validierung der Szenarienanalyse

Eine Validierung der Simulation mit Messungen ist hier nur bedingt möglich. Das Nachstellen von Szenarien am Fahrzeug wird, wie bereits in Abschnitt 4.1 beschrieben, durch mehrere Faktoren erschwert. Im Fahrzeug ist es z.B. sehr schwierig, den gleichen Batteriezustand wie in der Simulation einzustellen.

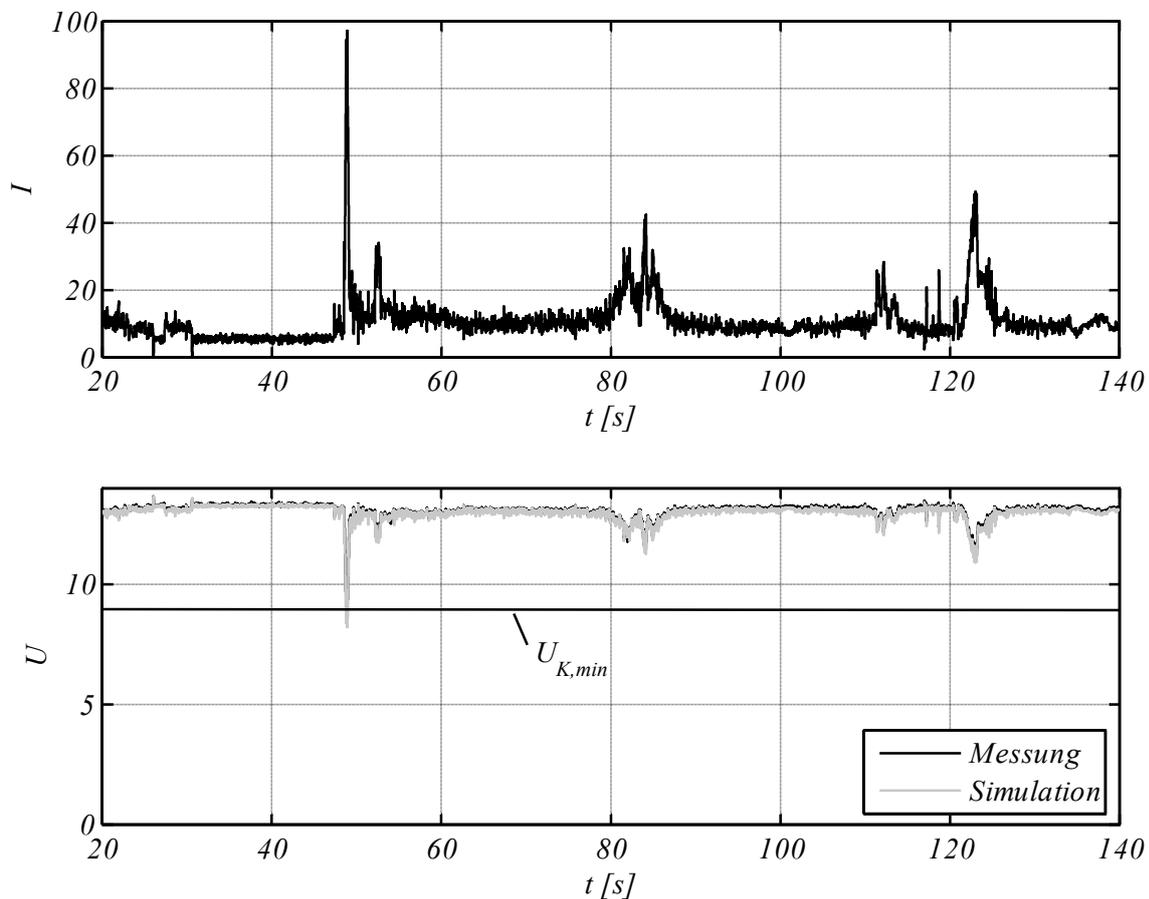


Abbildung 7.1 Darstellung des Stromverlaufs eines aktiven Hochstromverbrauchers und die zugehörigen Spannungen am Verbraucher aus Messung und Simulation.

Auch die möglichen Abweichungen bei den einzelnen Parametern, wie z.B. den Widerstandswerten der Kontaktstellen, haben einen Einfluss auf die Messergebnisse. Zusätzlich verharren die restlichen Verbraucher im Fahrzeug nicht, wie in der Simulation, in einem statischen Zustand. Sie verändern ihre Zustände in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen, wie z.B. der Kühlwassertemperatur. Eine genaue Validierung kann daher nur für die einzelnen Teilmodelle erfolgen, wie es bereits in Kapitel 6 gemacht wurde. An einem Beispiel werden die Simulationsergebnisse trotz dieser Unsicherheiten mit einer Messung verglichen, um zumindest die Übereinstimmung bei der Tiefe der Spannungseinbrüche zu zeigen. Verschiedene Parameter, wie z.B. die Generatorsollspannung, wurden hierbei in der Simulation auf die bei der Messung im Bordnetz anstehenden Größen angepasst. In Abbildung 7.1 ist der Strom eines Hochstromverbrauchers im Bordnetz und die Spannung an diesem Verbraucher aus der Messung und aus der Simulation dargestellt. Wie zu sehen ist, gibt es eine gute Übereinstimmung der Simulation mit der Messung. Neben den Spannungsverläufen ist im unteren Diagramm in Abbildung 7.1 auch die Grenzkennlinie eingezeichnet, die bei der Auswertung der Simulationsergebnisse herangezogen wird. In diesem Beispiel wird die Grenzkennlinie unterschritten, was zu einem Funktionsausfall dieser Komponente führen kann.



# 8 *VORGEHENSWEISE ZUR UNTERSUCHUNG UND BEWERTUNG SPANNUNGSSTABILISIERENDER MAßNAHMEN*

Wie auch die Standardkomponenten des Bordnetzes müssen für den in dieser Arbeit vorgestellten Beitrag zur Auslegung von Bordnetzen die Maßnahmen zur Stabilisierung der Spannung auf ihr Verhalten hin untersucht werden. Das Verhalten der Maßnahmen wird im Folgenden anhand der Änderung der Auswirkungen von Hochstromverbrauchern untersucht und bewertet. Hierfür wird zunächst ein Verfahren zur Darstellung und Bewertung der Auswirkungen von Stabilisierungsmaßnahmen vorgestellt. In Kapitel 9 werden dann die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen mit diesem Verfahren dargestellt.

## *8.1 Verfahren zur Darstellung und Bewertung von Stabilisierungsmaßnahmen*

Das Ziel aller hier aufgelisteten Maßnahmen ist es, die Auswirkungen von Hochstromverbrauchern auf das Bordnetz zu reduzieren. Um die Veränderungen durch die Stabilisierungsmaßnahmen visualisieren zu können, wird hier ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, die tendenziellen Auswirkungen der einzelnen spannungsstabilisierenden Maßnahmen zu veranschaulichen. Hierfür werden die in Abschnitt 6.4.1 eingeführte Methode zur Klassifizierung von Verbrauchern und die in Abschnitt 6.5 eingeführten Diagramme zur Bestimmung der charakteristischen Größen zu Hilfe genommen.

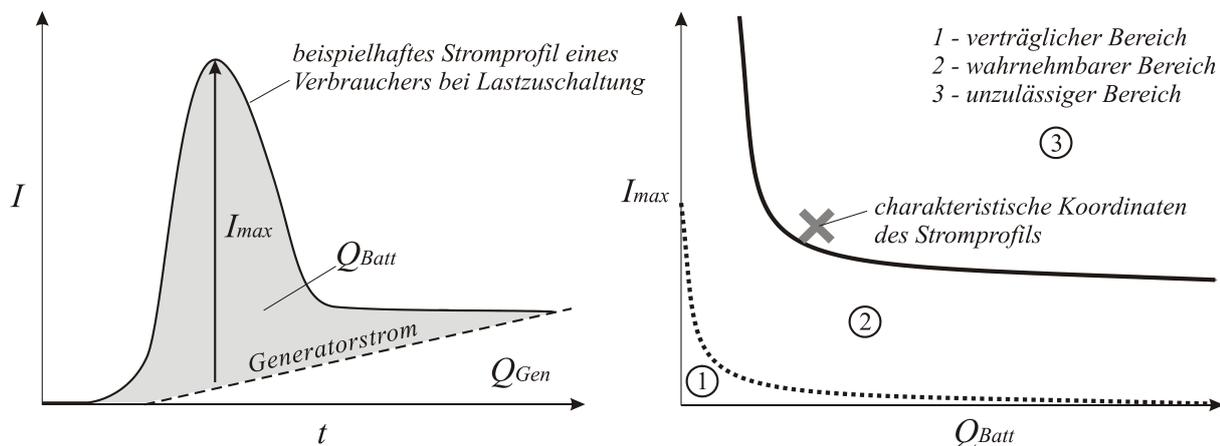


Abbildung 8.1 Beispielhaftes Lastdiagramm für eine Lastzuschaltung mit den zugehörigen charakteristischen Koordinaten im IQ-Diagramm für Unter-spannung.

Ein Verbraucher, dessen Betriebspunkt in Abbildung 8.1 beispielhaft eingetragen ist, würde bereits alleine einen unzulässig großen Spannungseinbruch verursachen und könnte dadurch die Funktion anderer Komponenten beeinflussen. In diesem Fall muss der Verbraucher durch entsprechende Maßnahmen aus dem unzulässigen Bereich in den wahrnehmbaren Bereich oder besser in den verträglichen Bereich des IQ-Diagramms für positive Laständerung gebracht werden. Hierfür gibt es mehrere Ansätze: Zum einen kann dies durch Verschiebung des Betriebspunktes geschehen und zum anderen kann der wahrnehmbare und/oder verträgliche Bereich vergrößert werden. Das Verschieben des Betriebspunktes kann in horizontaler Richtung durch die Reduzierung der benötigten Ladungsmenge und in vertikaler Richtung durch die Verkleinerung des maximalen Stroms geschehen [Hoh09].

Für den Fall der Rückspeisung von Energie in das Bordnetz durch einen Verbraucher, wie in Abbildung 8.2 dargestellt, gelten die gleichen Anforderungen wie bei einem Lastsprung. Der Betriebspunkt des Verbrauchers muss zumindest in den wahrnehmbaren Bereich des IQ-Diagramms für negative Laständerung gebracht werden [Hoh09]. Die Rückspeisung wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet, da es hierbei bisher keinen Handlungsbedarf gibt.

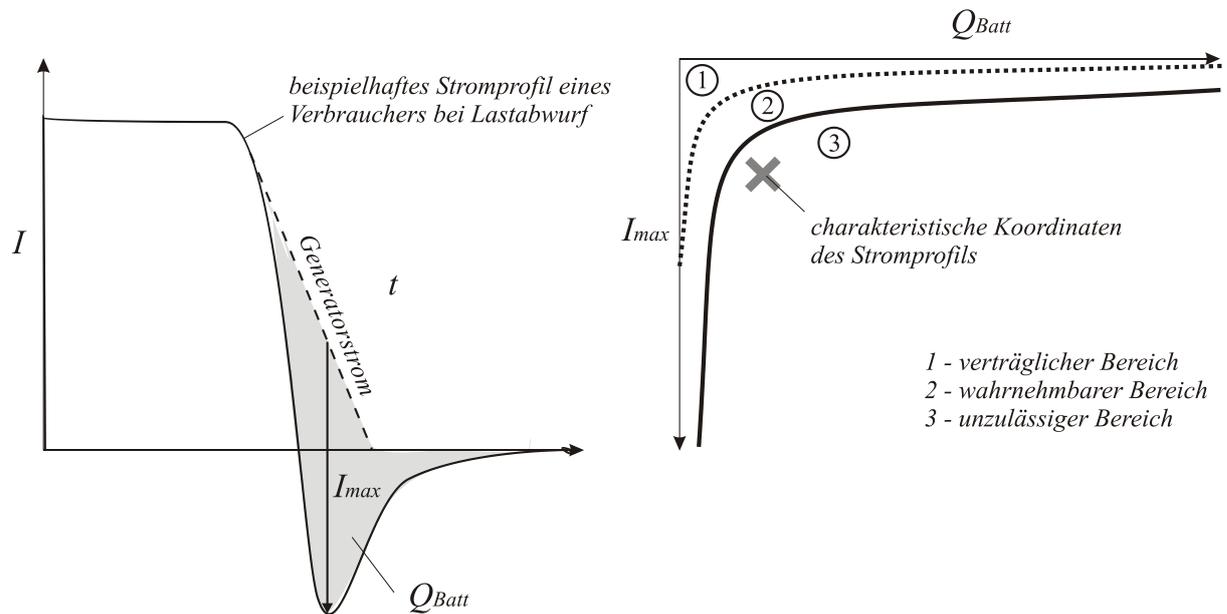


Abbildung 8.2 Beispielhaftes Lastdiagramm für einen Lastabwurf mit den zugehörigen charakteristischen Koordinaten im  $IQ$ -Diagramm für Über-  
spannung.



# 9 *MAßNAHMENKATALOG ZUR STABILISIERUNG VON SPANNUNGEN*

Auf Grund der Vielzahl von Möglichkeiten zur Stabilisierung von Spannungen ist es notwendig, einen Katalog dieser Maßnahmen zu erstellen. Hierin werden die unterschiedlichen Eigenschaften und Wirkungsbereiche der Maßnahmen analysiert und mit dem im vorherigen Kapitel vorgestellten Verfahren visualisiert. Der beispielhafte Maßnahmenkatalog in dieser Arbeit bezieht sich auf ein Bordnetz mit einer Batterie als Energiespeicher und einem Generator als Energiequelle. Bei Fahrzeugen mit anderen Energiespeichern- oder -quellen muss der Maßnahmenkatalog dementsprechend angepasst werden.

## *9.1 Dezentrale passive Spannungsstabilisierung*

Ohmsche Verbraucher haben den Vorteil, dass sich ihre Leistungsaufnahme proportional zur anliegenden Spannung verhält. Bei Spannungseinbrüchen sinkt automatisch die Leistungsaufnahme dieser Verbraucher. Hierdurch entsteht ein sogenannter Selbstregelleffekt im Bordnetz. Um eine konstante Performance der Systeme zu erreichen, werden ohmsche Verbraucher zunehmend mit einer Leistungsregelung ausgestattet. Durch das Konstanthalten der Leistung vieler Verbraucher hat der Selbstregelleffekt im Bordnetz einen immer geringer werdenden Einfluss.

Abbildung 9.1 zeigt am Beispiel eines leistungsgeregelten Verbrauchers mit einer Leistung von 500 W und einem ohmschen Verbraucher, der bei 12 V ebenfalls eine Leistung von 500 W aufnimmt, die unterschiedlichen Stromaufnahmen bei einem beispielhaften Spannungseinbruch. Die dargestellten Stromverläufe wurden durch die Simulation idealer Verbraucher, mit einem im Fahrzeug gemessenen Spannungsverlauf als Eingangsgröße, ermittelt.

Als spannungsstabilisierende Maßnahme wird hier ein Konzept vorgestellt, das speziell bei leistungsgeregelten Verbrauchern angewendet werden kann. Durch eine Leistungsdegradation bei tiefen Spannungseinbrüchen (Abbildung 9.2) sollen Spannungseinbrüche, die funktionsrelevant werden können, verhindert werden.

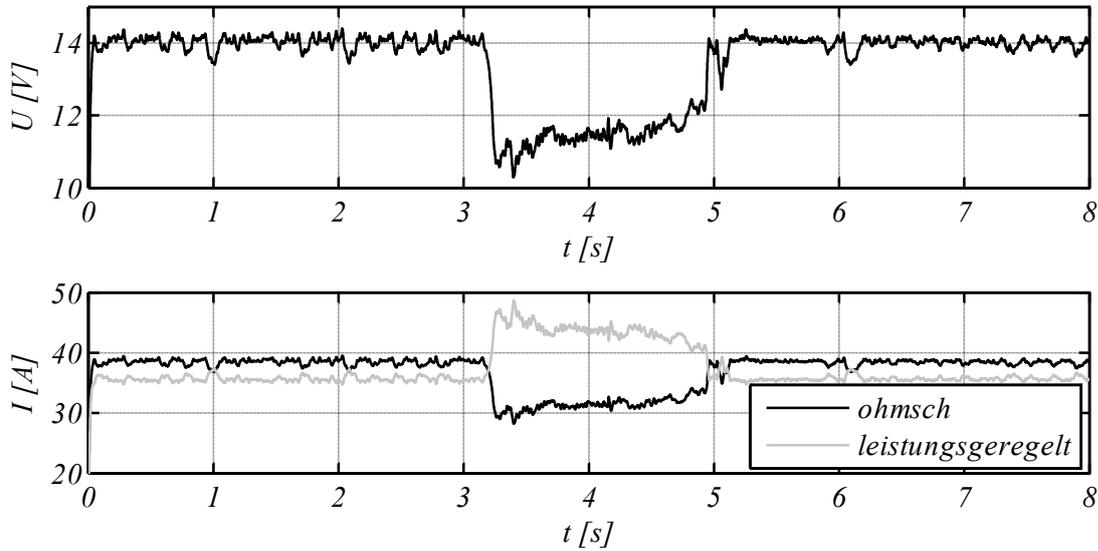


Abbildung 9.1 Simulation der Stromaufnahmen eines leistungsgeregelten und eines ohmschen Verbrauchers, mit einer jeweiligen Leistung von 500 W bei 13,5 V bei einem beispielhaften Spannungseinbruch.

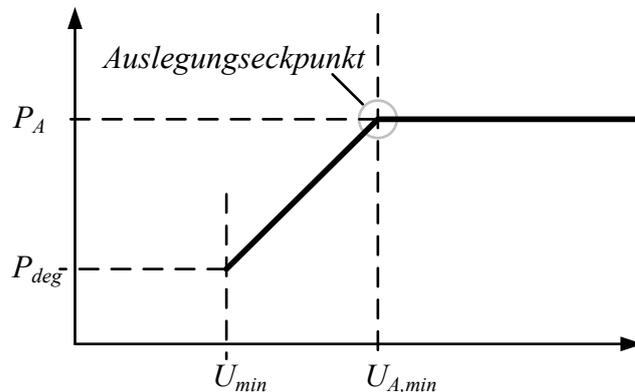


Abbildung 9.2 Grafische Darstellung des Unterspannungskonzeptes für leistungsgeregelte Verbraucher.

Zur Umsetzung dieses Unterspannungskonzeptes müssen Verbraucher ihre Leistung im Spannungsbereich  $U_{A,min} \dots U_{min}$  aktiv reduzieren. Die Spannung  $U_{A,min}$  ist dabei die Spannung, die im ungestörten Fall dauerhaft an der Komponente anliegen kann. Bis zu dieser Spannung kann der Verbraucher die Leistung aufnehmen, die zum Aufbringen der nominalen Performance benötigt wird. Diese Leistung ist als Auslegungsleistung  $P_A$  definiert.  $U_{min}$  gibt die Spannung an, bis zu der die Funktion der Komponente gefordert wird. Jedoch wird in diesem Betriebspunkt nicht die nominale Performance gefordert. Die Leistungsaufnahme sollte hier ein quasiohmsches Verhalten aufweisen.

$$P_{\text{deg}} = P_A \cdot \frac{U_{\text{min}}^2}{U_{A,\text{min}}^2} \tag{9.1}$$

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 9.3 die Simulation der Stromaufnahme eines Verbrauchers mit und ohne implementiertes Unterspannungskonzept dargestellt.

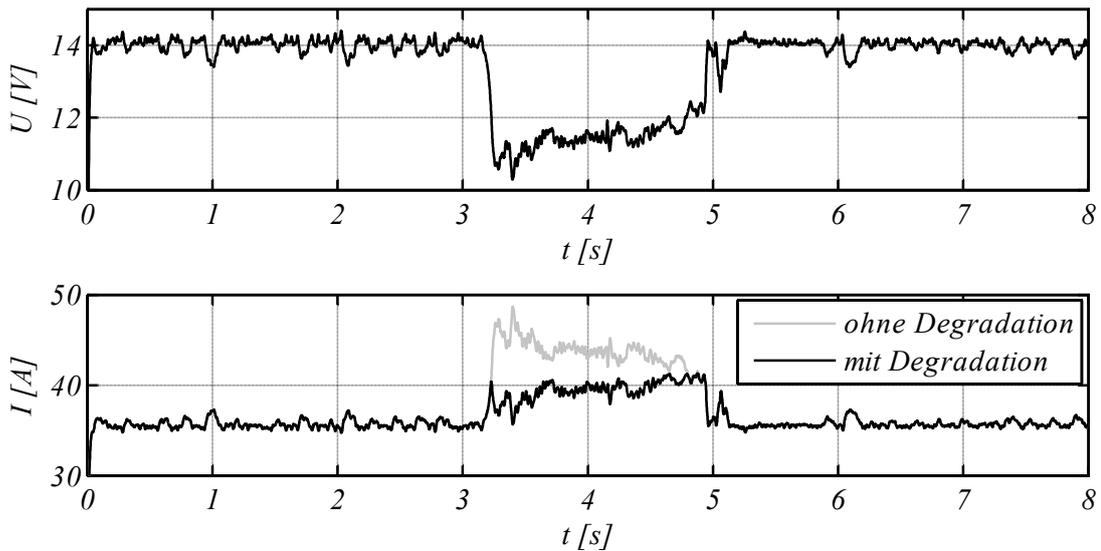


Abbildung 9.3 Simulation der Stromaufnahme eines Verbrauchers mit und ohne implementiertem Unterspannungskonzept bei einem Spannungseinbruch. Die Auslegungsspannung  $U_{A,\text{min}}$  ist in diesem Beispiel mit 12 V angenommen worden.

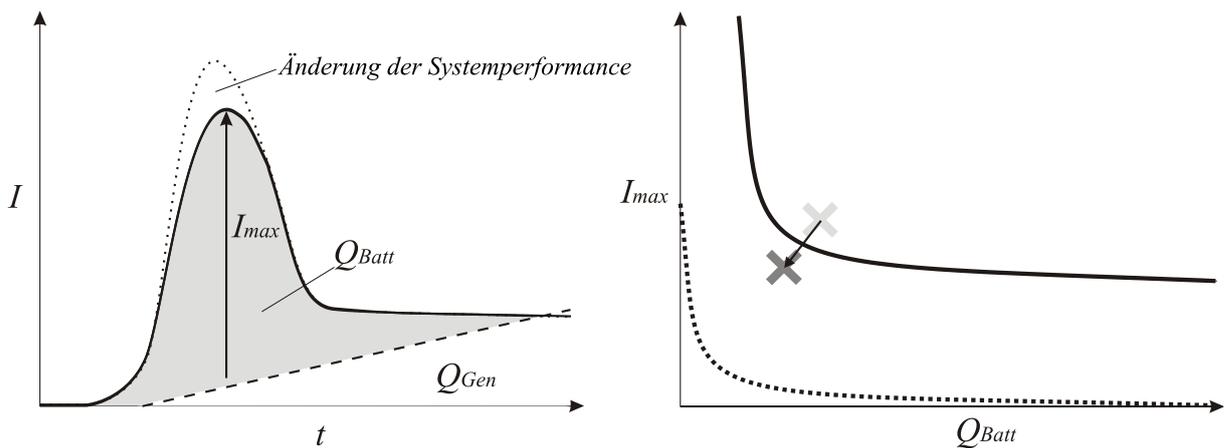


Abbildung 9.4 Änderungen im It- und IQ-Diagramm durch die Leistungsdegradation am Beispiel eines Stromprofils, dessen charakteristische Koordinaten vom unzulässigen in den wahrnehmbaren Bereich verschoben werden.

Im den beiden Diagrammen in Abbildung 9.4 ist zu sehen, dass sich diese Maßnahme sowohl auf den Maximalstrom als auch auf die aus der Batterie zu entnehmende Ladungsmenge auswirkt.

Bei Überspannungen im Bordnetz, die durch das Abschalten von Hochstromverbrauchern entstehen können, weisen ohmsche Verbraucher ebenfalls ein stabilisierendes Verhalten auf. Die Leistungserhöhung proportional zur Spannung bewirkt eine Dämpfung der Überspannungen (Abbildung 9.5).

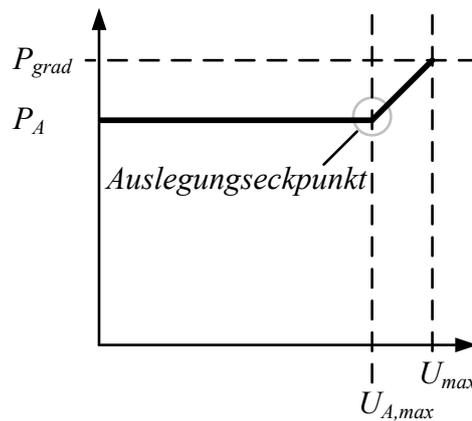


Abbildung 9.5 Grafische Darstellung des Überspannungskonzeptes für leistungs-geregelte Verbraucher.

Ab der oberen Grenze des Auslegungsbereichs der Spannung  $U_{A,max}$ , welche als maximale Spannung im störungsfreien Fall über einen längeren Zeitraum an der Komponente anliegen kann, wird eine Erhöhung der Leistungsaufnahme gefordert. Die Leistung muss im Bereich  $U_{A,max} \dots U_{max}$  von der Auslegungsleistung  $P_A$  auf ein Leistung  $P_{grad}$  angehoben werden. Die Leistung  $P_{grad}$  muss wiederum so gewählt werden, dass ein quasiohmsches Verhalten im Bereich von  $U_{A,max} \dots U_{max}$  erreicht wird.

$$P_{grad} = P_A \cdot \frac{U_{max}^2}{U_{A,max}^2} \quad (9.2)$$

Dieser Ansatz wird als passive Stabilisierungsmaßnahme bezeichnet, da hier kein Eingriff in die Energieversorgung erfolgt. Wirkungsvoll wird diese Maßnahme bei einem flächendeckenden Einsatz bei einem Großteil der im Bordnetz vorhandenen Verbraucher. Die Spannungsstabilisierung wirkt sich dabei im gesamten Bordnetz aus.

## 9.2 Dezentrale aktive Spannungsstützung

Im Gegensatz zum vorherigen Ansatz wird bei der dezentralen, aktiven Spannungsstützung nur die lokale Komponente gestützt. Hierfür kann z.B. eine einfache elektronische Schaltung aus einer Diode und einem dynamischen Energiespeicher eingesetzt werden. Durch die Diode in Abbildung 9.6 wird ausschließlich die lokale Komponente mit dem Energiespeicher gestützt.

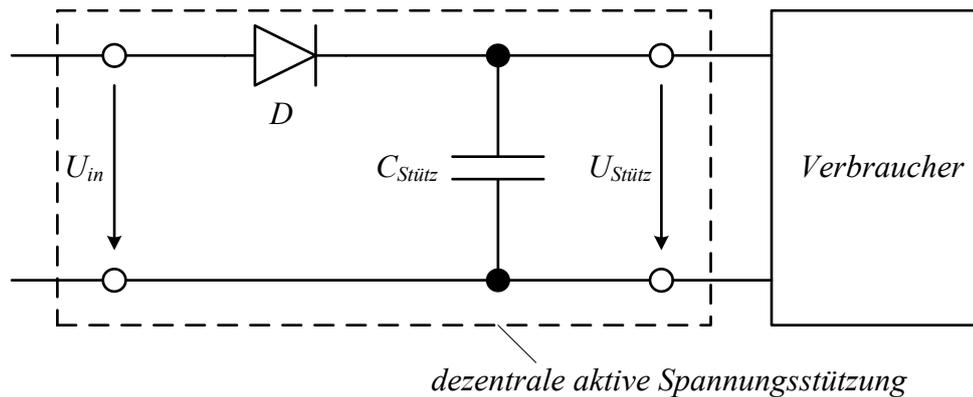


Abbildung 9.6 Elektronische Schaltung einer dezentralen, aktiven Spannungsstützung mit einem Kondensator als Energiespeicher.

Am Beispiel eines Kondensators soll an dieser Stelle noch die Dimensionierung des Energiespeichers gezeigt werden. Die Kapazität des Kondensators ist vom benötigten Strom, der zu überbrückenden Zeit und der erlaubten Tiefe des Spannungseinbruchs abhängig. Die Gleichung

$$C_{Stütz} = \frac{Q_{Stütz}}{U_{Stütz}} = \frac{\int I \cdot dt}{U_{A,min} - U_{min}} \quad (9.3)$$

berücksichtigt diese Zusammenhänge. Dabei ist die Spannung  $U_{A,min}$  die Auslegungsspannung, die im Bordnetz nie dauerhaft unterschritten werden sollte.  $U_{min}$  ist die minimale Spannung, bei der die Komponente ihre Funktion noch erfüllen kann. Nachteilig ist bei dieser Beschaltung jedoch, dass die Spannung an der Komponente dauerhaft um den Spannungsabfall an der Diode vermindert ist. Das IQ-Diagramm bei dieser dezentralen Lösung (Abbildung 9.7) ändert sich nur für die gestützten Komponenten. Hierdurch wird für diese Verbraucher der wahrnehmbare Bereich in Richtung des unzulässigen Bereichs vergrößert.

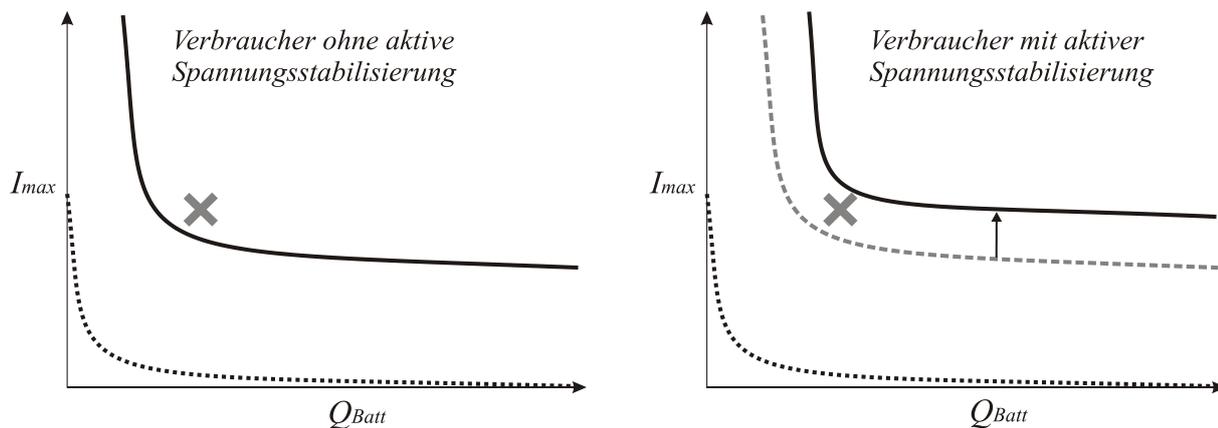


Abbildung 9.7 Teilung und Anpassung des IQ-Diagramms durch dezentrale, aktive Spannungsstabilisierung.

Diese Maßnahme kann z.B. auch durch den Einsatz eines DC/DC-Wandlers, anstatt der Schaltung nach Abbildung 9.6 realisiert werden.

### 9.3 Auslegungsvorschriften für Komfortverbraucher

Für Komfortverbraucher können zusätzliche Vorschriften gemacht werden, da hier andere Anforderungen an die Funktionsbereitstellung gestellt werden als z.B. bei Verbrauchern, welche die Fahrdynamik beeinflussen. Im Folgenden werden hierfür die Begrenzung der Stromgradienten und die Funktionsdegradierung genauer erläutert. Die beiden hier angesprochenen Maßnahmen können jedoch immer nur in Absprache mit dem entsprechenden Systemverantwortlichen und dem Komponentenentwickler erfolgen. Es dürfen hierdurch keine Einschränkungen für den Kunden entstehen.

#### 9.3.1 Begrenzung der Stromgradienten

Beispielsweise können Heizelemente, deren Funktionen prinzipbedingt ein sehr träges Verhalten haben, mit einer Softstart-Funktion ausgestattet werden. Die Stromgradienten der Verbraucher können mit dieser Funktion soweit begrenzt werden, dass sie kleiner sind als der minimale Gradient des Generatorstroms. Abbildung 9.8 zeigt anhand des IQ-Diagramms, wie diese Funktion sich auf die Charakteristik solcher Verbraucher auswirkt. Verbraucher, die vor der Implementierung dieser Maßnahme zur Kategorie der Hochstromverbraucher zu zählen waren, werden mit der Softstart-Funktion in den verträglichen Bereich des IQ-Diagramms verschoben und sind somit keine wahrnehmbaren Verbraucher mehr. Nachteilig hierbei ist jedoch, dass für diese „einfachen“ Verbraucher, die meist nur über ein Relais angesteuert werden, eine zusätzliche Elektronik benötigt wird, die eine Leistungsregelung ermöglicht.

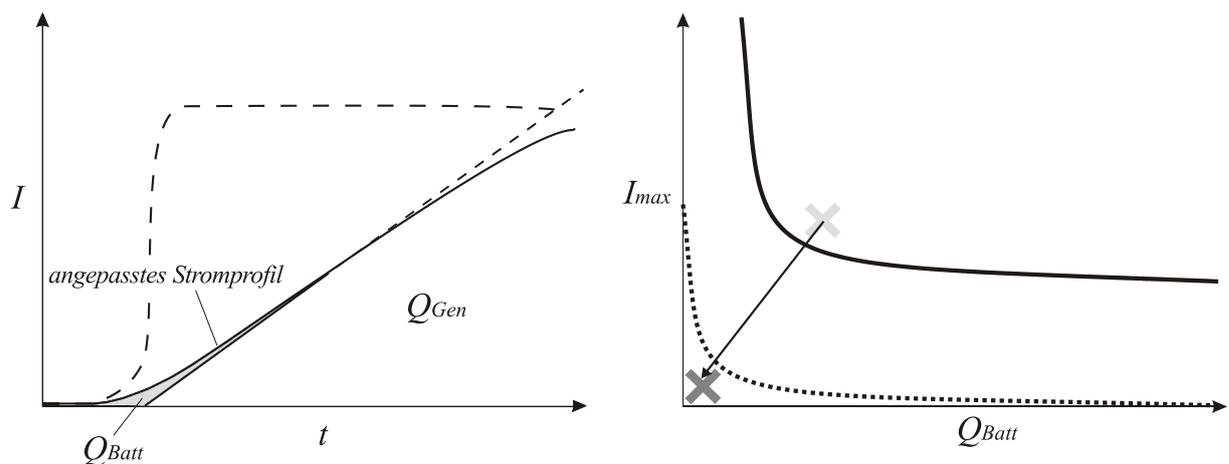


Abbildung 9.8 Änderungen der Charakteristik im  $I$ - $t$ - und im  $I$  $Q$ -Diagramm durch die Softstart-Funktion am Beispiel eines ohmschen Verbrauchers.

### 9.3.2 Funktionsdegradierung

Neben der Leistungsdegradierung aus Abschnitt 9.1 können für Komfortverbraucher auch Funktionsdegradierungen vorgesehen werden. Für eine ausreichend schnelle Reaktionszeit kann diese Maßnahmen jedoch nicht vom Bordnetzmanagement gesteuert werden, sondern sie muss direkt in der Komponente implementiert werden. Hierfür wird eine lokale Spannungsmessung, die bei den meisten Verbrauchern bereits vorhanden ist, sowie eine Auswerte- und Ansteuerlogik benötigt. Bei dem Erreichen eines festgelegten unteren Schwellwertes wird der Verbraucher abgeschaltet und bei einem festgelegten oberen Schwellwert wird der Verbraucher wieder zugeschaltet. Eine Schalthysterese ist notwendig, um ein Prellen des Schalters zu vermeiden.

## 9.4 Anpassung der Batteriedynamik

Die Dynamik von Batterien hängt von mehreren Faktoren ab, die in [Hop10], [Rop07] und [Run74] ausführlich erläutert werden. Durch die Auswahl einer Batterie mit besseren dynamischen Eigenschaften kann der wahrnehmbare Bereich im  $I$  $Q$ -Diagramm in Richtung des unzulässigen Bereichs vergrößert werden (Abbildung 9.9).

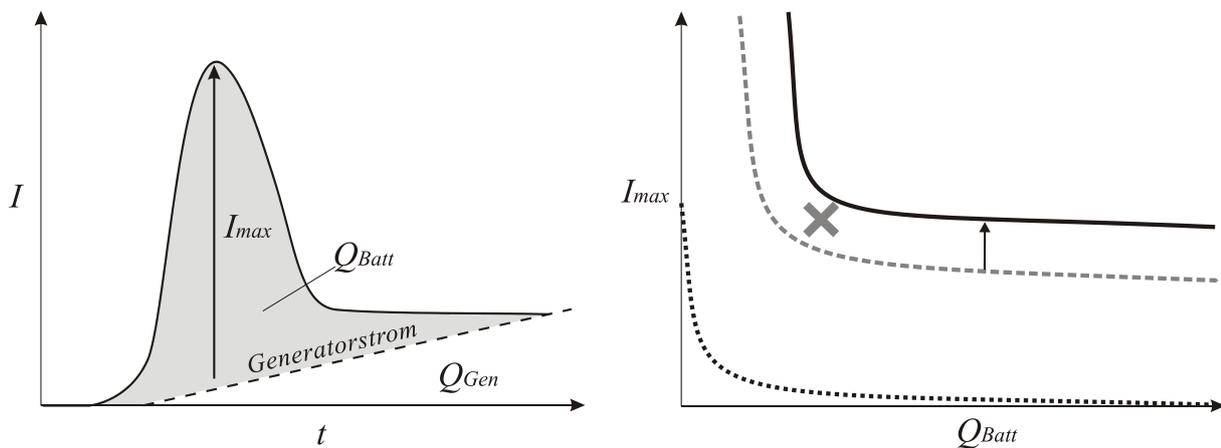


Abbildung 9.9 Anpassung des IQ-Diagramms durch Änderung der Batteriedynamik. Die Grenzlinie des wahrnehmbaren Bereichs wird nach oben hin verschoben. Das Lastdiagramm bleibt unverändert.

## 9.5 Anpassung der Generatordynamik

Die Anpassung der Generatordynamik kann über die Änderungen der Reglerparameter sowie durch Änderungen der Hardware erfolgen. Die Auswirkungen der beiden Maßnahmen sind ähnlich. Wie im Lastdiagramm in Abbildung 9.10 zu sehen ist, wird durch eine höhere Generatordynamik ein größerer Teil des Laststroms vom Generator abgedeckt.

Da die meisten Verbraucher die höchsten Ströme beim Zuschalten haben, wird durch diese Maßnahme im IQ-Diagramm zu einem größeren Teil die entnommene Ladungsmenge aus der Batterie reduziert als die maximale Stromamplitude.

### 9.5.1 Anpassung der Reglerdynamik

Die Begrenzung der Reglerdynamik erfolgt, wie bereits in Abschnitt 6.1.5 beschrieben wurde, in Abhängigkeit von der Drehzahl des Verbrennungsmotors. Die Stabilisierung der Spannung mit dieser Maßnahme kann demnach bei Bedarf auch in Abhängigkeit von der Drehzahl des Verbrennungsmotors erfolgen.

Nachteilig hierbei sind die höheren dynamischen Belastungen auf den Verbrennungsmotor. Jedoch darf nicht vergessen werden, dass die meisten Hochstromverbraucher durch die Elektrifizierung mechanischer und hydraulischer Systeme entstanden sind. Eine hydraulische Lenkunterstützung z.B. verursacht ebenfalls dynamische Belastungen des Verbrennungsmotors.

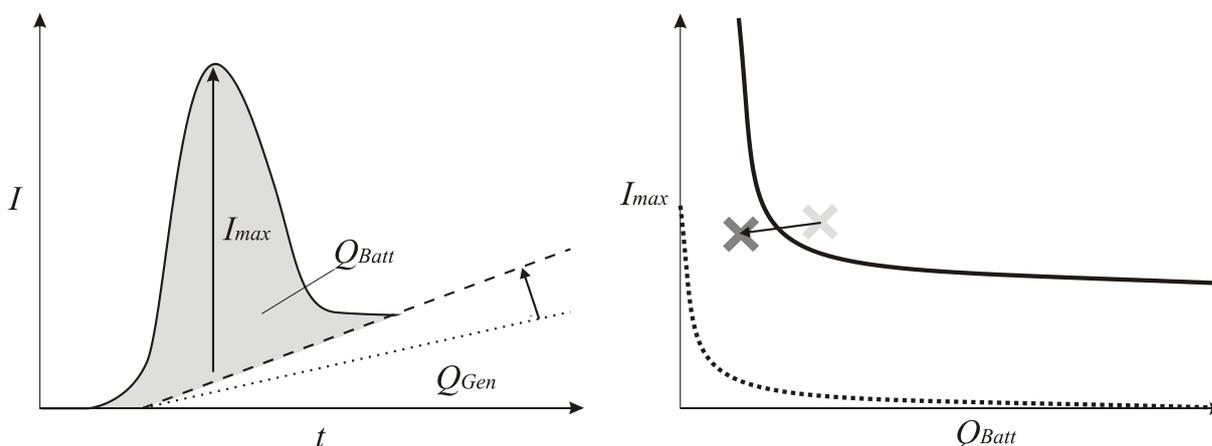


Abbildung 9.10 Anpassung des Lastdiagramms durch Änderung der Generator- und Reglerdynamik. Die Verschiebung der charakteristischen Koordinaten im IQ-Diagramm erfolgt hauptsächlich durch Änderung der Ladungsmenge.

### 9.5.2 Anpassung der Maschinendynamik

Wie in Abschnitt 6.1.4 bereits näher erläutert wurde, kann eine Erhöhung der Maschinendynamik durch die Auswahl eines größeren Generators erreicht werden. Bei der Bordnetzauslegung kann somit als spannungsstabilisierende Maßnahme ein größerer Generator mit einer höheren Dynamik in Betracht gezogen werden, obwohl er für eine positive Ladebilanz nicht zwingend notwendig wäre.

Bei der Auswahl eines größeren Generators sind als Nachteile die höheren Kosten, das zusätzliche Gewicht und die höheren dynamischen Belastungen auf den Verbrennungsmotor zu nennen. Da hierbei die negativen Auswirkungen auf das Gesamtsystem größer sind als bei der Anpassung der Reglerdynamik, macht diese Maßnahme erst Sinn, wenn die Anpassung der Reglerdynamik an ihre Grenzen stößt.

## 9.6 Optimierung der Bordnetztopologie

Moderne Bordnetze besitzen eine große Anzahl von Verbrauchern mit teilweise sehr unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften. Zur Erhöhung der Robustheit von Bordnetzen gegenüber Spannungsschwankungen kann eine Optimierung der Bordnetztopologie durchgeführt werden. Hierfür empfiehlt es sich z.B. Verbraucher mit großen Strömen und hochdynamischen Verhalten weit entfernt von sensitiven Verbrauchern anzuschließen. Durch eine duale Versorgung der Verteilerblöcke im Fahrzeug, wie in Abbildung 9.11 dargestellt, und die Trennung sensitiver Verbraucher und Hochstromverbraucher werden gemeinsame Spannungsabfälle auf den Versorgungsleitungen verhindert. Diese Maßnahme wirkt sich auf die sensitiven Verbraucher im Bordnetz aus.

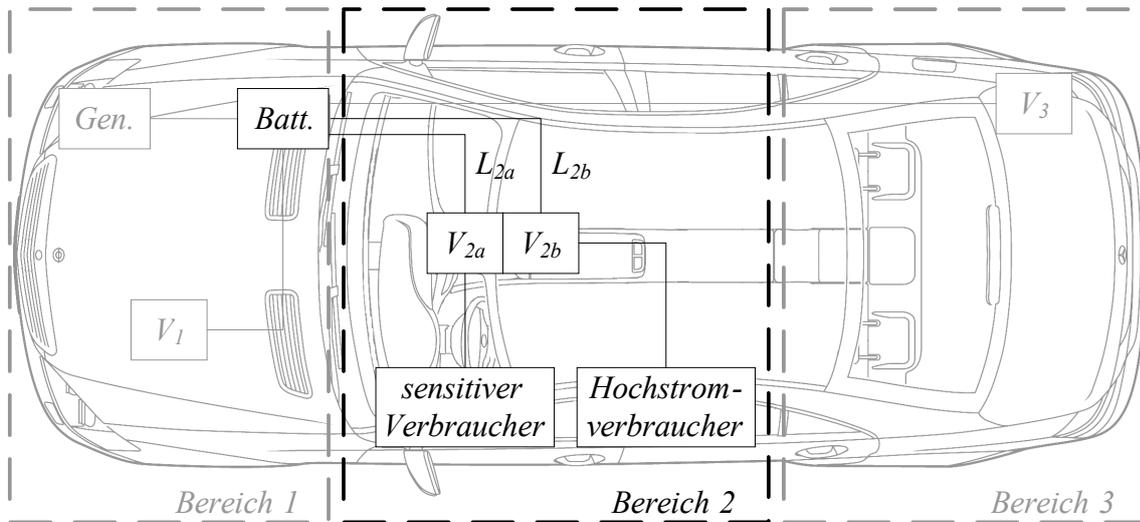


Abbildung 9.11 Duale Versorgung eines Verteilerpunktes zur Stützung von sensitiven Verbrauchern durch die Trennung der Versorgungsleitungen.

Um durch die Optimierung der Bordnetztopologie auch das Spannungsniveau der Hochstromverbraucher zu erhöhen, sollte bei diesen Verbrauchern auf einen niederohmigen Anschluss an die dynamische Energiequelle, was im herkömmlichen Bordnetz die Batterie ist, geachtet werden. Hierdurch werden die Spannungsabfälle auf den Übertragungswegen, die auf Grund der hohen Ströme relativ große Werte annehmen können, gering gehalten. Da viele Systeme einen festen Bauraum im Fahrzeug haben, muss auch die Platzierung der Energiequellen im Fahrzeug berücksichtigt werden. Wie bereits im vorherigen Absatz erwähnt, sollten dynamische Energiespeicher in der Nähe der Hochstromverbraucher untergebracht werden.

In Abbildung 9.12 sind die Auswirkungen dieser Maßnahmen im IQ-Diagramm dargestellt. Durch beide Maßnahmen wird der Robustheitsabstand bzw. der Spannungsabfall über die Versorgungsleitungen verkleinert. Im IQ-Diagramm vergrößert sich dadurch der zulässige Bereich. Das Lastdiagramm wird hierdurch nicht beeinflusst.

### 9.7 Optimierung der Betriebsstrategien von Hochstromverbrauchern

Durch die Vernetzung vieler Systeme im Fahrzeug ist es möglich, die Betriebsstrategien von Verbrauchern aufeinander abzustimmen. Z.B. kann bei zeitunkritischen Verbrauchern das Zuschalten angekündigt werden, um bei anderen zeitunkritischen Verbrauchern das gleichzeitige Zuschalten zu verhindern. Zeitunkritische Verbrauchern sind hierbei z.B. Systeme mit Energiespeichern, wozu u.a. der Luftfederkompressor, der einen Druckspeicher füllt, zählt.

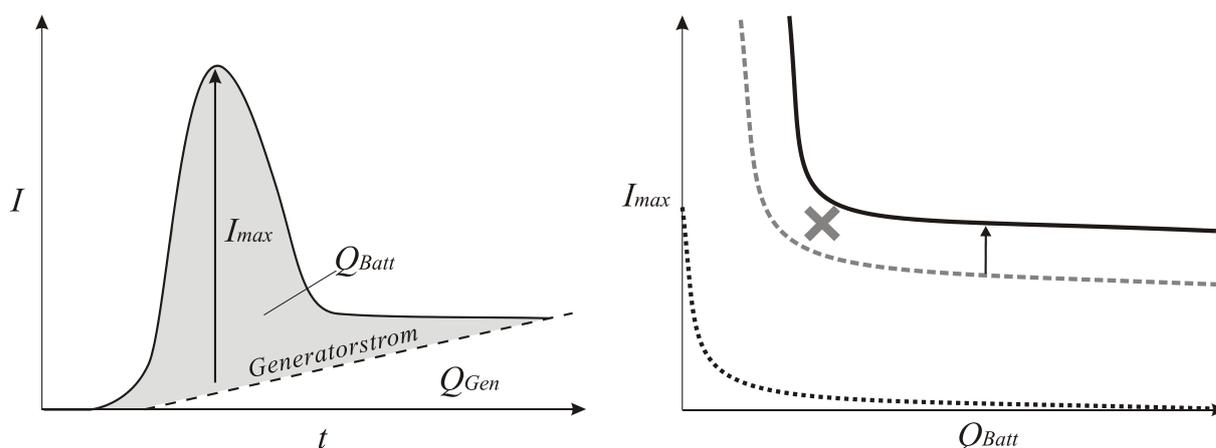


Abbildung 9.12 Anpassung des IQ-Diagramms durch Optimierung der Bordnetztopologie. Die Grenzlinie des wahrnehmbaren Bereichs wird nach oben hin verschoben, da sich Spannungsabfall über die Versorgungsleitungen verkleinert. Das Lastdiagramm bleibt unverändert.

Durch solche Maßnahmen können zeitgleiche Schaltvorgänge und somit Überlagerungen von Stromprofilen verhindert werden. Im Lastdiagramm in Abbildung 9.13 sind die Auswirkungen dieser Maßnahme dargestellt. Das ursprüngliche Stromprofil wird in zwei Stromprofile aufgeteilt. Im zugehörigen IQ-Diagramm entstehen aus den charakteristischen Koordinaten des ursprünglichen Stromprofils zwei neue Koordinatenpaare, deren einzelne Auswirkungen unkritischer sind. In der Realität würden die beiden neuen Stromprofile nicht wie hier dargestellt gleichzeitig, sondern zeitlich versetzt auftreten.

### 9.8 Maßnahmen durch das Bordnetzmanagement

Mit dem Bordnetzmanagement können nur indirekt spannungsstabilisierende Maßnahmen umgesetzt werden. Die Reaktionszeit des Bordnetzmanagements ist durch die relativ langsamen Kommunikationssysteme, wie z.B. der CAN-Bus, zu träge, um Spannungseinbrüchen entgegen zu wirken. Jedoch besteht die Möglichkeit, durch prädiktive Maßnahmen Spannungseinbrüchen vorzubeugen. Im Folgenden werden das Lastmanagement und das Vorspannen des Generators als prädiktive Maßnahmen vorgestellt.

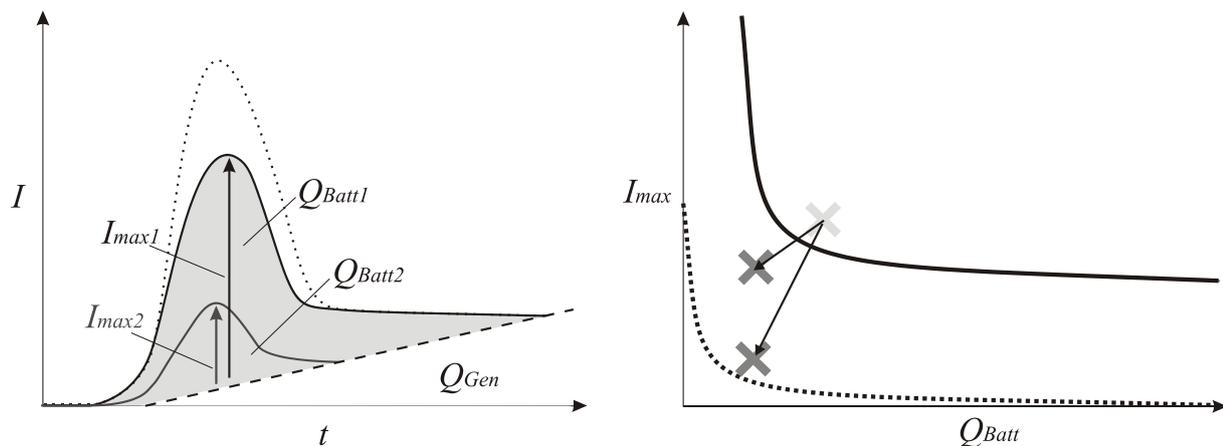


Abbildung 9.13 Anpassung des Lastdiagramms durch die Optimierung der Betriebsstrategien von Verbrauchern. Überlagerungen von Stromprofilen werden verhindert. Im IQ-Diagramm ergeben sich aus den ursprünglichen charakteristischen Koordinaten zwei neue Koordinaten mit jeweils kleineren Werten.

### 9.8.1 Vorhalten von Leistungsreserven des Generators

Generatoren in aktuellen Fahrzeugentwicklungen werden, wie bereits in Abschnitt 2.3.3 erwähnt, nicht auf den maximal benötigten Strom im Bordnetz ausgelegt, sondern auf einen niedrigeren Strom, der sich unter anderem aus Ladebilanzsimulationen ergibt. Daher kann es beim Betrieb des Fahrzeugs zu Situationen kommen, bei denen der Generator zu 100 % ausgelastet ist. Die Batterie muss auch bei diesen statischen Zuständen den zusätzlich benötigten Strom liefern.

Mit dem Bordnetzmanagement hat man die Möglichkeit, Verbraucher aktiv zu steuern. So können z.B. Verbraucher abgeschaltet werden, wenn erkannt wird, dass der Generator nicht mehr genügend Leistungsreserven hat. Vorzugsweise werden hierbei Verbraucher gewählt, deren Abschaltungen vom Fahrzeugnutzer nicht direkt wahrnehmbar sind (z.B. Heizelemente). Die hier beschriebene Funktion des Bordnetzmanagements wird auch Lastmanagement bezeichnet. Im Lastdiagramm in Abbildung 9.14 wird die Charakteristik des Generatorstroms durch ausreichende Leistungsreserven veranschaulicht. Im IQ-Diagramm bedeutet dies für ein Stromprofil mit dem dargestellten charakteristischen Verlauf, dass sich diese Maßnahme hauptsächlich auf die aus der Batterie zu entnehmende Ladungsmenge auswirkt. Durch diese Abschaltung von Komfortverbrauchern in kritischen Situationen kann die Funktionsverfügbarkeit von sicherheitsrelevanten Verbrauchern erhöht werden.

Eine weitere Möglichkeit, Leistungsreserven vorzuhalten, ist die Anhebung der Leerlaufdrehzahl des Verbrennungsmotors. Beim Erkennen einer zu hohen Auslastung des Generators im Leerlauf oder der Berechnung einer zu erwartenden, überhöhten

Auslastung im Leerlauf kann die Leerlaufdrehzahl angehoben werden. Gerade bei niedrigen Drehzahlen haben Änderungen der Drehzahl große Auswirkungen auf den maximalen Generatorstrom. Im Last- und IQ-Diagramm wirkt sich diese Maßnahme genauso aus wie das Lastmanagement.

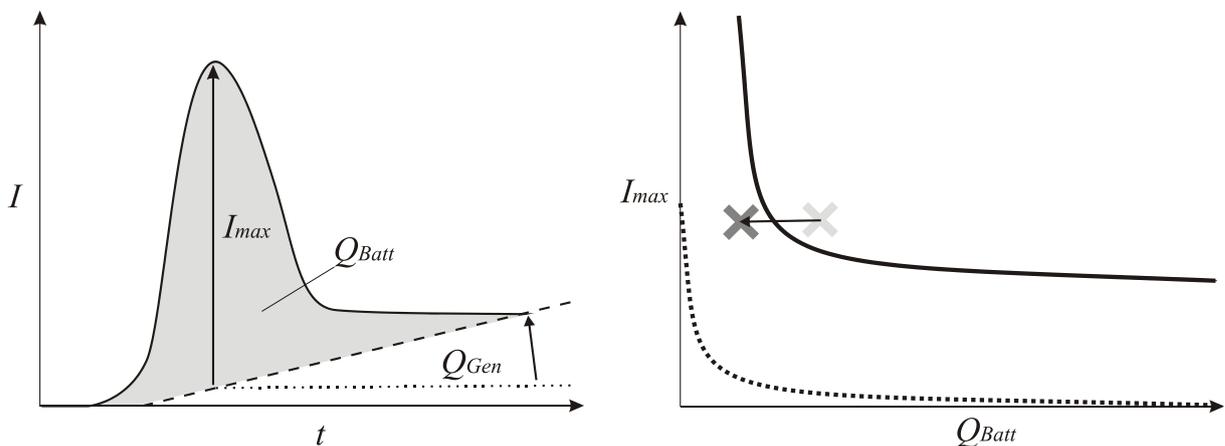


Abbildung 9.14 Anpassung des Lastdiagramms durch das Lastmanagement. Der Generator wird so betrieben, dass Leistungsreserven zur Verfügung stehen. Im IQ-Diagramm hat dies hauptsächlich einen Einfluss auf die Ladungsmenge.

### 9.8.2 Vorsteuern des Generators

Eine weitere Möglichkeit der prädiktiven Spannungsstabilisierung im Bordnetz ist das Vorsteuern des Generators. Durch das Anheben der Bordnetzspannung ergeben sich ein höherer Ladestrom der Batterie sowie höhere Ströme der ohmschen Verbraucher im Bordnetz. Der Generator gibt somit eine dementsprechend höhere Leistung ab. Wird nun ein Hochstromverbraucher aktiv, der zum Absinken der Spannung führt, wird der zusätzliche Strom durch das niedrigere Spannungsniveau zum Hochstromverbraucher umgeleitet. Diese Maßnahme setzt jedoch voraus, dass die Aktivität von Hochstromverbrauchern angekündigt wird. Ein Beispiel hierfür ist das vorausschauende Sicherheitssystem *Pre-Safe*. Beim Erkennen einer Gefahrensituation kann zeitgleich die Generatorspannung angehoben werden, um die bevorstehende Belastung des Bordnetzes zu mindern.

Im Lastdiagramm in Abbildung 9.15 ist der durch diese Maßnahme erhöhte Generatorstrom mit  $I_{Gen+}$  gekennzeichnet. Im IQ-Diagramm werden die charakteristischen Koordinaten des Stromprofils in den Werten des Stroms und der Ladungsmenge verringert.

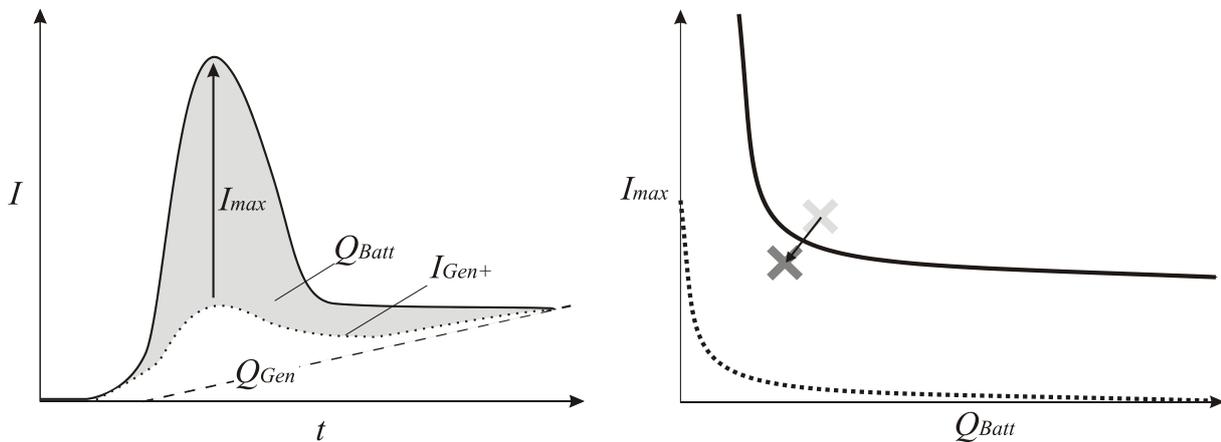


Abbildung 9.15 Anpassung des Last- und IQ-Diagramms durch Vorsteuern des Generators. Ein Teil des zuvor zum Laden der Batterie verwendeten Stroms wird dem Verbraucher zur Verfügung gestellt, sobald die Spannung absinkt.

## 9.9 Inselnetzbildung

In manchen Situationen kann es von Vorteil sein, Teile des Gesamtsystems abzukoppeln. Hierfür ist es notwendig, dass nach der Entkopplung jeder Teil des Systems eine eigene Energieversorgung besitzt. Diese können dann speziell auf die Anforderung der in den einzelnen Inseln enthaltenen Komponenten angepasst werden. Die Entkopplung kann über Bauteile, die eine Schalt- oder Diodenfunktion haben, realisiert werden. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 9.16 eine Inselnetzbildung schematisch dargestellt.

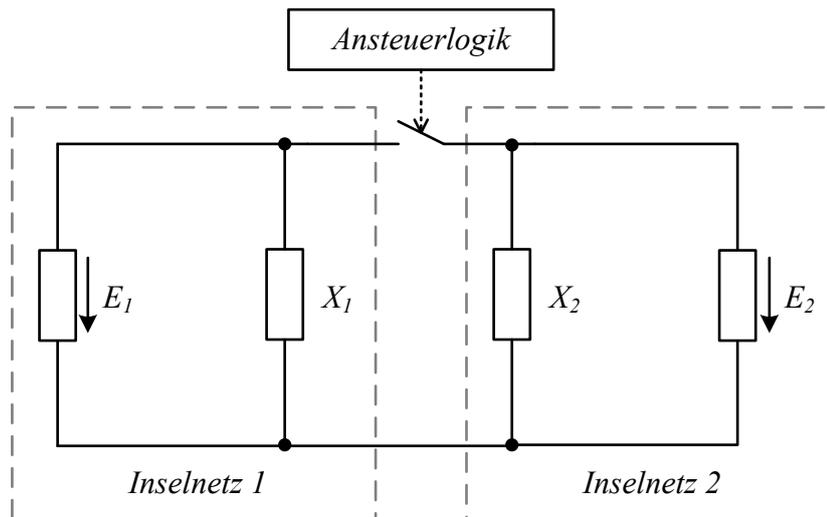


Abbildung 9.16 Schematische Darstellung einer Inselnetzbildung mit den Energiequellen  $E_1$  und  $E_2$  sowie den Lasten  $X_1$  und  $X_2$ .

Das Lastdiagramm ändert sich durch diese Maßnahme nicht. Das IQ-Diagramm hingegen muss für jedes Inselnetz neu bestimmt werden. In Abbildung 9.17 ist eine beispielhafte Aufteilung der IQ-Diagramme dargestellt, bei der das Inselnetz 1 die sensitiven Verbraucher enthält und im Inselnetz 2 nur noch elektrisch robuste Verbraucher enthalten sind. Hierdurch kann eine deutliche Verschiebung der einzelnen Bereiche des IQ-Diagramms erfolgen.

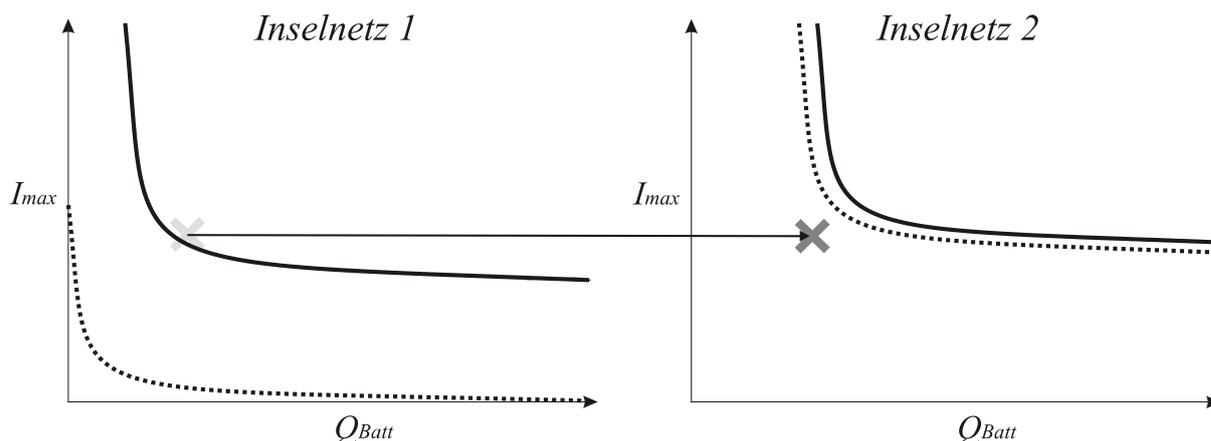


Abbildung 9.17 Aufteilung des IQ-Diagramms bei Inselnetzbildung. Für jedes Inselnetz zählt nur das zugehörige IQ-Diagramm. In diesem Beispiel gibt es im Inselnetz 2 einen größeren verträglichen Bereich, in dem der beispielhafte Verbraucher nach der Aufteilung liegt.

Als beispielhafte Anwendung für diese Maßnahme kann der Startvorgang des Verbrennungsmotors genannt werden. Speziell beim Einsatz der Stopp/Start Funktionalität verliert der Starter seinen Sonderstatus als Verbraucher. Im Unterschied zu Fahrzeugen ohne die Stopp/Start Funktion darf der Startvorgang hierbei nicht durch die elektrischen Systeme für den Kunden wahrnehmbar sein.

### 9.10 Einsatz hochdynamischer Energiespeicher

Hochdynamische Energiespeicher sind nicht dafür geeignet, die Batterie im Fahrzeug zu ersetzen. Sie können als Zusatzspeicher eingesetzt werden und zeichnen sich durch eine extrem schnelle Energiebereitstellung aus. Hochdynamische Energiespeicher für den Einsatz in Fahrzeugen können beispielsweise Doppelschichtkondensatoren oder Rotationsspeicher sein. Zu beachten ist beim Einsatz dieser Speicher, dass durch den begrenzten Spannungsbereich im Bordnetz nur ein kleiner Teil der Kapazität ausgenutzt werden kann. In Abbildung 9.18 sind am Beispiel eines Doppel-

schichtkondensators und einer Bleibatterie die unterschiedlichen Lade- und Entladecharakteristiken dargestellt. Hierdurch wird der geringe Ausnutzungsgrad des Doppelschichtkondensators verdeutlicht.

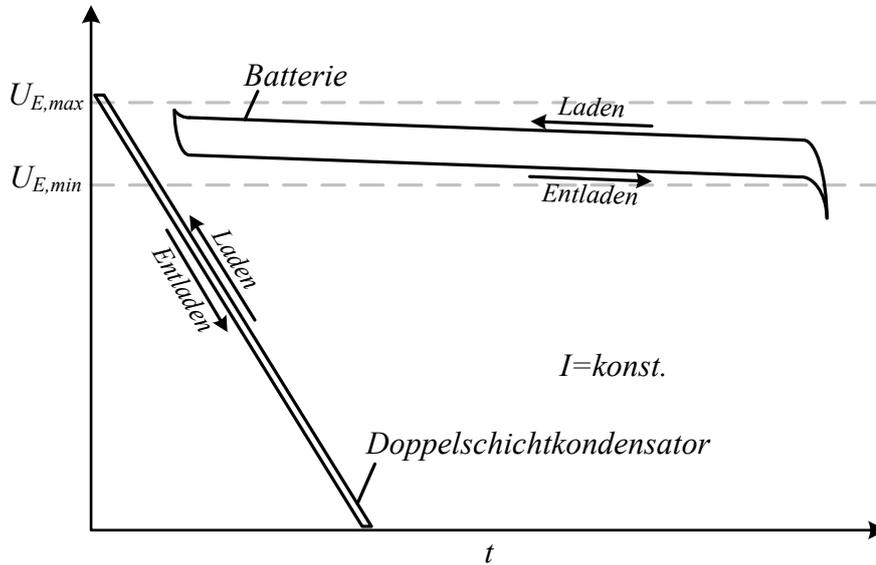


Abbildung 9.18 Darstellung der unterschiedlichen charakteristischen Spannungsverläufe von Batterien und Doppelschichtkondensatoren beim Laden und Entladen mit konstantem Strom.

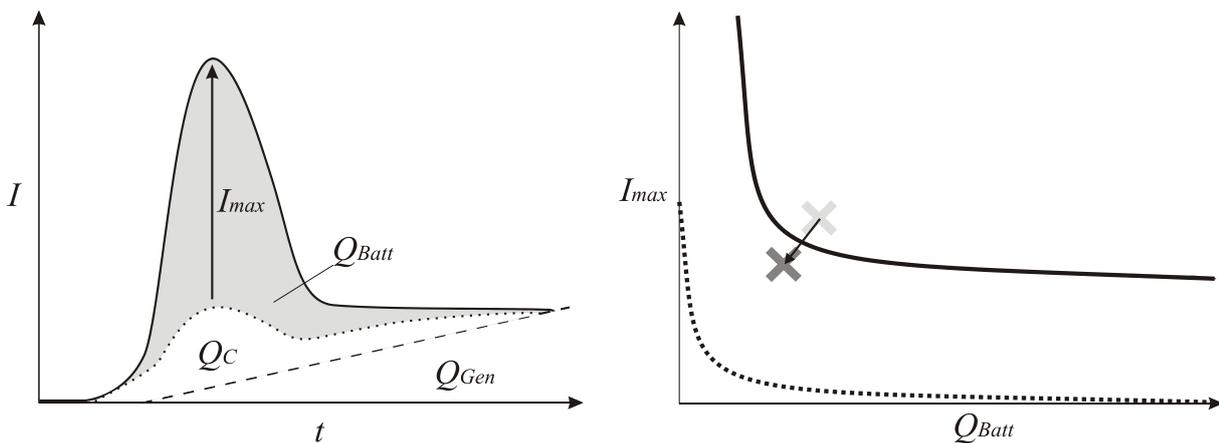


Abbildung 9.19 Verschiebung der charakteristischen Koordinaten des Verbrauchers im IQ-Diagramm durch den Einsatz von Doppelschichtkondensatoren. Durch diese Maßnahme werden der Maximalstrom und die Ladungsmenge verkleinert.

Im Lastdiagramm in Abbildung 9.19 ist der zusätzlich Strom, der vom Energiespeicher bei einem Spannungseinbruch geliefert wird, eingezeichnet. Die charakteristischen Koordinaten des Stromprofils verringern sich hierdurch im maximalen Strom und der aus der Batterie entnommenen Ladungsmenge.

Doppelschichtkondensatoren mit einer maximalen Spannung, die etwas über der Bordnetzspannung liegt (z.B. 16 V), können zur Stabilisierung direkt vor kritische Verbraucher geschaltet werden. Spannungsspitzen können hierdurch gedämpft und kleine Spannungseinbrüche können ausgeglichen werden.

### 9.11 Einsatz von Energiewandlersystemen

Ein Energiewandlersystem besteht aus dem Energiewandler und einem Energiespeicher. Als Energiespeicher eignen sich hierfür hochdynamische Speicher wie sie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt worden sind. Der Vorteil im Gegensatz zum alleinigen Einsatz von hochdynamischen Energiespeichern ist, dass das Spannungsniveau am Ausgang des Energiewandlersystems konstant gehalten werden kann. Das heißt, die Kapazitäten der verwendeten Energiespeicher können nahezu vollständig ausgenutzt werden. Als Energiewandler werden hier bidirektionale Spannungswandler eingesetzt. Der prinzipielle Aufbau eines solchen Systems ist in Abbildung 9.20 dargestellt.

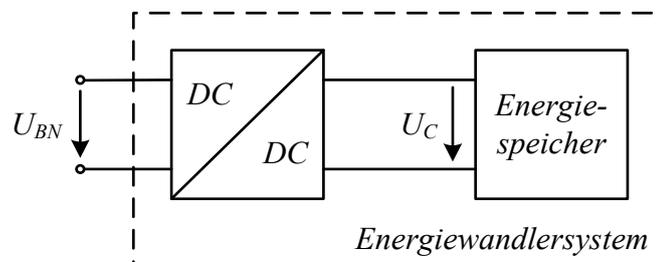


Abbildung 9.20 Prinzipieller Aufbau eines Energiewandlersystems, bestehend aus einem DC/DC-Wandler und einem Energiespeicher.

Im Lastdiagramm hat der von diesem System abgegebene Strom eine konstante maximale Amplitude, solange genügend Energie im Energiespeicher ist. Die maximale Stromamplitude ist abhängig vom Aufbau des Spannungswandlers und den thermischen Grenzen der Bauteile. Im IQ-Diagramm kommt es auch bei dieser Maßnahme zu einer Verschiebung der charakteristischen Koordinaten in beide Achsrichtungen (Abbildung 9.21).

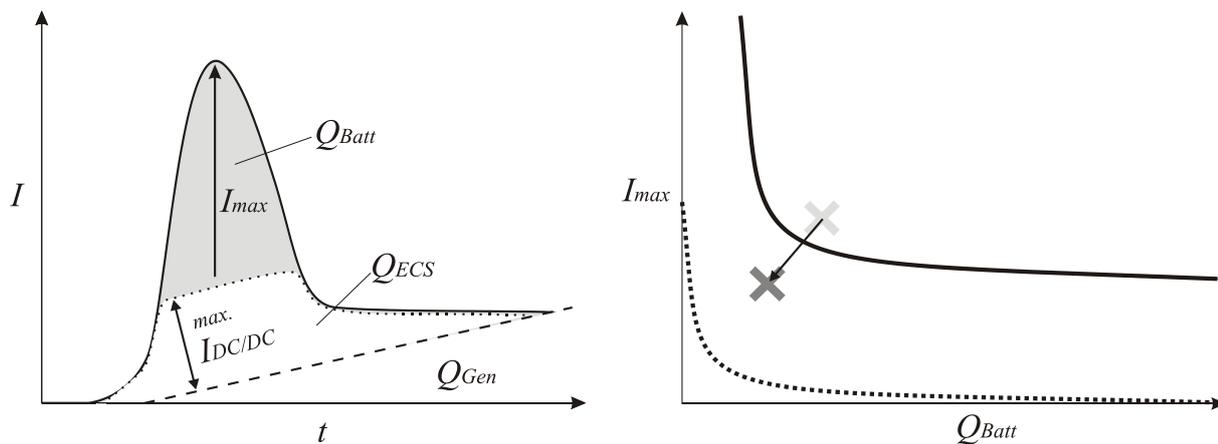


Abbildung 9.21 Verschiebung der charakteristischen Koordinaten des Verbrauchers im IQ-Diagramm durch den Einsatz eines Energiewandlersystems. Durch diese Maßnahme werden der Maximalstrom und die Ladungsmenge verkleinert.

Energiewandlersysteme können wie auch die hochdynamischen Energiespeicher zur Stützung einzelner Komponenten eingesetzt werden. Bei entsprechender Auslegung kann ein solches System jedoch auch das gesamte Bordnetz stützen.

### 9.12 Gegenüberstellung der Maßnahmen

Die Gegenüberstellung der zuvor beschriebenen Maßnahmen in Tabelle 9.1 gibt einen Überblick über einige wichtige Eigenschaften der Maßnahmen. In dieser Übersicht werden die Orte, an denen die Maßnahmen eingreifen, die Wirkungsbereiche im IQ-Diagramm und das Maß der Wirkung gegenüber gestellt. Es bedeutet aber nicht, dass sich eine Maßnahme nicht rentiert, wenn das Maß ihrer Auswirkungen nur gering ist. Für die Rentabilität müssen neben dem Nutzen auch die Kosten berücksichtigt werden. Für die Implementierung im Fahrzeug ist zusätzlich auch noch das Gewicht von Interesse. Eine Abschätzung der Kosten und des zusätzlichen Gewichts durch die einzelnen Maßnahmen macht an dieser Stelle jedoch keinen Sinn, da diese stark von der Dimensionierung der Maßnahmen abhängig sind.

Einige der aufgeführten Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung im Bordnetz verursachen keine Serienkosten. Die passive Komponentenstützung, die Auslegungsvorschriften für Komfortverbraucher, die optimierten Betriebsstrategien von Hochstromverbrauchern und die Maßnahmen durch das Bordnetzmanagement werden einmalig entwickelt, und sie müssen ggf. nur auf das jeweilige Bordnetz angepasst werden. Bei diesen Maßnahmen ist eine standardmäßige Umsetzung bei neuen Bordnetzentwicklungen sinnvoll, da keine zusätzlichen Kosten entstehen. Die Anpassung der

Generatordynamik über die Reglerparameter verursacht zwar auch keine Serienkosten, kann aber durch die Rückwirkungen auf den Verbrennungsmotor nicht in jedem Fahrzeug umgesetzt werden. Diese Maßnahme kann daher nicht standardmäßig umgesetzt werden.

Tabelle 9.1 Gegenüberstellung der Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung.

<b>Wirkungsprinzip</b>	<b>Eingriffsort</b>	<b>Wirkungsbereich</b>	<b>Wirkungsmaß</b>
Passive Komponentenstützung	Verursachende Verbraucher	$I_{max}$ und $Q_{Batt}$	Gering, da die Anzahl der in Frage kommenden Komponenten begrenzt ist.
Aktive Komponentenstützung	Betroffene Verbraucher	$U_{min,K}$	Hoch, für Verbraucher mit kleiner Leistung.
Auslegungsvorschriften für Komfortverbraucher	Verursachende Verbraucher	$I_{max}$ und $Q_{Batt}$	Hoch, jedoch ist die Anzahl der in Frage kommenden Komponenten begrenzt.
Anpassung der Batteriedynamik	Energieversorgung	$I_{max}$ und $Q_{Batt}$	Hoch, jedoch durch den vorhandenen Bauraum begrenzt.
Anpassung der Generatordynamik	Energieversorgung	Überwiegend $Q_{Batt}$	Mäßig, begrenzt durch Rückwirkungen auf den Verbrennungsmotor und den Bauraum.
Optimierung der Bordnetztopologie	Teilbordnetz	$I_{max}$ und $Q_{Batt}$	Abhängig vom Optimierungspotential.
Optimierte Betriebsstrategien von Hochstromverbrauchern	Verursachende Verbraucher	$I_{max}$ und $Q_{Batt}$	Hoch, jedoch ist die Anzahl der in Frage kommenden Komponenten begrenzt.
Maßnahmen durch das Bordnetzmanagement	Gesamtes Bordnetz	Überwiegend $Q_{Batt}$	Mäßig.
Inselnetzbildung	Teilbordnetz	$I_{max}$ und $Q_{Batt}$	Sehr hoch.
Einsatz hochdynamischer Energiespeicher	Energieversorgung	$I_{max}$ und $Q_{Batt}$	Hoch, bei entsprechender Dimensionierung.
Einsatz von Energiewandlersystemen	Energieversorgung	$I_{max}$ und $Q_{Batt}$	Sehr hoch, bei entsprechender Dimensionierung.

# *10 SYNTHETISCHER ANSATZ ZUR AUSLEGUNG VON KFZ- BORDNETZEN*

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen des Bordnetzes und den Untersuchungen der spannungsstabilisierenden Maßnahmen werden in diesem Kapitel vereint. Die Synthese der beiden Untersuchungen hat das Ziel, die am besten geeigneten Stützmaßnahmen für das untersuchte Bordnetz auszuwählen. Die vollständige Vorgehensweise dieses synthetischen Ansatzes zur Auslegung von Kfz-Bordnetzen ist in dem Ablaufdiagramm in Abbildung 10.1 dargestellt. Die hierfür benötigten Methoden und Verfahren wurden in dieser Arbeit vorgestellt. Für einen Teil der im Ablaufdiagramm enthaltenen Schritte wurden die Methoden und Verfahren bereits angewendet. Hierzu gehören alle Schritte zu den spannungsstabilisierenden Maßnahmen und die Analyse von Bordnetzen, wobei eine Erweiterung dieser durchgeführten Schritte für neue Projekte ggf. notwendig werden kann.

## *10.1 Auswahl geeigneter Stützmaßnahmen mit Anwendungsbeispiel*

In diesem Abschnitt wird vorausgesetzt, dass unter Verwendung der in Kapitel 6 durchgeführten Analyse und Modellierung der Bordnetzkomponenten ein Bordnetzmodell nach dem in Kapitel 5 vorgestellten Modellansatz erstellt wurde. Ebenso wird hier davon ausgegangen, dass der Maßnahmenkatalog aus Kapitel 9 vollständig ist. Nach dem Ablaufdiagramm in Abbildung 10.1 ist daher im Folgenden noch die Schleife aus Simulation, Bewertung, Auswahl einer geeigneten Stützmaßnahme und erneuter Modellierung durchzuführen, bis bei der Bewertung ein, nach den berücksichtigten Kriterien, optimal ausgelegtes Bordnetz gefunden wurde.

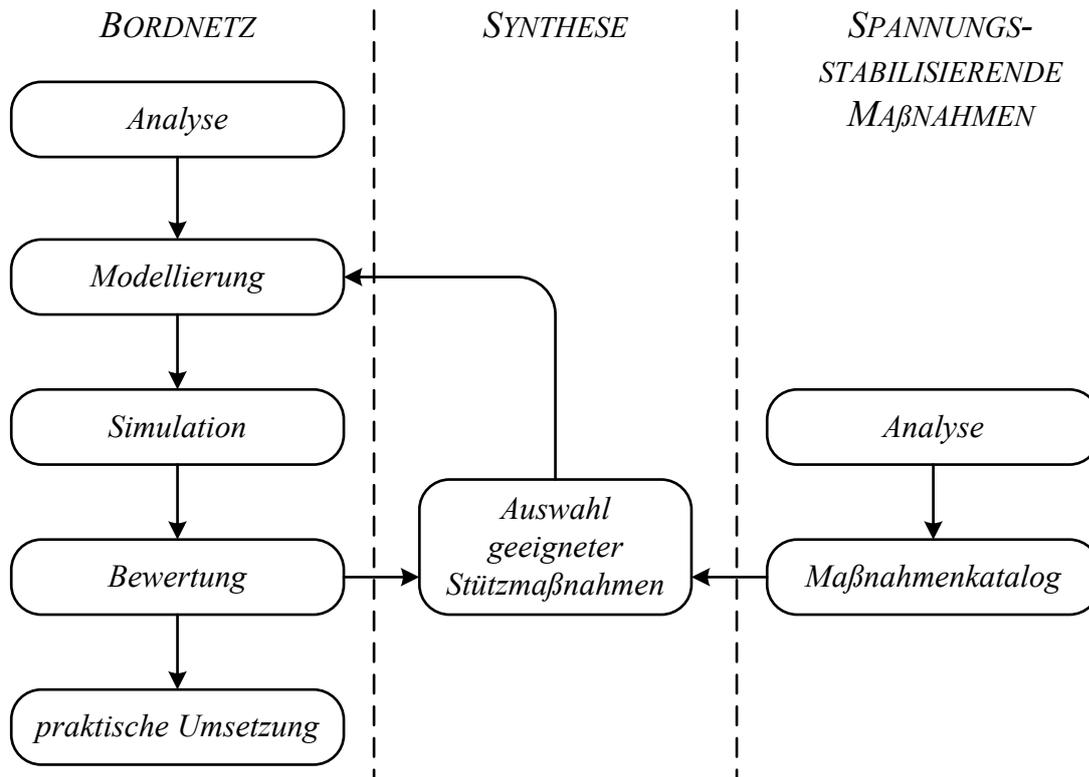


Abbildung 10.1 Ablaufdiagramm der Vorgehensweise zur Auslegung von Bordnetzen unter Berücksichtigung dynamischer Belastungsvorgänge.

Zunächst müssen die aus Szenarienauswahl hervorgehenden kritischen Szenarien untersucht werden. Für die beispielhafte Anwendung des Verfahrens wird hier angenommen, dass eine Kombination von Hochstromverbrauchern ermittelt wurde, die zu funktionsrelevanten Auswirkungen führen kann. Wären mehrere solcher Szenarien ermittelt worden, müsste die hier beschriebene Vorgehensweise auch für diese durchgeführt werden. In diesem Beispiel besteht die ermittelte Kombination der Verbraucher aus der el. Lenkung und dem el. Luftfederkompressor. Die topologische Anordnung dieser Verbraucher ist in Abbildung 10.2 dargestellt.

Eine detaillierte Bewertung muss an dieser Stelle nicht erfolgen, da Szenarien, die zu Funktionsausfällen führen können, immer verhindert werden müssen. Das Bordnetz kann in diesem Zustand somit direkt als „nicht akzeptabel“ bewertet werden.

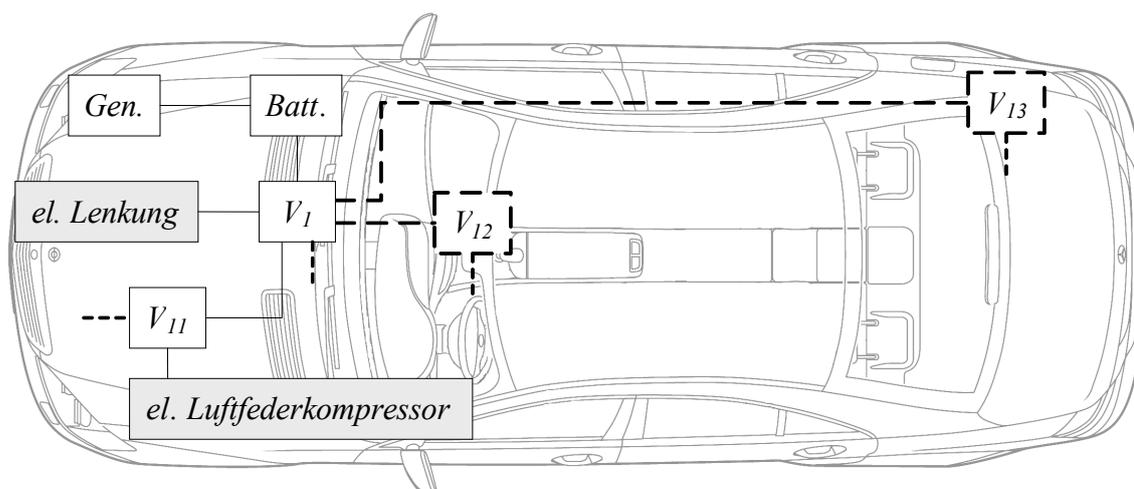


Abbildung 10.2 Topologische Anordnung der in diesem Beispiel betrachteten Hochstromverbraucher. Die el. Lenkung ist direkt am Hauptverteiler  $V_1$  angeschlossen. Der Luftfederkompressor ist über den Verteilerblock  $V_{11}$  am Hauptverteiler  $V_1$  angeschlossen.

Um aus dem Maßnahmenkatalog eine geeignete Stützmaßnahme auswählen zu können, muss bekannt sein, welche Eigenschaften diese haben muss. Hierfür wird wieder das IQ-Diagramm zur Hilfe genommen. In Abbildung 10.3 sind die aus der Simulation hervorgehenden charakteristischen Werte für diese Verbraucherkombination und die Grenzkennlinie der hierbei verwendeten Batterie dargestellt. Daneben ist die funktionsrelevante Grenzkennlinie der verwendeten Batterie für den in der Simulation angenommenen Batteriezustand eingezeichnet. Aus diesem Diagramm kann jetzt der Wirkungsbereich bestimmt werden, den die Stützmaßnahme haben sollte. In Abbildung 10.3 ist zu erkennen, dass hier eine Stützmaßnahme von Vorteil ist, die die entnommene Ladungsmenge aus der Batterie reduziert. Eine Maßnahme, die nur den Maximalstrom reduziert, müsste in diesem Beispiel ein deutlich größeres Wirkungsmaß haben. Für dieses Beispiel wird noch die Annahme gemacht, dass bei dem ermittelten Szenario der Generator bei Leerlaufdrehzahl betrieben wird. D.h. es kommen auch die Maßnahmen in Frage, die die Dynamik des Generators beeinflussen. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass die in Abschnitt 9.12 genannten Maßnahmen, die keine Serienkosten verursachen, bereits implementiert sind.

Durch eine Vorauswahl über die Charakteristik der Maßnahmen im IQ-Diagramm können Maßnahmen ausgeschlossen werden, aus deren Charakteristik nicht das benötigte Verhalten zu erkennen ist. In diesem Beispiel können auf Grund der Lage der charakteristischen Koordinaten der Verbraucherkombination hierdurch jedoch

keine Maßnahmen direkt ausgeschlossen werden. Es müssen also alle Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen geprüft werden.

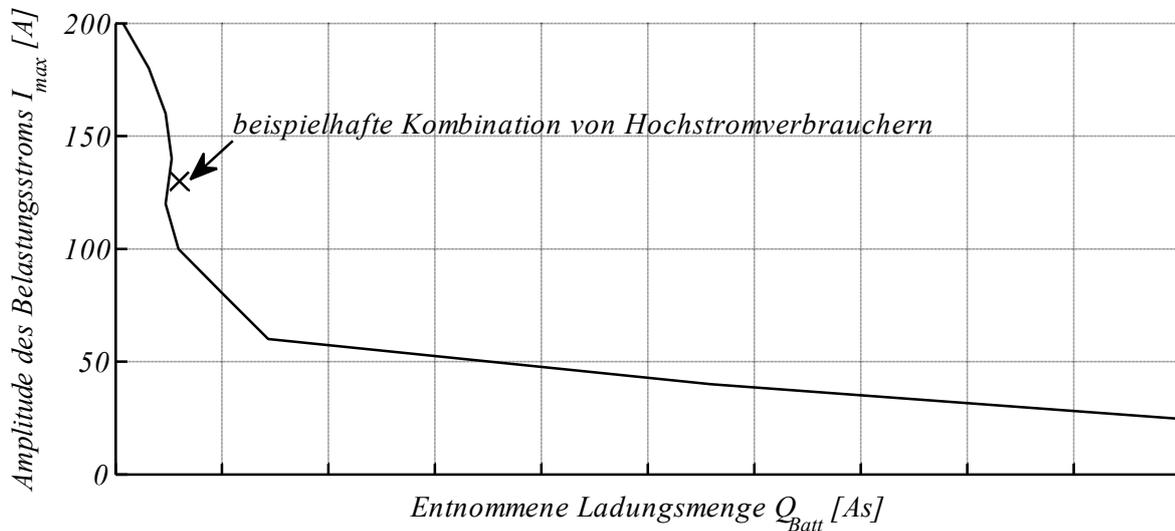


Abbildung 10.3 IQ-Diagramm mit den aus der Simulation ermittelten charakteristischen Koordinaten einer Kombination von Hochstromverbrauchern und der Grenzkennlinie der funktionsrelevanten Sensitivität der eingesetzten Batterie.

Nach der Dimensionierung und Modellierung der in Frage kommenden Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen wird deren Wirkung sowie deren Dimensionierung durch die erneute Simulation des Szenarios überprüft. Es wird angenommen, dass in diesem Beispiel folgende Maßnahmen so dimensioniert werden können, dass es zu keiner funktionsrelevanten Auswirkung mehr kommt:

- Anpassung der Batteriedynamik
- Anpassung der Generatordynamik (Regler)
- Inselnetzbildung
- Einsatz hochdynamischer Energiespeicher
- Einsatz von Energiewandlersystemen

Die Auswahl einer geeigneten Maßnahme erfolgt anhand der Anforderungen an das Bordnetz bzw. der Bewertung von Bordnetzarchitekturen nach Gleichung (2.2). Unter den Annahmen, dass die Kosten bei diesem Beispiel sehr hoch bewertet werden und dass höhere dynamische Belastungen des Verbrennungsmotors zugelassen werden, ist hier die am besten geeignete Maßnahme die Anpassung der Generatordynamik. Die Anpassung der Reglerparameter verursacht hierbei keine Serienkosten. Die in

Abschnitt 2.3.5 eingeführte Bewertungskenngröße  $k_B$ , dessen Wert angibt, in wie weit diese Architektur die Anforderungen an das Bordnetz erfüllt, wird dadurch relativ groß. Die Auswirkungen dieser Maßnahme im IQ-Diagramm ist in Abbildung 10.4 dargestellt.

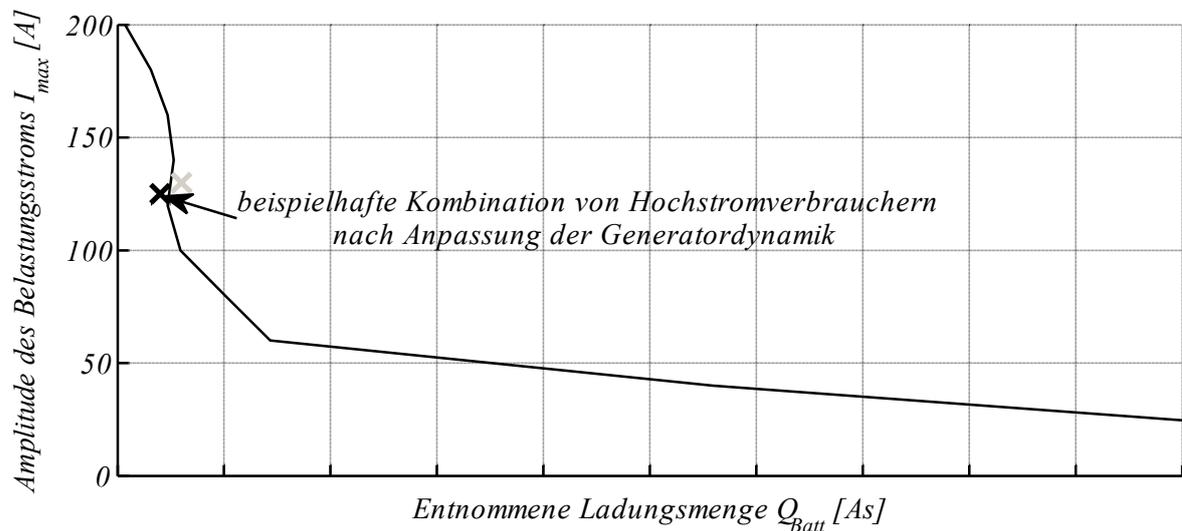


Abbildung 10.4 IQ-Diagramm mit den aus der Simulation ermittelten charakteristischen Koordinaten einer Kombination von Hochstromverbrauchern nach Anpassung der Generatordynamik und der Grenzkennlinie der funktionsrelevanten Sensitivität der eingesetzten Batterie.

Die charakteristischen Koordinaten der Verbraucherkombination konnten durch die Anpassung der Generatordynamik unter die Grenzkennlinie der funktionsrelevanten Sensitivität verschoben werden, ohne zusätzliche Serienkosten und Zusatzgewicht mit sich zu bringen.



# *11 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK*

Bei der Auslegung von Bordnetzen wurde den dynamischen elektrischen Großverbrauchern, die durch die zunehmende Elektrifizierung mechanischer und hydraulischer Komponenten entstehen, bislang nur wenig Beachtung geschenkt. Dies führt bei der Entwicklung von Bordnetzen zu späten Erkenntnissen, die Verzögerungen der Entwicklung und hohe Kosten zur Folge haben können.

In dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz zur Auslegung von Bordnetzen unter Berücksichtigung dynamischer Belastungsvorgänge gezeigt, der es ermöglicht, Bordnetze bereits in einer frühen Phase der Entwicklung auf diese neuen Anforderungen hin anzupassen. Hierbei wurden einige neue Methoden und Vorgehensweisen entwickelt, die im Folgenden angesprochen werden.

Zur Untersuchung dynamischer Belastungsvorgänge in Bordnetzen wurde ein modellbasierter Ansatz gewählt. Hierfür wurde eine speziell auf diese Anwendung angepassten Modellstruktur entwickelt. Auch die Modellierung der Komponenten erfolgte mit den benötigten Eigenschaften und der geforderten Genauigkeit. In diesem Zusammenhang entstand ein neuartiges Modell des Generators, das bisher nicht berücksichtigte Eigenschaften und Einflüsse abbildet.

Durch die Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse von Bordnetzen wurde bei der Klassifizierung der Verbraucher eine Methode entwickelt, über die „Hochstromverbraucher“ definiert werden können. Durch die Identifizierung dieser Verbraucher können über Aktivitäts- und Kombinationsmatrizen die kritischen Szenarien für das zu untersuchende Bordnetz ermittelt werden.

Die bei der Klassifizierung der Verbraucher verwendeten IQ-Diagramme haben sich auch bei der Analyse der spannungsstabilisierenden Maßnahmen als hilfreich erwiesen. Unter Verwendung dieser Diagramme wurde eine neue Methode zur

Visualisierung der charakteristischen Auswirkungen von Stabilisierungsmaßnahmen entwickelt.

Durch die Synthese der Untersuchungen von Bordnetzen und der Untersuchungen der Stabilisierungsmaßnahmen erfolgt die Anpassung der Bordnetze an die neuen Anforderungen. Dabei werden die am besten geeigneten Stützmaßnahmen für das jeweils untersuchte Szenario ermittelt. Das Vorgehen bei der Synthese basiert dabei wieder auf den in dieser Arbeit durchgängig verwendeten IQ-Diagrammen.

Der Ansatz in dieser Arbeit deckt einen Bereich der Bordnetzauslegung ab, dem bisher in der Praxis und in der Literatur nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde. In der Arbeit von [Jun05] wird eine ähnliche Problemstellung, jedoch für einen speziellen Anwendungsfall, behandelt. Im Vergleich zu der Arbeit von [Jun05], die sich auf die Integration der elektromagnetischen Ventilbetätigung in ein 42 V-Bordnetz konzentriert, wird hier eine allgemeine Vorgehensweise aufgezeigt, die die Auslegung von Bordnetze unter Berücksichtigung dynamischer Großverbraucher ermöglicht.

Diese Arbeit hatte das Ziel eine allgemeine Vorgehensweise zur Handhabung dieser Problemstellung zu erarbeiten. Hierfür wurde ein herkömmliches Bordnetz mit einer Batterie und einem Generator zu Grunde gelegt. Zukünftige Untersuchungen können diesen Ansatz nun auf neue Technologien, wie z.B. Lithium-Ionen Batterien und Hybrid-Fahrzeuge, erweitern. Auch die Aufnahme von Kennlinien für normgealterte Batterien, deren Zustände sich bei Fertigstellung dieser Arbeit noch in Abstimmung befunden haben, ist Teil der zukünftigen Weiterentwicklung und macht diesen Ansatz noch universeller.

# QUELLENVERZEICHNIS

- [Bec06] T. Becker: „*Simulation und Optimierung von Schaltvorgängen in Kfz-Bordnetzen.*“ Diplomarbeit, Daimler AG, 2006.
- [Ber86] D. Bernd, et al: „Bleiakkumulatoren.“  
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1986.
- [Bod06] H. Bode: „*MATLAB-SIMULINK – Analyse und Simulation dynamischer Systeme.*“  
Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006.
- [Boo99] G. Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobsen: „*The Unified Modeling Language User Guide.*“  
Addison-Wesley, Massachusetts, 1998.
- [Bos07] Robert Bosch GmbH: „*Autoelektrik Autoelektronik.*“  
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [Cie06] J. Cierullies: „*Auslegungs- und Bewertungsmetrik für die elektrische Energieversorgung von Kraftfahrzeugen.*“  
Shaker Verlag, Aachen, 2006.
- [Dai05] Daimler AG: „*Specification for LIN controlled regulator.*“  
Internes Dokument, Daimler AG, 2005.
- [Del06] F. Delsperger: „*Transmission Lines, Collection of equations.*“  
Script, FH Bern, 2006.

- [Geu93] W. Geuer: „*Untersuchungen über das Alterungsverhalten von Blei-Akkumulatoren.*“  
Aachener Beiträge des ISEA 6, Verlag Mainz, 1993.
- [Her02] H. Herberg: „*Elektronik – Einführung für alle Studiengänge.*“  
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2002.
- [Hoh08] M. Hohmann, C. Seitz, D. Grohmann: „*Multilayer Modellierung.*“  
Patent, Daimler AG, 2008.
- [Hoh09] M. Hohmann: „*Spannungsstabilisierende Maßnahmen in Kfz-Bordnetzen.*“  
Fachbeitrag, ATZ elektronik, Ausgabe 4/2009.
- [Hop10] M. Hopf: „*Impedanzbasiertes Verfahren zur Ladezustandsbestimmung von Blei-Akkumulatoren im Kraftfahrzeug.*“  
Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2010.
- [Jun05] C. Jung: „*Berichte aus der Elektrotechnik, Dynamische Wechselwirkungen im 42 V Bordnetz.*“  
Shaker Verlag, Aachen, 2005.
- [Kul08] M. Kull: „*Entstehung und Ausbreitung leitungsgeführter Störsignale in Kraftfahrzeugen.*“  
Shaker Verlag, Aachen, 2008.
- [Küp08] K. Küpfmüller, W. Mathis, A. Reibiger: „*Theoretische Elektrotechnik.*“  
Springer Verlag, Berlin, 2008.

- [Lun03] J. Lunze: *„Automatisierungstechnik – Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme.“*  
Oldenbourg Verlag, München, 2003.
- [Mey02] R. Meyer, H. Braun, R. Rehage, H. Weinmann: *„Generatoren und Starter.“*  
Robert Bosch GmbH, Gelbe Reihe, 2002.
- [Rei07] K. Reif: *„Automobilelektronik – Eine Einführung für Ingenieure.“*  
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [Rop07] C. Ropeter: *„Verhalten von Batterien bei impulsförmigen Strombelastungen unter Berücksichtigung des Skineffekts.“*  
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [Run74] W. Runge: *„Berechnung und Deutung des stationären und dynamischen Verhaltens von Bleiakumulatoren.“*  
Dissertation, RWTH Aachen, 1974.
- [Sch06] S. Schulte: *„Simulationsmethoden zur Analyse und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kraftfahrzeuggeneratoren.“*  
Shaker Verlag, Aachen, 2006.
- [Sch82] W. Schleuter: *„Zur Ermittlung des Ladezustands von Akkumulatoren.“*  
etzArchiv Bd.4 (1982) H.3, VDE-Verlag, Offenbach, 1982.
- [Sch88] H.-P. Schöner: *„Über die Auswertung des elektrischen Verhaltens von Bleibatterien beim Entladen und Laden.“*  
Dissertation, RWTH Aachen, 1988.
- [Sei08] C. Seitz: *„Entwicklung einer Umgebung zur automatischen Generierung effizienter Simulationsmodelle von Fahrzeugbordnetzen.“*

Diplomarbeit, Daimler AG, 2008.

- [Smi12] S. Smith: „*Søren Hjorth – Inventor of the dynamo-electric principle.*“  
Elektrotechnische Vereinigung, Kopenhagen, 1912.
- [Upp92] F. Uppenborn: „*Die Kraftübertragung Lauffen – Frankfurt a.M.*“  
Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 28 S.379-382, 1892.
- [Wal06] H. Wallentowitz, K. Reif: „*Handbuch Kraftfahrzeugelektrik.*“  
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2006.
- [Wör08] A. Wörmann: „*Korrelationsfindung zwischen Prüfstands- und Fahrzeugmessungen im Hinblick auf die Geräuschentwicklung von elektrischen Fensterhebermotoren.*“  
Diplomarbeit, Daimler AG, 2008.