

Untersuchung einer Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellen-Basis für Kfz-Bordnetze

Christian Teichert

Untersuchung einer Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellen-Basis für Kfz-Bordnetze



Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von Diplomingenieur Christian Teichert

geboren am 09.04.1977 in Wolfsburg

GENEHMIGT DURCH DIE FAKULTÄT FÜR ELEKTROTECHNIK UND INFORMATIONSTECHNIK

DER OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT MAGDEBURG

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus F. Hoffmann
Prof. Dr.-Ing. Igor W. Merfert

eingereicht am: 26. April 2012
Promotionskolloquium am: 27. September 2012

Für Nelli und Chiara

„Geh nicht immer auf dem vorgezeichneten Weg, der nur dahin führt, wo andere bereits gegangen sind.“

Alexander Graham Bell

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Leistungselektronik des Instituts für Elektrische Energiesysteme der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann danke ich herzlich für seine laufende Unterstützung bei fachlichen und formalen Fragen und die Übernahme des Erstgutachtens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Igor Merfert danke ich für die zahllosen konstruktiven Diskussionen und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus F. Hoffmann möchte ich Danksagen für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Des Weiteren gilt mein Dank allen Mitarbeitern der Institute IESY und IGET, der Werkstatt und allen Studenten, die im Rahme ihrer Diplom- und Studienarbeiten diese Arbeit unterstützt haben.

Besonders bedanken möchte ich mich in diesem Zusammenhang bei Herrn Dr. Reinhard Döbbelin und Dr. Wolfgang Fischer für die Unterstützung, Förderung und Betreuung.

Abschließend danke ich meiner gesamten Familie für die langjährige und vielfältige Unterstützung.

Calberlah, Oktober 2012

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsberatung in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Christian Teichert, Calberlah, Oktober 2012

Kurzfassung

Auf Grund stetig steigender Bordnetzleistungen ist die konventionelle Versorgung des Bordnetzes mit elektrischer Energie durch einen Klauenpolgenerator zukünftig möglicherweise nicht mehr ausreichend. Dadurch können Energiedefizite innerhalb des Bordnetzes auftreten, wodurch im Extremfall elektrische Komponenten nicht einwandfrei funktionieren. Dies führt zu Sicherheitsbeeinträchtigungen und Komforteinbußen.

Deshalb beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Untersuchung einer Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellen-Basis für Kfz-Bordnetze zur Unterstützung des Kfz-Bordnetzes mit elektrischer Energie. Ferner werden benötigte Energiemanagementstrategien und deren Bewertung bzw. Optimierung behandelt.

Im Anschluss an eine kurze Einleitung in die Thematik wird das Kfz-Bordnetz erläutert. Dabei wird im ersten Schritt das Standard-Kfz-Bordnetz — einschließlich Generator, Bleibatterie und Verbraucher — beschrieben. Anschließend wird eine Erweiterung des Bordnetzes durch eine Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellen-Basis und einen Doppelschichtkondensator erläutert. Dabei werden u. a. die Funktion und Aufbau der unterschiedlichen Energiewandler und -speicher erklärt. Des Weiteren werden auch für den Betrieb einer Brennstoffzelle und eines Doppelschichtkondensators in einem Kfz-Bordnetz benötigte Gleichspannungswandler — inklusive Halbleiterschalter — beschrieben.

Ein im Rahmen dieser Arbeit entstandenes Simulationsprogramm dient der theoretischen Untersuchung unterschiedlicher Kfz-Bordnetze. Dieses Programm ist in der Lage, elektrische Größen und Energieflüsse innerhalb des Bordnetzes zu berechnen. Des Weiteren können mit dem Programm unterschiedliche Bordnetztopologien und Energiemanagementstrategien miteinander verglichen und bewertet werden, um anschließend diese zu optimieren. Die Bewertung geschieht durch die Bestimmung eines Gütekriteriums, das aus einer mathematischen Funktion berechnet wird.

Die simulativ gewonnenen Ergebnisse wurden abschließend an einem ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Versuchstand zur Nachbildung eines Kfz-Bordnetzes verifiziert.

Zusammenfassend zeigt die vorliegende Arbeit eine interessante Lösung zur Unterstützung eines Kfz-Bordnetzes durch eine Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellen-Basis mit Energiemanagementstrategien und deren Optimierung.

Nomenklatur

Abkürzungen

APU	.....	Auxiliary Power Unit, Hilfsstromversorgung
D	.....	Diode
DSK	.....	Doppelschichtkondensator
H ₂	.....	Wasserstoff
H ₂ O	.....	Wasser
H ₂ SO ₄	.....	Schwefelsäure
O ₂	.....	Sauerstoff
Pb	.....	Blei
PbO ₂	.....	Bleioxid
PbSO ₄	.....	Bleisulfat
SOC _{Bat,Start}	.....	State of Charge, Ladezustand der Batterie zu Beginn der Simulation/Messung %
SOC _{Bat}	.....	State of Charge, Ladezustand der Batterie %
SOC _{Kon}	.....	State of Charge, Ladezustand des Kondensators %
T	.....	Transistor
Tr	.....	Transformator

Formelzeichen

α	.....	Durchtrittsfaktor
$\ddot{u}_{Achsgetriebe}$	.....	Übersetzungsverhältnis des Achsgetriebes
$\ddot{u}_{Getriebe}$	.....	Übersetzungsverhältnis des Getriebes
$\ddot{u}_{Motor-Generator}$	.....	Übersetzungsverhältnis zwischen Verbrennungsmotor und Generator
ΔG_O^0	.....	Freie Reaktionsenthalpie $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
ΔS	.....	Entropie $\frac{\text{J}}{\text{K}}$
η_{Ah}	.....	Amperestundenwirkungsgrad %
η_{Bat}	.....	Wirkungsgrad der Batterie %
$\eta_{BZ,mess}$	.....	Gemessener Brennstoffzellenwirkungsgrad %
$\eta_{BZ,th}$	.....	Theoretischer Brennstoffzellenwirkungsgrad %
$\eta_{BZ-Stack,mess}$	.....	Gemessener Brennstoffzellenwirkungsgrad eines Stacks %

η_C	Carnot'sche Wirkungsgrad	%
η_{Gen}	Wirkungsgrad des Generators	%
η_{LE}	Wirkungsgrad der Leistungselektronik	%
η_{LE}	Wirkungsgrad des Doppelschichtkondensators	%
$\eta_{Turbine,el}$	Elektrischer Wirkungsgrad der Mikroturbine	%
η_{VM}	Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors	%
η_{Wh}	Energiewirkungsgrad	%
\AA	Ångström	m
b	Tafelparameter	
C	Kapazität	$\frac{As}{V}, F$
$C_{100\%}$	Nominalkapazität der Batterie	Ah
$C_{Bat,ref}$	Kapazität der Referenzbatterie	Ah
C_{Bat}	Kapazität der Batterie	Ah
C_{entl}	Entnehmbare Kapazität	Ah
C_{lad}	Eingeladene Kapazität	Ah
$C_{verfügbar}$	Verfügbare Kapazität der Batterie	Ah
E	Energie	Ws
$e_{Bat,m}$	Batterieenergiedichte massebezogen	$\frac{Wh}{kg}$
$e_{Bat,V}$	Batterieenergiedichte volumenbezogen	$\frac{Wh}{m^3}$
E_{Bat}	Energiegehalt Batterie	Wh
E_{entl}	Energiemenge bei Entladung	Ws
$E_{Gen,max}$	Maximale Energie, die ein Generator in einer bestimmten Zeit wandeln kann	Wh
E_{Gen}	Energie, die der Generator in einer bestimmten Zeit wandeln kann	Wh
$E_{Kon,48V \rightarrow 12V}$	Energieinhalt Kondensator bei Entladung von 48V auf 12V	Wh
$E_{Kon,max}$	Maximaler Energieinhalt Kondensator	Wh
$e_{Kon,m}$	Kondensatorenergiedichte massebezogen	$\frac{Wh}{kg}$
$e_{Kon,V}$	Kondensatorenergiedichte volumenbezogen	$\frac{Wh}{m^3}$
E_{Kon}	Energiegehalt Kondensator	Ws
E_{lad}	Energiemenge bei Ladung	Ws
$E_{VM,spez}$	Spezifische Verbrennungsmotorenergie	Wh
E_{VM}	Verbrennungsmotorenergie	Wh
F	Faradaykonstante (96485,3)	$\frac{As}{mol}$
f	Frequenz	Hz
$H_{Kraftstoff}$	Heizwert des Kraftstoffes	$\frac{Wh}{l}$
$I_{Bat,s,input,max}$	Maximaler Eingangsstrom des Wandlers batterieseitig	A
$I_{Bat,s,output,max}$	Maximaler Ausgangsstrom des Wandlers batterieseitig	A
$I_{Bat,s}$	Strom des Wandlers batterieseitig	A
I_{Bat}	Batteriestrom	A
$I_{BZ,nen}$	Brennstoffzellennennstrom	A

$I_{BZ,s}$	Strom des Wandlers brennstoffzellenseitig	A
I_{BZ}	Brennstoffzellenstrom	A
$I_{Gen,max}$	Maximaler Generatorstrom	A
$I_{Gen,nen,ref}$	Referenzgeneratornennstrom	A
$I_{Gen,nen}$	Generatornennstrom	A
I_{Gen}	Generatorstrom	A
$I_{Kon,s,input,max}$	Maximaler Eingangsstrom des Wandlers doppelschichtkondensatorseitig	A
$I_{Kon,s,output,max}$	Maximaler Ausgangsstrom des Wandlers doppelschichtkondensatorseitig	A
I_{Kon}	Kondensatorstrom	A
j	Stromdichte	$\frac{A}{m^2}$
j_0	Austauschstromdichte	$\frac{A}{m^2}$
L	Induktivität	$\frac{Vs}{A}, H$
$l_{Radumfang}$	Umfang des Fahrzeugrades	m
$m_{Bat,ref}$	Masse Referenzbatterie	kg
m_{Bat}	Masse Batterie	kg
$m_{BZ,ref}$	Masse Referenzbrennstoffzelle	kg
m_{BZ}	Masse Brennstoffzelle	kg
$m_{Gen,ref}$	Masse Referenzgenerator	kg
m_{Kon}	Masse Kondensator	kg
n	Anzahl der ausgetauschten Elektronen	
n_L	Leerlaufdrehzahl	$\frac{1}{min}$
n_N	Anzahl Simulationsschritte	
n_N	Nenndrehzahl	$\frac{1}{min}$
$n_{Gen,max}$	Maximale Generatordrehzahl	$\frac{1}{min}$
$n_{Gen,min}$	Minimale Generatordrehzahl	$\frac{1}{min}$
n_{Gen}	Generatordrehzahl	$\frac{1}{min}$
$n_{Getriebe}$	Getriebedrehzahl	$\frac{1}{min}$
n_{Motor}	Verbrennungsmotordrehzahl	$\frac{1}{min}$
n_{Rad}	Drehzahl des Rades	$\frac{U}{min}$
p_i	Partialdrücke der an der Reaktion teilnehmenden Medien	bar
P_{Bat}	Batterieleistung	W
P_{BN}	Bordnetzleistung	W
$P_{BZ,ref}$	Referenzbrennstoffzellenleistung	W
P_{BZ}	Brennstoffzellenleistung	W
$P_{el,Gen}$	Elektrische Leistung des Generators	W
P_{Gen}	Generatorleistung	W
P_{Kon}	Doppelschichtkondensatorleistung	W
P_{Last}	Verbraucher-/Lastleistung	W
P_V	Verlustleistung	W
$Q_{Bat,100\%}$	Batterieladung bei vollständiger Ladung	As

Q_{Bat}	Batterieladung	As
$Q_{entnehmbare}$	Entnehmbare Batterieladung	As
R	universelle Gaskonstante (8,314472)	$\frac{J}{K \cdot mol}$
$R_{i,Bat}$	Innenwiderstand der Batterie	Ω
$R_{i,Kon}$	Innenwiderstand des Kondensators	Ω
r_{Ohm}	Flächenspezifischer Widerstand der Brennstoffzelle	$\Omega \cdot m^2$
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
T_O	Systemtemperatur	K
T_U	Umgebungstemperatur	K
U	Spannung	V
U_0	Potential 0	V
U_1	Potential 1	V
U_{Act}	Aktivierungsüberspannung	V
$U_{Bat,s}$	Spannung des Wandlers batterieseitig	V
U_{Bat}	Batteriespannung	V
U_{BN}	Bordnetzspannung	V
$U_{BZ,0}$	Leerlaufspannung der Brennstoffzelle	V
$U_{BZ,R}$	Ruheklemmspannung der Brennstoffzelle	V
$U_{BZ,s}$	Spannung des Wandlers brennstoffzellenseitig	V
$U_{BZ,th}$	Maximal erreichbare Spannung der Brennstoffzelle	V
$U_{BZ,Zelle}$	Spannung einer einzelnen Brennstoffzelle	V
U_{BZ}	Brennstoffzellenspannung	V
U_{BZ}	Brennstoffzellenstackspannung	V
U_{Conc}	Konzentrationsüberspannung	V
$U_{DSK,max}$	Maximale Doppelschichtkondensatorspannung	V
U_{Gen}	Generatorspannung	V
$U_{Kons,s}$	Spannung des Wandlers doppelschichtkondensatorseitig	V
U_{Kon}	Doppelschichtkondensatorspannung	V
U_{Ohm}	Spannungsabfall hervorgerufen durch den spezifischen Elektrolytwiderstand der Brennstoffzelle	V
U_{Quelle}	Quellenspannung der Batterie	V
V_{Bat}	Volumen Batterie	m^3
$v_{Fahrzeug}$	Fahrzeuggeschwindigkeit	$\frac{km}{h}$
V_{Kon}	Volumen Kondensator	m^3
$V_{Kraftstoff}$	Volumen Kraftstoff	l

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Ziel der Arbeit	3
1.2. Aufbau der Arbeit	5
2. Grundlagen — Stand der Technik	6
2.1. Das elektrische Bordnetz von Kraftfahrzeugen	6
2.2. Das konventionelle elektrische Bordnetz und seine Komponenten	7
2.2.1. Generator	7
2.2.2. Batterie	11
2.2.3. Elektrische Verbraucher	17
2.3. Das erweiterte elektrische Bordnetz und seine Komponenten	20
2.3.1. Brennstoffzelle	21
2.3.2. Doppelschichtkondensator	30
2.3.3. Optionale höhere Spannungsebene	35
2.4. Leistungselektronische Stellglieder	35
2.4.1. Grundlagen	35
2.4.2. Halbleiter-Leistungsbaulemente	36
2.4.3. Leistungselektronische Grundsaltungen	40
2.5. Fahrzyklen	43
2.5.1. EU NEFZ	43
2.5.2. USA FTP 72	43
2.5.3. USA FTP 75	43
2.5.4. USA SC 03 und USA US 06	45
2.5.5. USA HWFET	45
2.5.6. USA NYCC	47
2.5.7. USA UC	47
2.5.8. JAPAN 10 15 Mode	47
2.5.9. JAPAN JC08	47
2.5.10. WLTP	50
3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes	51
3.1. Modellierung der Komponenten des erweiterten elektrischen Bordnetzes	51
3.1.1. Fahrzeugparameter	52

Inhaltsverzeichnis

3.1.2.	Generator	53
3.1.3.	Batterie	54
3.1.4.	Lasten	58
3.1.5.	Brennstoffzelle	59
3.1.6.	Doppelschichtkondensator	59
3.2.	Simulationsoberfläche	62
3.3.	Potenzial der Hilfsstromversorgung	62
3.4.	Fahrzyklen im Vergleich	68
4.	Auslegung des Bordnetzes	70
4.1.	Architekturen des erweiterten elektrischen Bordnetzes	70
4.2.	Auswahl und Dimensionierung des Energiewandlers und -speichers im Standardbordnetz	71
4.3.	Auswahl und Dimensionierung der Energiewandler und -speicher im erweiterten Bord- netz	77
4.3.1.	Energiewandler	77
4.3.2.	Energiespeicher	79
4.4.	Auswahl und Auslegung der leistungselektronischen Wandler im erweiterten Bordnetz .	85
4.4.1.	Auswahl der leistungselektronischen Schaltung	86
4.4.2.	Auslegung der leistungselektronischen Wandler	89
4.5.	Extremstudie — vom Standardbordnetz zum Bordnetz ohne Generator und Batterie . . .	92
4.5.1.	Bordnetz mit Brennstoffzelle, Doppelschichtkondensator, Batterie und Generator	92
4.5.2.	Bordnetz mit Brennstoffzelle, Doppelschichtkondensator und Batterie	93
4.5.3.	Bordnetz mit Brennstoffzelle und Doppelschichtkondensator	93
5.	Energiemanagement	96
5.1.	Notwendigkeit und Kriterien eines Energiemanagements	96
5.1.1.	Analyse von Bordnetztopologien und Energiemanagements	96
5.2.	Energiemanagementstrategien	104
5.2.1.	Standardbordnetze ohne Energiemanagement	105
5.2.2.	Strategie 1: Erweitertes Bordnetz mit konstanter Brennstoffzellenleistung — Hoch- und Niederfahren in Abhängigkeit vom Ladezustand	106
5.2.3.	Strategie 2: Erweitertes Bordnetz mit veränderlicher Brennstoffzellenleistung in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie	108
5.2.4.	Strategie 3: Veränderliche Brennstoffzellenleistung in Abhängigkeit vom Lade- zustand mit Doppelschichtkondensator	112
6.	Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz	117
6.1.	Versuchsstand	117
6.1.1.	Aufbau	117
6.1.2.	Ansteuerplattform und Ausgabefenster	118

Inhaltsverzeichnis

6.2. Ergebnisse	123
6.2.1. Beispielmessung und Vergleich mit Simulationsergebnissen	123
6.2.2. Spannungsstabilisierung	125
6.2.3. Experimentelle Überprüfung einer Energiemanagementstrategie	126
7. Zusammenfassung und Ausblick	130
8. Literaturquellen	132
A. Anhang	145
A.1. Fahrzyklen	146
A.2. Lastzyklen	149
A.3. Fahrzeugdaten	150

1. Einleitung

In heutigen Kraftfahrzeugen ist schon jetzt eine Vielzahl an elektrischen Komponenten installiert und ihre Anzahl steigt kontinuierlich an (vgl. Abbildung 1.1). Zu ihnen zählen seit längerem nicht nur die Beleuchtung und ein elektrischer Starter, sondern auch eine große Anzahl an Komfort- und Sicherheitselementen sowie Komponenten, die für einen optimalen Betrieb des Fahrzeugs sorgen oder den Schadstoff- und CO₂-Ausstoß reduzieren. Diese Komponenten benötigen für ihren Betrieb elektrische Energie. In einem konventionellen Kraftfahrzeug wird diese durch einen Klauenpolgenerator zur Verfügung gestellt. Heutige Bordnetze weisen eine Spitzenleistung von durchschnittlich etwa 2kW auf, die von konventionellen Klauenpolgeneratoren in Verbindung mit einer Bleibatterie als elektrischer Energiespeicher ausreichend gedeckt werden kann. Zukünftig könnten Bordnetze eine Spitzenleistung von 6...7,5kW aufweisen (vgl. Abbildung 1.2).

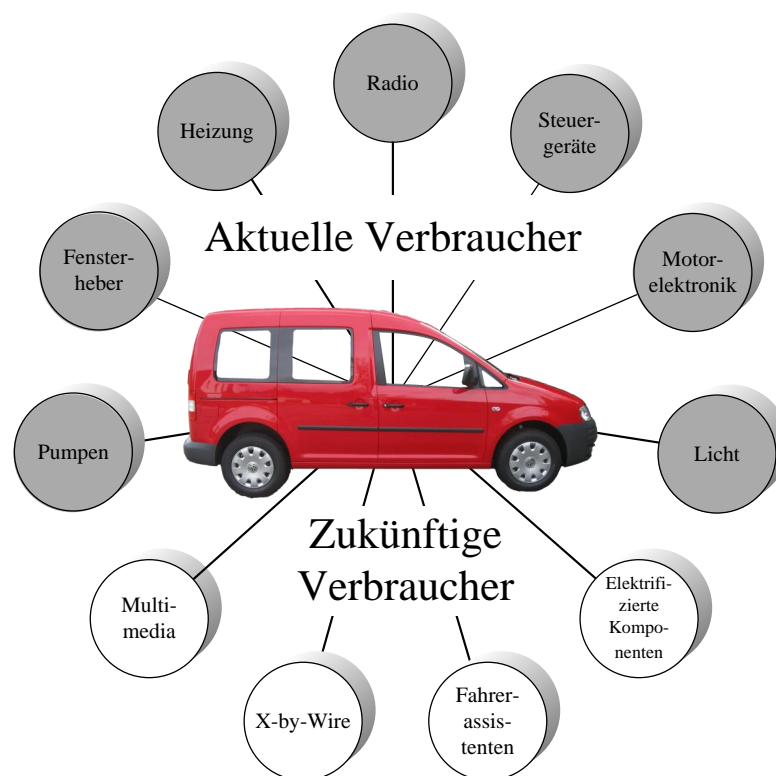


Abbildung 1.1.: Verbraucher in einem Kraftfahrzeug

Dieser Zuwachs an benötigter Energie resultiert aus neuen Komponenten, die Einzug in das Automobil halten werden. Dazu zählen z. B. weitere Infotainmentsysteme, wie sie in [1] beschrieben sind, und X-by-Wire-Komponenten. Weiterhin ist zu erwarten, dass bei Komponenten, die derzeit vom Verbrennungs-

1. Einleitung

motor permanent angetrieben werden, der Antrieb zukünftig durch einen Elektromotor erfolgt (z. B. Klimakompressor oder Pumpen). Hinzu kommen weitere Sicherheits-, Fahrerassistenzsysteme und Aktoren, wie sie in [2–4] beschrieben werden. Dies hat zur Folge, dass der Wirkungsgrad des gesamten Fahrzeugs ansteigt, die Belastung des Bordnetzes aber zunimmt. Die dadurch zusätzlich benötigte elektrische Energie kann vom Klauenpolgenerator in Kombination mit der Bleibatterie nicht ausreichend zur Verfügung gestellt werden, da die Leistung des Generators begrenzt ist ($P_{Gen,max} \leq 3\text{kW}$), was u. a. auf den Riementrieb (z. B. Riemenverschleiß) und auf Bauraumanforderungen zurückzuführen ist [5]. In diesem Falle würde es innerhalb des Bordnetzes zu einem Energiedefizit kommen. Dies hätte zur Folge, dass sich die Batterie entlädt und anschließend einige Komponenten nicht einwandfrei funktionieren würden. Dazu zählen auch sicherheitsrelevante Einheiten, wie Steuergeräte. Dabei kann es vorkommen, dass sich die Batterie, aufgrund eines fehlenden Energiemanagements soweit entlädt, dass ein erneuter Start des Verbrennungsmotors nicht mehr möglich ist. Eine entleerte oder defekte Batterie ist laut ADAC zu 30% die Hauptursache für Pannen bei Kraftfahrzeugen. Tritt ein solcher Fall auf, hätte das Bordnetz die wichtigste Aufgabe, alle elektrischen Komponenten ausreichend mit elektrischer Energie zu versorgen, nicht erfüllt. Verstärkt werden Energiedefizite durch Stop-and-Go-Verkehr oder durch eine Start-Stopp-Funktion. Der Generator kann auf Grund von Leerlaufphasen und Phasen mit stillstehendem Motor keine elektrische Energie oder nur eine geringe Menge an das Bordnetz liefern. Damit die möglichen Energiedefizite gedeckt werden und die sonst zu befürchtenden Sicherheits- und Komforteinbußen nicht auftreten, ist es denkbar, eine Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellenbasis in das Fahrzeug zu integrieren, um das Bordnetz zu unterstützen, wenn die vom Generator gelieferte Energie nicht ausreichend ist, um alle Komponenten mit elektrischer Energie zu versorgen. Dieser Gedanke führt zu neuen unterschiedlichen Bordnetztopologien mit zusätzlichem Energiewandler und –speicher. Damit in erweiterten Bordnetztopologien alle Komponenten sinnvoll zusammenwirken, sind übergeordnete Energiemanagementstrategien nötig, die es zudem zu optimieren gilt.

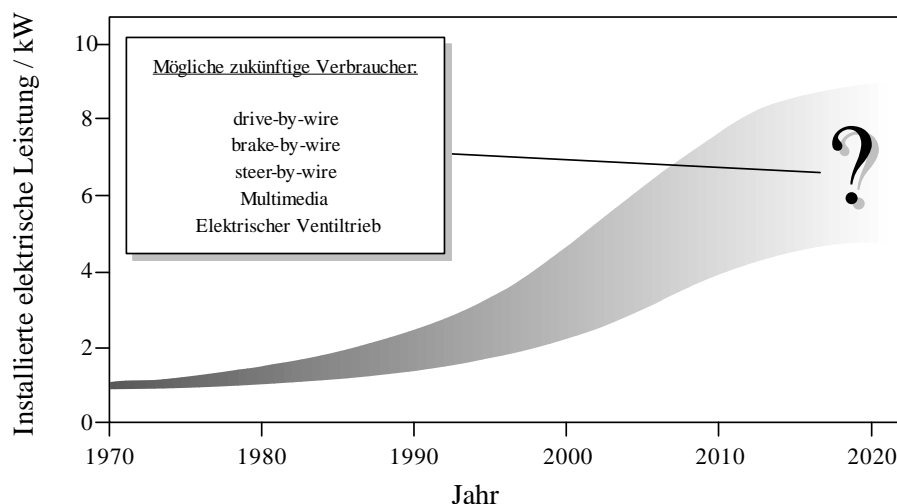


Abbildung 1.2.: Zu erwartender elektrischer Leistungsbedarf im Kraftfahrzeug [6]

1.1. Motivation und Ziel der Arbeit

Auf Grund der genannten auftretenden Probleme in heutigen Bordnetzen bei steigender Anzahl an Verbrauchern und der Tatsache, dass Lösungen wie z. B. das 42V-Bordnetz (noch) keinen Einzug in das Fahrzeug halten, soll eine erweiterte Bordnetzarchitektur mit brennstoffzellenbasierter Hilfsstromversorgung, die das Bordnetz unterstützt, untersucht werden. Abbildung 1.3 zeigt, dass sogar im Jahr 2030 mit einem Anteil der PKWs mit konventionellem Antrieb zu rechnen ist, der bei mehr als 73% der Neuzulassungen liegt. Diese Fahrzeuge könnten dann eine Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellenbasis enthalten.

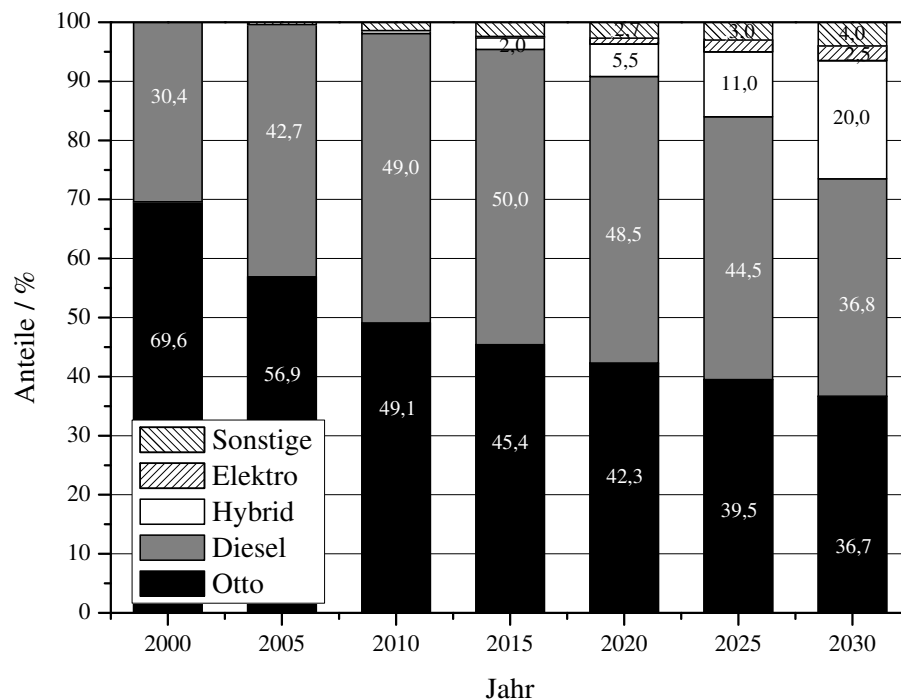


Abbildung 1.3.: PKW-Neuzulassungen nach Antriebsarten im Trend-Szenario [83]

Diese Arbeit soll Möglichkeiten für derartige erweiterte Bordnetztopologien aufzeigen und Dimensionierungsvorschläge geben. Zusätzlich sollen benötigte Energiemanagementstrategien entworfen und anschließend analysiert werden. Die Brennstoffzelle wurde als Energiewandler gewählt, da sie, bedingt durch die direkte Energiewandlung (vgl. Abbildung 1.4) einen hohen Wirkungsgrad aufweist, wie es der Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmaschinen in der Abbildung 1.5 zeigt. Deshalb ist auch mit einer Reduzierung des fossilen Kraftstoffverbrauchs und des damit direkt verbundenen CO_2 -Austoßes zu rechnen. Ziel der Arbeit soll sein, mit Hilfe einer Analyse, eine Aussage bezüglich der Qualität des Zusammenwirkens von Energiemanagement, Energiewandler und -speicher treffen zu können, um somit ein optimal funktionierendes System zu erhalten, dessen Wirkungsgrad einen maximalen Wert aufweist.

1. Einleitung

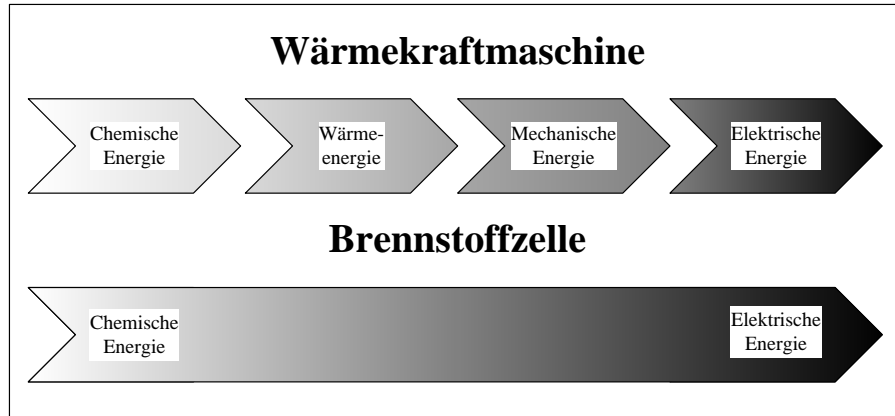


Abbildung 1.4.: Vergleich der Energiewandlung bei der Erzeugung elektrischer Energie mit Hilfe von Wärmekraftmaschine und Brennstoffzelle

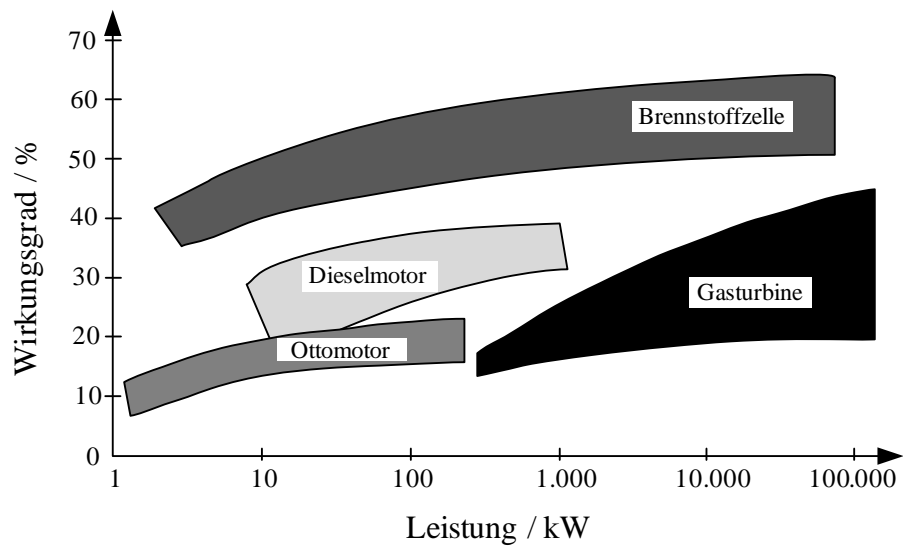


Abbildung 1.5.: Vergleich von Wirkungsgraden [7]

1.2. Aufbau der Arbeit

Ausgangspunkt für diese Arbeit ist das Standardbordnetz wie es in heutigen Fahrzeugen verbaut ist (vgl. Abbildung 1.6). Diese Topologie wird erweitert durch eine brennstoffzellenbasierte Hilfsstromversorgung und einen optionalen Doppelschichtkondensator als zweiten elektrischen Speicher. Im zweiten Kapitel werden hierzu der Stand der Technik erläutert und beide Bordnetzarchitekturen und ihre Komponenten beschrieben. Zusätzlich werden für die Bewertung der Bordnetztopologien Randbedingungen (z. B. Last- und Fahrzyklen) zusammengestellt und beschrieben. Im dritten Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Simulationsprogramm inklusive aller benötigten Modelle vorgestellt. Dieses Kapitel zeigt außerdem Simulationsergebnisse — wie beispielsweise das Potenzial der brennstoffzellenbasierten Hilfsstromversorgung. Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit der Dimensionierung der einzelnen Komponenten des Standard- und des erweiterten Bordnetzes — wozu auch die benötigten leistungselektronischen Wandler zählen. Im darauffolgenden Kapitel fünf werden Energiemanagementstrategien vorgeschlagen und erörtert. Zusätzlich werden diese durch eine Analysefunktion bewertet. Das Kapitel sechs beschreibt den im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Bordnetzsimulator. Hierbei werden Simulations- und Messergebnisse gegenübergestellt. Abgeschlossen wird die Arbeit durch eine Zusammenfassung, das Literaturverzeichnis und einen Anhang.

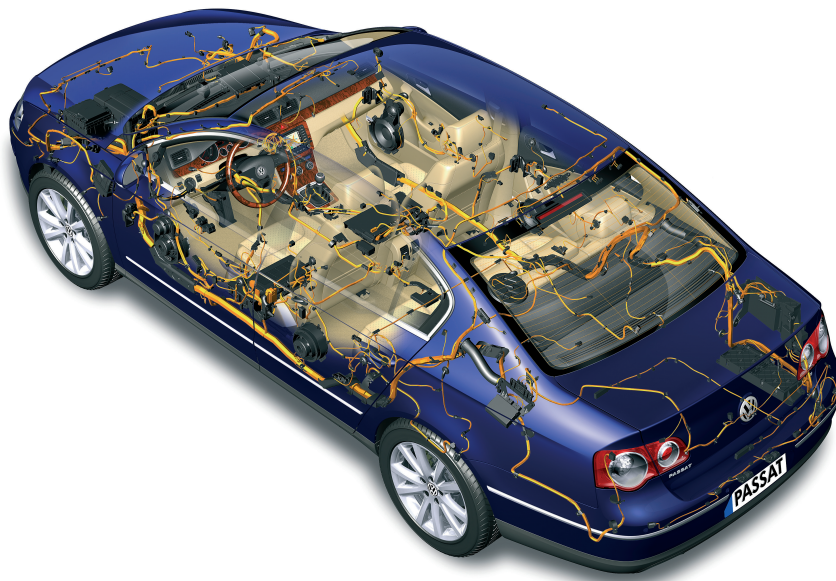


Abbildung 1.6.: Verkabelung in Volkswagen Passat [84]

2. Grundlagen — Stand der Technik

2.1. Das elektrische Bordnetz von Kraftfahrzeugen

Das Bordnetz eines heutigen Fahrzeugs muss unterteilt werden in ein Daten- und Energiebordnetz. In der vorliegenden Arbeit ist mit dem Begriff „Bordnetz“ immer das Energiebordnetz gemeint.

Die Aufgabe des elektrischen Bordnetzes ist die sichere Energieversorgung aller elektrischen Verbraucher in einem Kraftfahrzeug. Das konventionelle Bordnetz, wie es in einem heutigen Kraftfahrzeug installiert ist, besteht aus den Hauptkomponenten Generator mit Gleichrichter, Batterie und 12V-Verbrauchern. Die einfachste Ausführung eines elektrischen Bordnetzes ist in Abbildung 2.1 (mittlerer Kasten) dargestellt. Die Auslegung elektrischer Bordnetze geschieht heutzutage durch Vorabschätzung des auftretenden Leistungsbedarfs elektrischer Verbraucher, ohne dass ein Energiemanagement oder eine Hilfsstromversorgung vorhanden sind, wie es ein Beispiel in [8] (Generatorbestimmung) zeigt. Dabei kann sich aber die Batterie unkontrolliert – z. B. bei Überlast – entladen, ohne dass Gegenmaßnahmen eingeleitet werden [9, 10]. Bei steigender Anzahl an elektrischen Verbrauchern wird diese Architektur zukünftig nicht mehr ausreichend sein.

Wenn die benötigte Energie größer ist als die vom Generator maximal zur Verfügung stehende Energie, ist die Unterstützung des Bordnetzes durch eine Hilfsstromversorgung (engl. Auxiliary Power Unit; APU) sinnvoll. Die APU liefert zusätzliche elektrische Energie ins Bordnetz und kann somit einem Energiedefizit vorbeugen. In Abbildung 2.1 ist im unteren Kasten eine APU mit Brennstoffzelle dargestellt. Diese wurde aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades als zusätzlicher Energiewandler gewählt. In der gleichen Abbildung im oberen Kasten ist eine Option mit Doppelschichtkondensator dargestellt, um z. B. die Batterie von kurzen Lade-Entladezyklen zu entlasten. Außerdem ist eine höhere Spannungsebene abgebildet, mit der es möglich ist, leistungsstarke Verbraucher mit einem geringeren Strom — bei gleicher Leistung — zu versorgen, damit u. a. die Verluste in den Zuleitungen verringert werden. Im Folgenden werden zuerst das konventionelle Bordnetz mit Generator, Batterie und elektrischen Verbrauchern beschrieben und im darauffolgenden Abschnitt das erweiterte Bordnetz mit Brennstoffzelle und Doppelschichtkondensator.

In Abbildung 2.1 sind vier leistungselektronische Wandler enthalten, die in Abschnitt 2.4 beschrieben werden:

1. Hoch- oder Tiefsetzsteller je nach gewählter Brennstoffzellenspannung
2. Hochsetzsteller
3. Bidirektionaler Hoch-/Tiefsetzsteller zum Ent-/Laden des Doppelschichtkondensators
4. Gleichrichter für die 3-phasige Generatorspannung

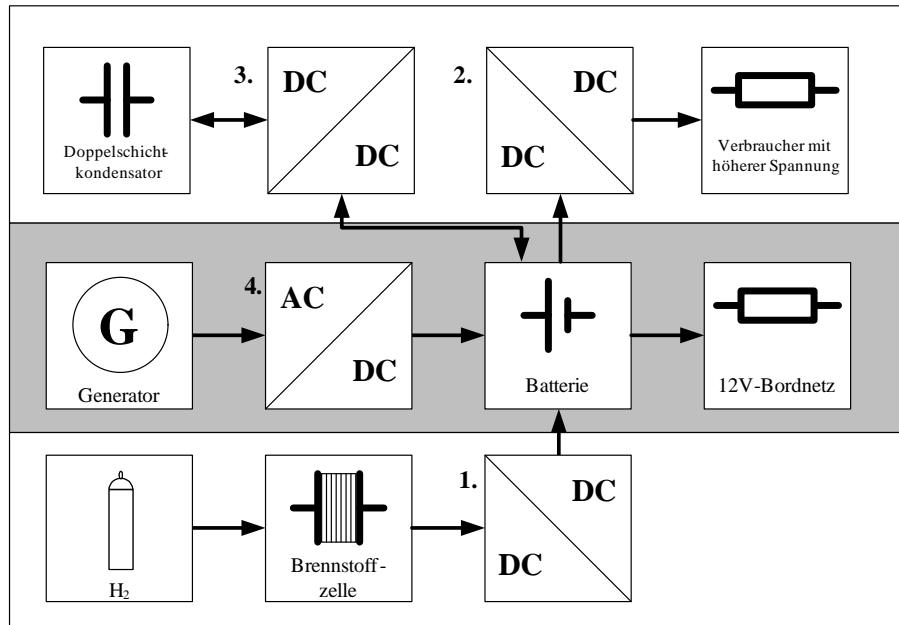


Abbildung 2.1.: Elektrisches Bordnetz erweitert durch Brennstoffzelle, Doppelschichtkondensator und optionaler höherer Spannungsebene

2.2. Das konventionelle elektrische Bordnetz und seine Komponenten

Das konventionelle Bordnetz eines heutigen Kraftfahrzeugs beinhaltet, wie erwähnt, die Hauptkomponenten Generator mit Gleichrichter, Bleibatterie und elektrische Verbraucher. Diese sind durch Kupferleitungen (Kabelbaum) bzw. über die Karosserie miteinander verbunden. Die Nennspannung der Batterie beträgt üblicherweise 12V. Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten beschrieben.

2.2.1. Generator

Der Generator ist der standardmäßig verbaute Energiewandler in konventionellen Fahrzeugen zur Versorgung der elektrischen Verbraucher mit elektrischer Energie. Im Folgenden sollen der Aufbau, die Funktion, die Auslegungskriterien, der Wirkungsgrad sowie seine Kennlinien beschrieben werden.

2.2.1.1. Allgemeines

In heutigen Kraftfahrzeugen sind üblicherweise Klauenpolgeneratoren — auf Grund der gesteigerten Baudichte auch compact-generator genannt — installiert (s. Abbildung 2.2). Ihr prinzipieller Aufbau ist seit Jahrzehnten gleich geblieben, obwohl die Anforderungen an den Generator stetig steigen [11]. Dem Generator kommt die Aufgabe zu, das Bordnetz mit all seinen elektrischen Verbrauchern mit elektrischer Energie zu versorgen und die Batterie zu laden, solange der Verbrennungsmotor läuft. Dazu wird die mechanische Energie des Verbrennungsmotors — die über einen Keil- oder Rippenriemen zum Generator übertragen wird — in elektrische Energie umgewandelt.

2.2.1.2. Aufbau

Im Allgemeinen bestehen moderne Klauenpolgeneratoren aus folgenden Baugruppen [12]:

- Ständerblechpaket mit Drehstromwicklung
- Rotor mit Klauenpolen, Erregerwicklung und Schleifringen
- Gleichrichterbrücke mit Dioden
- Köcherbürstenhalter mit Anbauspannungsregler in Hybridtechnik
- Antriebslager- und Schleifringlagerschild
- Gefaltete Blechriemenscheibe und asymmetrischer Blechlüfter

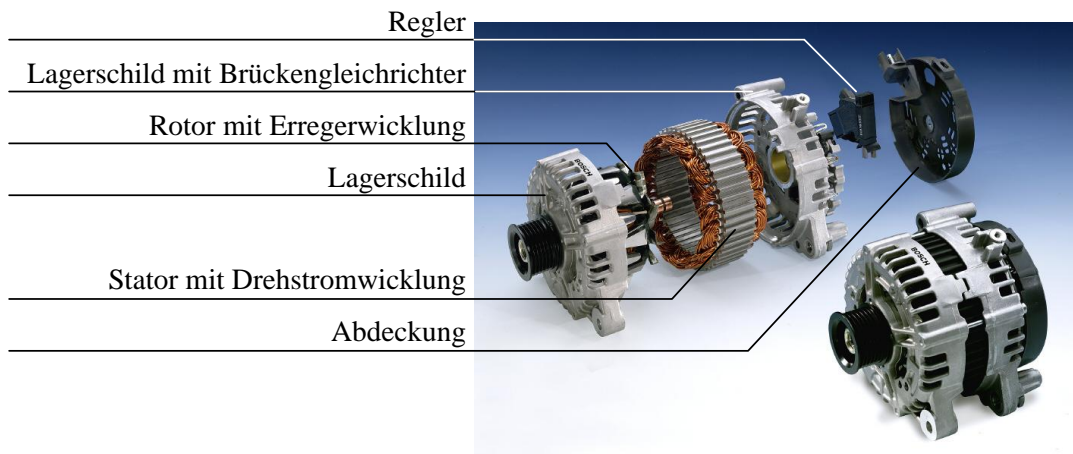
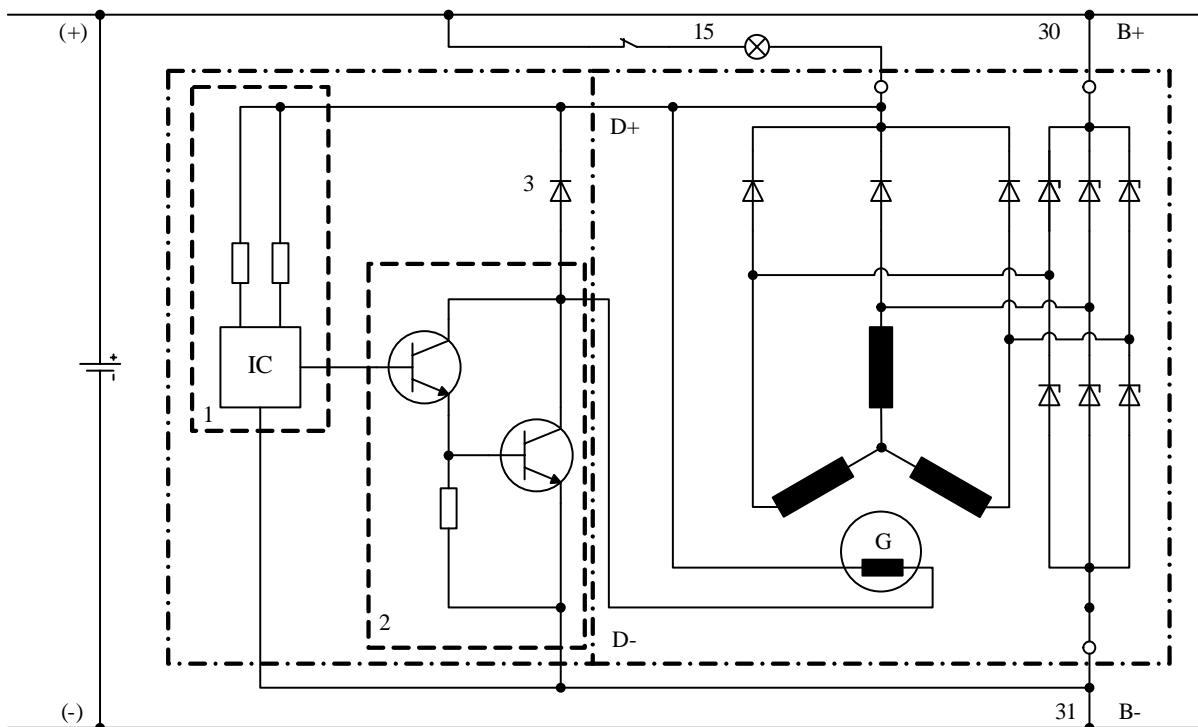


Abbildung 2.2.: Generator [85]

2.2.1.3. Funktion

Der Generator besteht grundsätzlich aus den zwei Hauptkomponenten Stator und Rotor. Der Rotor dreht sich innerhalb des Stators im Abstand des Luftspaltes. Der Stator trägt eine Drehstromwicklung mit der Polpaarzahl p (mittlere und große Klauenpolgeneratoren besitzen meist 12 Pole und kleine Klauenpolgeneratoren häufig 16 Pole). Der Rotor besitzt eine Erregerwicklung, die vom Erregerstrom durchflossen wird, welcher über Bürsten und Schleifringe zugeführt wird und das Erregermagnetfeld erzeugt. Dieses Feld verlässt den Rotor über die Nordpolklaue und wird dann von den gegenüberliegenden Zähnen des Ständerpaketes aufgenommen. Es durchfließt die Drehstromwicklungen, tritt an der Südpolklaue wieder in den Rotor ein, womit sich die Magnetflusslinien schließen [11–13].



1 – Steuerelektronik ; 2 – Leistungsstufe; 3 - Freilaufdiode

Abbildung 2.3.: Generatorschaltbild mit elektronischem Regler [14] S. 644

Durch das Drehen des Rotors entstehen die notwendigen Magnetfeldänderungen und eine Spannung wird induziert. Da der Stator eine Drehstromwicklung trägt — drei Einzelspulen (Stränge), die als Stern- oder Dreieckschaltung verschaltet sein können — ist die Ausgangsspannung eine dreiphasige Wechselspannung mit einer Frequenz, die von der Drehzahl des Verbrennungsmotors abhängt. Durch das Übersetzungsverhältnis zwischen Verbrennungsmotor (Kurbelwelle) und Generator, das einen Wert von $\dot{u}_{Motor-Generator} = 1 : 2 \dots 1 : 3$ haben kann, können Generatordrehzahlen von $n_{Gen,max} = 20.000 \text{min}^{-1}$ auftreten. Die Ausgangsspannung des Generators muss für das Kfz-Bordnetz gleichgerichtet und mit Hilfe des Erregerstromes auf eine Nennspannung von 14V geregelt werden. Zum Gleichrichten kommt eine B6-Brückenschaltung zum Einsatz, die aus der Generatordrehspannung eine pulsierende Gleichspannung macht (vgl. Abbildung 2.3). Die gewandelte elektrische Energie wird anschließend in der Batterie zwischengespeichert oder den Verbrauchern zur Verfügung gestellt.

2.2.1.4. Wirkungsgrad und Kennlinien

Abbildung 2.4 zeigt das Wirkungsgrad-Kennlinienfeld von zwei unterschiedlichen Generatoren. Aus diesen Diagrammen geht hervor, dass der mittlere Wirkungsgrad des Generators im normalen Fahrbetrieb bei 55...60% liegt und bei höheren Drehzahlen absinkt. In Abbildung 2.5 sind die auftretenden Verluste innerhalb des Generators in Abhängigkeit von der Drehzahl dargestellt. Die Hauptanteile an den Verlusten des Generators nach Abbildung 2.5 sind mechanische Verluste, Kupferverluste und Eisenverluste. Die mechanischen Verluste resultieren aus der Reibung in den Wälzlagern und den Schleifkontakten.

Hinzu kommen die Verluste durch Luftreibung des Lüfters, die bei höheren Drehzahlen sehr stark ansteigen. Die Kupferverluste entstehen durch ohmsche Verluste in den Ständerwicklungen. Die Eisenverluste entstehen durch Ummagnetisierungen und Wirbelströme im Eisen des Ständers und Läufers. Diese steigen überproportional mit der Frequenz — bzw. mit der Generatordrehzahl — und der magnetischen Induktion an.

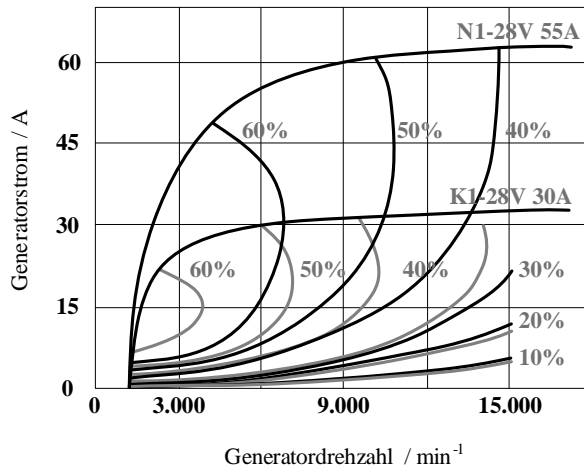


Abbildung 2.4.: Wirkungsgradkennlinienfeld zweier Generatoren im Vergleich [13]

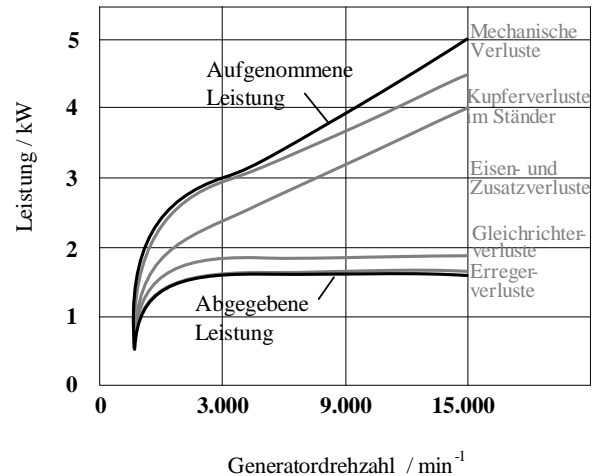


Abbildung 2.5.: Verluste in einem Drehstromgenerator [13]

Abbildung 2.6 zeigt typische drehzahlabhängige Kennlinien eines Klauenpolgenerators. Im niedrigen Drehzahlbereich — bei Leerlauf des Verbrennungsmotors — ist der abgebbare Maximalstrom gering. Da die Kennlinie aber in diesem Bereich sehr steil ist, steigt der abgebbare Maximalstrom mit der Drehzahl des Generators rasch an. Nach Erreichen der Nenn Drehzahl n_N verläuft die Kennlinie nahezu waagrecht, was bedeutet, dass mit weiter steigender Generatordrehzahl der Strom nur gering ansteigt. Wie Abbildung 2.6 außerdem zeigt, ist die Stromabgabe des Generators auch temperaturabhängig und sinkt mit Zunahme der Temperatur ab. Somit kann bei gleicher Drehzahl lediglich eine geringere Menge elektrischer Energie in das Bordnetz eingespeist werden, wodurch der Energiehaushalt des Bordnetzes beeinflusst werden könnte.

Da der Generator in einem konventionellen Fahrzeug der einzige Energiewandler zur Erzeugung elektrischer Energie ist und dem Fahrzeug von außen keine elektrische Energie zugeführt wird, kann man das elektrische Bordnetz als autonomes System (Inselnetz) bezeichnen. Der Generator muss demzufolge die während der Fahrt und im Stillstand des Fahrzeugs benötigte Energie während der Fahrtzeit erzeugen [15].

2.2.1.5. Start-Stopp-Funktion

Bei der Start-Stopp-Funktion wird der Verbrennungsmotor ausgeschaltet, wenn das Fahrzeug zum Stillstand kommt, kein Gang eingelegt ist und das Kupplungspedal nicht betätigt ist. Dadurch kann fossiler

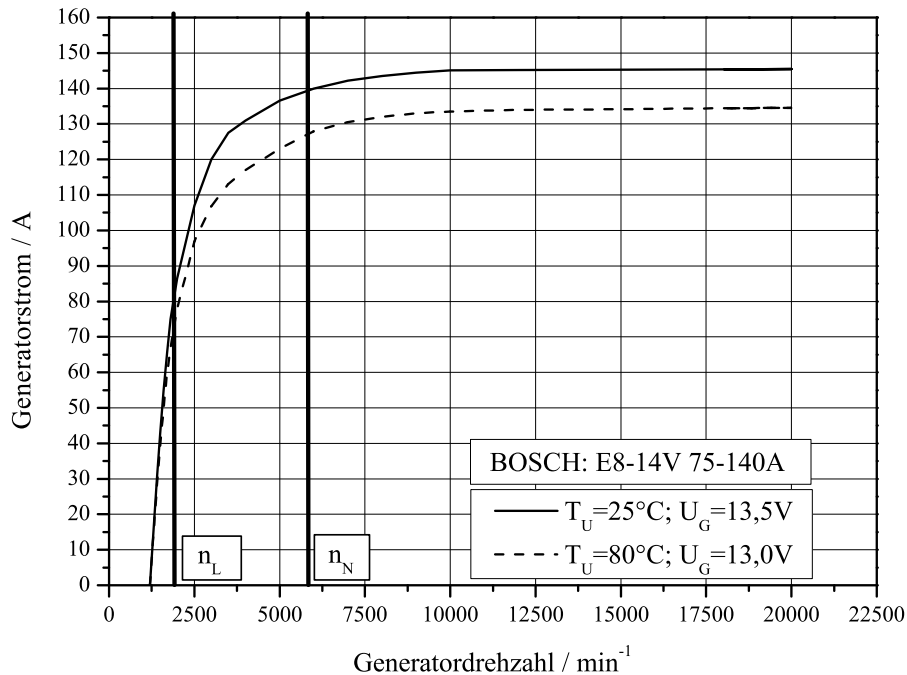


Abbildung 2.6.: Kennlinien eines Klauenpolgenerators bei unterschiedlichen Temperaturen [85]

Kraftstoff eingespart und der CO₂-Ausstoß verringert werden. Der Verbrennungsmotor wird anschließend wieder gestartet, wenn das Kupplungspedal betätigt wird, um einen Gang einzulegen. Die Start-Stopp-Funktion belastet den Energiehaushalt des Bordnetzes zusätzlich, da der Generator, wenn der Verbrennungsmotor ausgeschaltet ist, keine Energie ins Bordnetz liefern kann und somit die Batterie alle Verbraucher mit elektrischer Energie versorgen muss und sich dadurch entlädt. Zusätzlich muss der Verbrennungsmotor vor dem Losfahren jedes Mal wieder gestartet werden, was ebenfalls den Energiehaushalt belastet. Bei aktivierter Start-Stopp-Funktion gilt

$$I_{Gen} = \begin{cases} 0 & n_{Motor} = 0 \\ f(n_{Motor}, Last) & n_{Motor} \neq 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2.2. Batterie

In einem Bordnetz hat die Batterie (s. Abbildung 2.7) die Aufgabe eines reversiblen, chemischen Speichers, der die elektrische Energie, die von einem Energiewandler (in der Regel ein Generator) erzeugt wird, temporär zwischenspeichert, sobald diese nicht von elektrischen Verbrauchern benötigt wird. Dieser Vorgang wird als Laden des Speichers bezeichnet. Sollte der Leistungsbedarf innerhalb des Bordnetzes größer sein als die maximale lieferbare Leistung des Generators, muss die Batterie den Differenzbetrag zur Verfügung stellen, wobei sie sich entlädt. Hierbei wird die chemische Energie in elektrische Energie zurückgewandelt. Dies gilt insbesondere beim Startvorgang des Verbrennungsmotors oder während einer Start-Stopp-Phase, wenn der Generator — auf Grund des Stillstands des Verbrennungsmotors — keine Energie ins Bordnetz liefern kann, oder im Leerlauf, wenn nur eine geringe Menge Energie

vom Generator ins Bordnetz geliefert wird. Nach Phasen der Energieentnahme sollte die Batterie wieder geladen werden, damit die Batterie für den nächsten Bedarfsfall einsatzbereit ist [11, 12].

Die Anforderungen an eine Batterie im Kfz-Bordnetz lauten wie folgt:

- Bereitstellung des hohen Stromes zum Starten des Verbrennungsmotors
- Versorgung der elektrischen Verbraucher bei stillstehendem Verbrennungsmotor oder bei Lastspitzen
- Energiespeicher zur temporären Speicherung von überschüssiger elektrischer Energie bei kleiner Verbraucherleistung

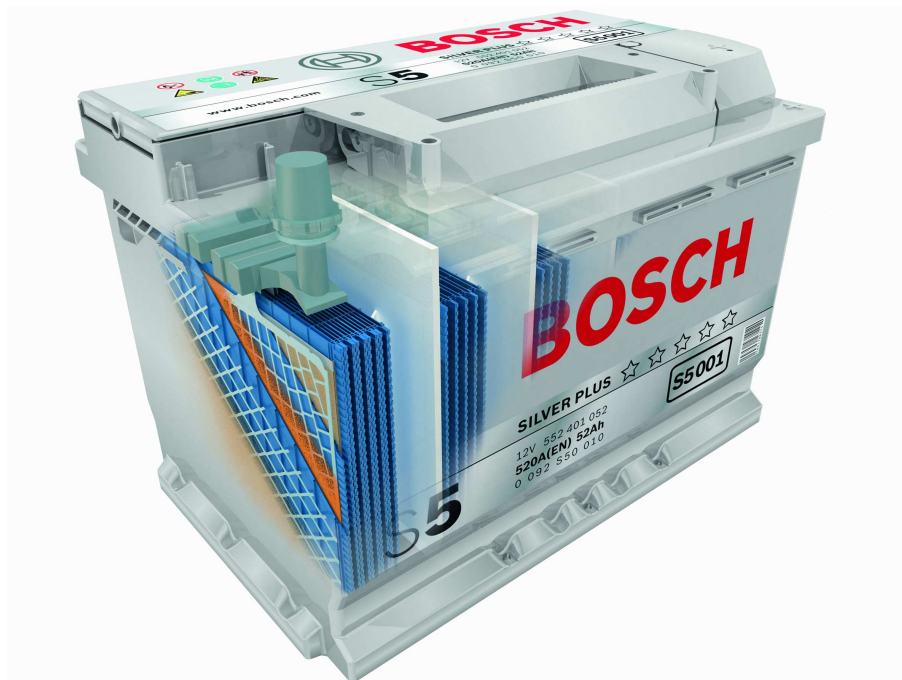


Abbildung 2.7.: Bleibatterie [85]

2.2.2.1. Definition des Batteriebegriffs

Der Begriff Batterie bezeichnet genau genommen ein Primär-Element, das lediglich Energie abgeben, aber nicht wieder aufgeladen werden kann. Dieses wäre für diesen Anwendungsfall nicht brauchbar, da es keine Energie aufnehmen könnte. Stattdessen werden Sekundär-Elemente — Akkumulatoren — benötigt, die Energie temporär aufnehmen und wieder abgeben können. Im Folgenden sollen diese als Batterie bezeichnet werden, wie es sich eingebürgert hat.

Eine Batterie besteht aus mehreren Zellen, die je nach Bedarf parallel oder in Reihe geschaltet werden. Zur Erzeugung größerer Spannungen werden einzelne Zellen in Reihe geschaltet. Dabei ist die Zelle die kleinste Einheit einer Batterie. Grundsätzlich besteht eine Zelle aus einer negativen und einer positiven Elektrode, die durch einen Elektrolyten getrennt sind. Die Kapazität einer Batterie ist die Ladungsmenge

in Amperestunden (Ah), die unter bestimmten Bedingungen entnommen werden kann. Diese ist abhängig von der Größe des Entladestroms, der Temperatur und der Ladeschlussspannung. Die Nennspannung der Batterie berechnet sich aus der Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen und der Nennspannung der einzelnen verwendeten Zelle [16].

2.2.2.2. Aufbau und Funktion der Bleibatterie

Die Bleibatterie ist der standardmäßig verbaute Energiespeicher in heutigen Fahrzeugen. Das Prinzip wird in Abbildung 2.8 veranschaulicht. Die Plusplatte besteht hierbei aus Blei, die mit Bleidioxid (PbO_2) überzogen ist und die Minusplatte besteht aus schwammigem, hochporösem Blei (Pb). Diese beiden Stoffe sind durch einen Elektrolyten aus verdünnter Schwefelsäure (H_2SO_4) voneinander getrennt. Der Elektrolyt hat die Aufgabe der Ionenleitung bei Ladung und Entladung. Die Zelle einer Bleibatterie weist eine Spannung von 2V (abhängig von den aktiven Elektrodenmaterialien und dem Elektrolyten) auf, die bei der Ladung etwas ansteigt und bei der Entladung etwas abfällt. Eine Starterbatterie mit einer Nennspannung von 12V besteht also aus einer Reihenschaltung von sechs Zellen, die sich durch Trennwände unterteilt in einem Polypropylen-Gehäuse befinden.

Das Bleidioxid (PbO_2) der Plusplatte und das Blei (Pb) der Minusplatte werden bei der Entladung der Batterie mit dem Elektrolyten (H_2SO_4) zu Sulfat-Ionen (SO_4^{2-}) umgesetzt. Dieser Vorgang wird bei der Ladung umgekehrt, so dass die aktiven Materialien wieder aufgebaut werden. Wenn die Batterie entladen wird, fließen Elektronen vom Minuspol zum Pluspol. Dabei oxidiert das Blei (-) zu Bleisulfat und das Bleioxid (+) wird zu Bleisulfat reduziert. Da dieser Vorgang weitestgehend reversibel ist, kehren sich die chemischen Vorgänge bei der Ladung um [11, 12, 17, 18].

Die chemische Summenformel lautet wie folgt:

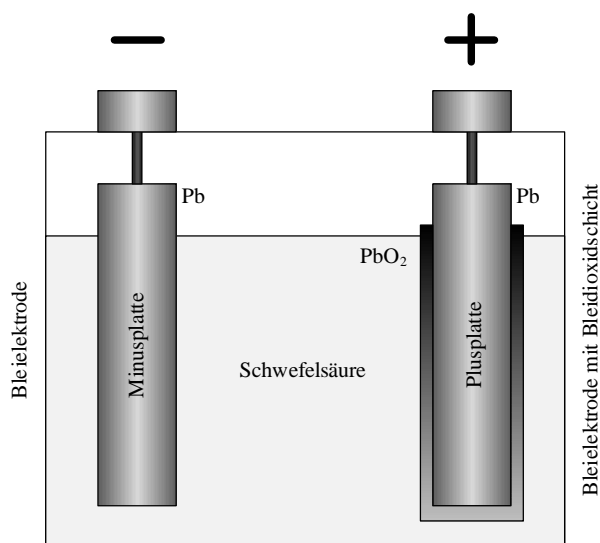


Abbildung 2.8.: Aufbau einer Bleibatterie-Zelle

2.2.2.3. Vor- und Nachteile der Bleibatterie

Im Folgenden werden die wesentlichen Vor- und Nachteile für den Einsatz im Kraftfahrzeug einer Bleibatterie aufgezeigt. Zu den Vorteilen zählt das gute Preis-Leistungsverhältnis (günstige verwendete Materialien). Dazu kommt, dass es sich bei der Bleibatterie um eine ausgereifte und robuste Technik handelt. Sie weist eine hohe Strombelastbarkeit auf und kann nahezu vollständig recycelt werden. Diesen Vorteilen stehen auch Nachteile gegenüber. Zu diesen zählt u. a. das hohe Gewicht, das aus dem verwendeten Hauptmaterial (Blei) resultiert. Außerdem besitzt eine Bleibatterie eine geringe Zyklenfestigkeit (vgl. Abbildung 2.9) und im Gegensatz zu anderen Batteriearten/-typen eine geringe Energiedichte (ED etwa 30Wh/kg). Hinzu kommt, dass in Bleibatterien Schwermetalle enthalten sind. Bei Batterien allgemein muss darauf geachtet werden, dass man sie weder tiefentlädt noch überlädt. Unter einer Tiefentladung wird bei einer Bleibatterie das Absinken der Zellspannung unter 1,8...1,3V verstanden. Das Überladen beginnt bei Überschreitung der Ladeschlussspannung 2,3...2,4V je Zelle. In beiden Fällen kommt es zu Schäden an der Batterie.

Ferner ist mit dem Absinken des Ladezustands eine Absenkung der Elektrolytkonzentration verbunden. Daraus folgt eine erhöhte Sulfatlöslichkeit, was zu einer Sulfatierung des aktiven Materials führt und die Kapazität der Batterie reduziert. Außerdem vergrößert der geringe Ladezustand das Dendritenwachstum und fördert somit eine Kurzschlussbildung zwischen den Elektroden. Zusätzlich wird mit zunehmender Entladung das aktive Material mechanisch geschwächt. Bei kostengünstigen Gitterplattenbleibatterien, die als Starterbatterien eingesetzt werden, sollte der Ladezustand 50% nicht unterschreiten, um eine Tiefentladung zu verhindern und einen zukünftigen Verbrennungsmotorstart zu gewährleisten. Dabei ist nicht entscheidend, wie groß der Entladestrom ist. Auch Selbstentladung kann zu einer Tiefentladung führen. Des Weiteren sollte die Batterie keinen geringen Ladezustand für einen längeren Zeitraum aufweisen [19, 20].

Obwohl die Bleibatterie etliche Nachteile aufweist, ist sie dennoch aufgrund ihres guten Preis-Leistungsverhältnisses der standardmäßig verbaute Energiespeicher in heutigen Fahrzeugen. Dennoch gibt es Alternativen, die zukünftig in einem Kraftfahrzeug installiert werden könnten. Im folgenden Abschnitt werden diese aufgezählt.

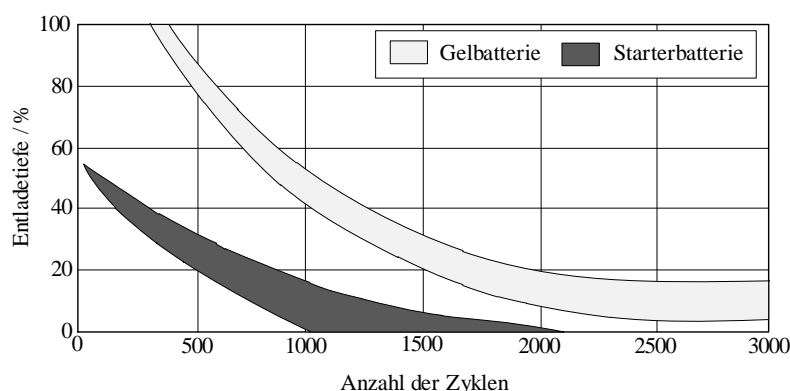


Abbildung 2.9.: Vergleich der Lebensdauer von Bleibatterien (Starter- und Gelbatterie) bei Zyklen mit unterschiedlichem Ladezuständen [86]

2.2.2.4. Alternativen zur Bleibatterie

Die Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über unterschiedliche Batteriearten und deren Eigenschaften.

Die Lithium-Ionen-Batterie besitzt beim derzeitigen Stand der Technik das größte Potenzial, um die Bleibatterie als Standardenergiespeicher abzulösen. Aufgrund seiner Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe ist das Metall Lithium sehr interessant für den Einsatz in Batterien. Bei Lithium-Ionen-Batterien besteht die positive Elektrode z. B. aus einem Lithium-Mangan-Oxid (vgl. Tabelle 2.1 Variante 3 Lithium/Ion), die negative Elektrode aus Kohlenstoff, z. B. Graphit. Die beiden Elektroden befinden sich in einem organischen Elektrolyten (Flüssigkeit oder nahezu festes Gel). Dieses ist in der Lage, Lithium-Ionen zu transportieren, die in den Atomgittern der Elektroden eingelagert werden können. Wenn die Batterie geladen wird, wandern die Lithium-Ionen vom Oxid in das Graphit und nehmen dort ein Elektron auf. Beim Entladen gibt das Lithium-Ion das Elektron wieder ab und wandert zurück in die Oxid-Elektrode.

Lithium-Ionen-Batterien besitzen eine sehr hohe Energiedichte, was vorteilhaft für mobile Netze ist. Nachteilig sind die hohen Kosten, wodurch Lithium-Ionen-Akkumulatoren in Kfz-Anwendungen als Starterbatterien noch nicht konkurrenzfähig sind [21].

Tabelle 2.1.: Galvanische Sekundärelemente [11, 16]

Batterie- bezeichnung	Kurz- zeichen	aktive Masse		Nenn- spannung/ Zelle V	Gasungs- spannung V/Zelle	Elektrolyt
		positiv	negativ			
Blei	Pb	PbO ₂	Pb	2,0	etwa 2,40	verdünnte Schwefelsäure
Nickel/ Cadmium	Ni/Cd	NiOOH NiOOH	CD CD + Fe	1,2	etwa 1,55	verdünnte Kalilauge
Nickel/ Eisen	Ni/Fe	NiOOH	Fe	1,2	etwa 1,70	verdünnte Kalilauge
Silber/ Zink	Ag/Zn	AgO	Zn	1,5	etwa 2,05	verdünnte Kalilauge
Lithium/Ion	LiIon	LiCoO ₂ LiNiO ₂ LiMn ₂ O ₄	Graphit	2,5...4,2		organische Flüssigkeit oder Polymer als Gel

2.2.2.5. Ladezustand der Batterie — SOC

Der Ladezustand (engl. State of Charge – SOC) ist wohl der wichtigste Wert einer Batterie. Der Grund hierfür ist die große Abhängigkeit des Verhaltens der Bleibatterie von diesem Wert (z. B. Veränderung des Innenwiderstandes und Leerlaufspannung), der wie folgt definiert ist:

$$SOC_{Bat} = \frac{Q_{Bat} \cdot 100\%}{Q_{Bat,100\%}} \quad (2.2)$$

Wobei $Q_{Bat,100\%}$ die Nennladung der Batterie darstellt, welche bei vollgeladener Batterie maximal entnommen werden kann. Q_{Bat} entspricht der Ladung, die zum aktuellen Zeitpunkt noch entnommen werden

kann. Der SOC wird in Prozent angegeben und kann Werte zwischen 0 (Batterie vollständig entladen) und 100% (Batterie vollständig geladen) annehmen. Der komplementäre Wert zum SOC hingegen gibt die Entladetiefe der Batterie an, der im englischen als Depth of Discharge (DoD) bezeichnet wird [22, 23].

2.2.2.6. Alterungszustand der Batterie — SOH

Der State of Health (SOH) gibt die Alterung der Batterie an. Der Wert

$$SOH = \frac{C_{\text{verfügbar}} \cdot 100\%}{C_{100\%}} \quad (2.3)$$

ist das Verhältnis zwischen der aktuellen verfügbaren Kapazität $C_{\text{verfügbar}}$ der Batterie und der vom Hersteller angegebenen Nominalkapazität $C_{100\%}$ [22, 23].

2.2.2.7. Leistungsfähigkeit der Batterie — SOF

Der State of Function (SOF) gibt die Funktions- oder Leistungsfähigkeit der Batterie an, um eine Fahrzeugkomponente sicher mit elektrischer Energie zu versorgen. Um die Leistungsfähigkeit der Batterie zu bestimmen, muss die Batteriespannungs- und die Batteriestromänderung gemessen werden. Aus diesen Werten kann u. a. der Innenwiderstand der Batterie berechnet werden, der eine hohe Aussagekraft über die Leistungsfähigkeit der Batterie hat. Je niedriger der Innenwiderstand der Batterie, desto besser ist ihre Leistungsfähigkeit. Mit diesem Wert — zusammen mit dem Ladezustand und der Alterung der Batterie — ist es möglich, beispielsweise eine Meldung an den Fahrer auszugeben, wenn ein abermaliges Starten des Verbrennungsmotors nicht sichergestellt werden kann [24].

2.2.2.8. Energiedichte

Mit der Energiedichte wird das Energiespeichervermögen eines elektrischen Speichers bezogen auf das gesamte Gewicht bzw. gesamte Volumen des Speichers angegeben. Diese wird üblicherweise in Wh/kg bzw. Wh/m^3 angegeben. Der Wert der Energiedichte wird durch eine 2-stündige Entladung des Speichers ermittelt. Je größer die Energiedichte eines Speichers ist, desto leichter bzw. kleiner kann ein Speicher bei einem vorgegebenen Energiegehalt realisiert werden [14].

2.2.2.9. Leistungsdichte

Die Leistungsdichte beschreibt die aus einem elektrischen Speicher entnehmbare Leistung bezogen auf das Gesamtgewicht bzw. Gesamtvolumen des Speichers und wird üblicherweise in W/kg bzw. W/m^3 angegeben. Die Leistungsdichte wird bezogen auf 80% Entladung des Speichers und ist ein Indiz dafür, wie schnell Energie aus einem Speicher entnommen werden kann [14].

2.2.2.10. Batteriesensor

Da durch die Analyse des Ladezustandes der Batterie viele Erkenntnisse ermittelt werden können, ist die exakte Ermittlung dieses Wertes in der Praxis sehr wichtig. Hierfür werden z. B. Batteriesensoren entwickelt, um den Zustand der Batterie zu jedem Zeitpunkt zu kennen. Dazu muss solch ein Sensor sowohl hohe Starterströme, als auch kleine Ruhestrome des Fahrzeugs möglichst genau messen können. Zusätzlich wird die Temperatur gemessen, weshalb diese Sensoren auf die Batterieklemme montiert werden. Aus den Messwerten kann dann nicht nur der SOC der Batterie, sondern auch der SOF und SOH ermittelt werden. Diese Erkenntnis kann dafür genutzt werden, um den Fahrzeugführer zu informieren, dass seine Batterie entweder einen geringen Ladezustand aufweist, bzw. dass das Ende der Lebensdauer seiner Batterie in kürze erreicht ist. Somit könnten eine Vielzahl an „Liegenbleibern“ verhindert werden. Zusätzlich können die gewonnenen Werte verwendet werden, um in Standardbordnetzen einen absinkenden Ladezustand zu diagnostizieren, um anschließend leistungsstarke Komfortkomponenten auszuschalten, oder weitere Maßnahmen einzuleiten, wie z. B. Anheben der Leerlaufdrehzahl oder Außerkräftsetzen der Start-Stopp-Funktion.



Abbildung 2.10.: Batteriesensor Quelle: BOSCH [85]

Abbildung 2.10 zeigt eine kommerzielle Lösung eines Batteriesensors — auch intelligenter Batterie-Sensor (IBS) oder elektronischer Batterie-Sensor (EBS) genannt — der in die nach DIN 72311 genormten Pol-Nische einer Batterie platziert werden kann [14].

Der Batteriestrom wird über einen niederohmigen Shunt gemessen und zusammen mit der Batteriespannung und –temperatur in einen Mikrocontroller eingelesen. Aus diesen Messwerten werden anschließend der SOC, SOH und SOF ermittelt und über eine Kommunikationsschnittstelle (z. B. LIN-Bus) ausgegeben. Abbildung 2.11 zeigt den schematischen Aufbau [14].

2.2.3. Elektrische Verbraucher

2.2.3.1. Elektrische Verbraucher in aktuellen Bordnetzen

Lasten — auch Verbraucher genannt — sind Geräte, die elektrische Energie in eine andere Energieform umwandeln (in Form von beispielsweise mechanischer oder chemischer Energie, Wärme, Licht,

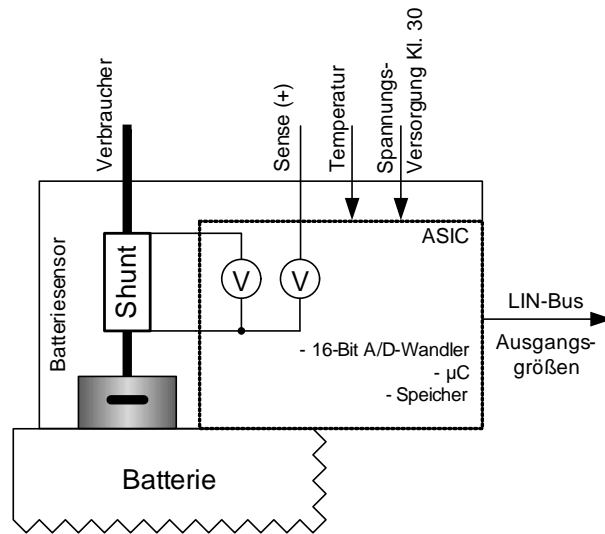


Abbildung 2.11.: Aufbau eines Batteriesensors [14]

Schall oder sonstige Strahlung [16]), wie es Abbildung 2.12 zeigt. Die meiste Energie wird allgemein benötigt, um elektrische Energie in mechanische Energie (elektrische Maschinen) oder in Wärmeenergie (Heizungen) umzuwandeln.

Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über einige elektrische Verbraucher, die in einem aktuellen Kraftfahrzeug verbaut sein könnten. Je nach Ausstattungsgrad des Fahrzeugs sind mehr oder weniger Komponenten installiert. Diese können in Dauer-, Langzeit- und Kurzzeitverbraucher eingeteilt werden, je nachdem wie lange sie jeweils eingeschaltet sind. Die Zündung z. B. ist ein Dauerverbraucher, weil sie während der gesamten Fahrt eingeschaltet ist. Hingegen sind Blink- und Bremsleuchten aufgrund ihrer kurzen Betriebszeit nur Kurzzeitverbraucher. Verbraucher wie das elektrische Kühlergebläse und die Nebel-leuchten sind wiederum Langzeitverbraucher, da sie einen längeren Zeitraum in Betrieb sind. Tabelle 2.2 zeigt eine erweiterte Liste an elektrischen Verbrauchern, unterteilt in die zuvor genannten Kategorien.



Abbildung 2.12.: Elektrischer Verbraucher

2.2.3.2. Elektrische Verbraucher in zukünftigen Bordnetzen

In zukünftigen Kraftfahrzeugen sind Innovationen zu erwarten, die zum einen das Fahren sicherer und komfortabler machen und zum anderen den Wirkungsgrad des Fahrzeugs erhöhen werden, um somit fossilen Kraftstoff einzusparen und gleichzeitig den CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Außerdem ist davon auszugehen, dass weitere bislang mechanisch angetriebene Komponenten elektrifiziert werden (z. B. Pumpen) um auch in diesem Bereich des Fahrzeugs den Wirkungsgrad zu vergrößern. Diese Komponenten wurden

Tabelle 2.2.: Leistungsbedarf von Verbrauchern in Kfz-Bordnetzen [12, 25]

Verbraucher	Leistung
Dauerverbraucher	
Zündung	20W
Elektrische Kraftstoffpumpe	50 ... 140W
Elektrische Kraftstoffeinspritzung	70 ... 100W
Motormanagement und Steuergeräte	175 ... 200W
Innenraumgebläse	100 ... 400W
Scheinwerfer - Abblendlicht	je 55W
Langzeitverbraucher	
Radio	15 ... 500W
Begrenzungsleuchten	je 4W
Instrumentenleuchten	je 2W
Parkleuchte	je 3 ... 5W
Scheinwerfer - Fernlicht	je 60W
Schlussleuchten	je 5W
Kennzeichenleuchten	je 10W
Nebelschlussleuchte und Nebelscheinwerfer	je 35 ... 55W
Elektrisches Kühlergebläse	200...500W
Navigations- und Kommunikationssysteme	15 ... 20W
Kurzzeitverbraucher	
Blinkleuchten	je 21W
Bremsleuchten	je 18 ... 21W
Innenraumleuchte	je 5W
Rückfahrcheinwerfer	je 21 ... 25W
Elektrische Fensterheber	je 150W
Scheibenwischer	je 60 ... 90W
Starter für Verbrennungsmotor	800 ... 3000W
Scheinwerferreinigungsanlage	60W
Zigarettenanzünder	100W
Heckscheibenheizung	120...200W
Glühkerzen bei Dieselfahrzeugen	je 100W
Sekundärlufteinblasung	400 ... 600W
Sitzheizung	je 100 ... 200W
Elektrische Zusatzheizung	300 ... 3000W
Elektrische Spiegelverstellung	je 20W
Elektrisches Schiebedach	150 ... 200W

bislang beispielsweise über einen Riemen vom Verbrennungsmotor angetrieben und werden zukünftig durch einen elektrischen Antrieb betrieben. Dadurch ist ein bedarfsgerechter Betrieb der elektrifizierten Komponenten möglich, da sie nur dann eingeschaltet werden, wenn sie auch benötigt werden. Des Weiteren ist, aufgrund der wegfallenden Riemenantriebe und der nicht mehr nötigen motornahen Installation, auch mit einem Bauraumvorteil zu rechnen. Durch den Wegfall der Kopplung über den Riemenantrieb entfallen auch auftretende Drehzahlschwankungen an den Komponenten, die auf unterschiedliche Drehzahlen des Verbrennungsmotors zurückzuführen sind. All diese Komponenten benötigen elektrische Energie für einen einwandfreien Betrieb — Energie, die zusätzlich vom Generator erzeugt werden muss. Somit werden zukünftige Bordnetze einen deutlich höheren Energiebedarf besitzen als heutige Bordnetze. Eine weitere Möglichkeit, den Wirkungsgrad des Fahrzeugs zu vergrößern, ist die Integration einer Start-Stopp-Funktion (Erläuterung erfolgt im Abschnitt 2.2.1.5 auf Seite 10), bei der der Verbrennungsmotor unter bestimmten Bedingungen nicht läuft. In diesen Phasen können vom Verbrennungsmotor angetriebene Komponenten nicht genutzt werden (z. B. konventioneller Klimakompressor). Elektrische Komponenten (z. B. Radio, Beleuchtung, Lüftung oder elektrischer Klimakompressor) hingegen können während dieser Zeit weiter betrieben werden, müssen aber vollständig aus der Batterie versorgt werden, die sich dadurch entlädt. Hierbei kann beispielsweise der Innenraum des Fahrzeugs weiterhin klimatisiert werden, was den Komfort des Fahrzeugs vergrößert. Dabei können Verbraucherleistungen auftreten, die im Vergleich zur Generatornennleistung, diese übersteigen können. Aus Kosten- und Gewichtsgründen sowie der Tatsache, dass Lastspitzen noch relativ selten auftreten, wird das Bordnetz bisher lediglich nach der mittleren zu erwartenden Verbraucherleistung dimensioniert.

Das Diagramm in Abbildung 2.13 zeigt heutige und zukünftige Verbraucher mit der jeweiligen Leistung und Einschaltdauer. Es ist erkennbar, dass neue Komponenten einen höheren Leistungsbedarf bei teilweise längeren Einschaltzeiten aufweisen [15, 25].

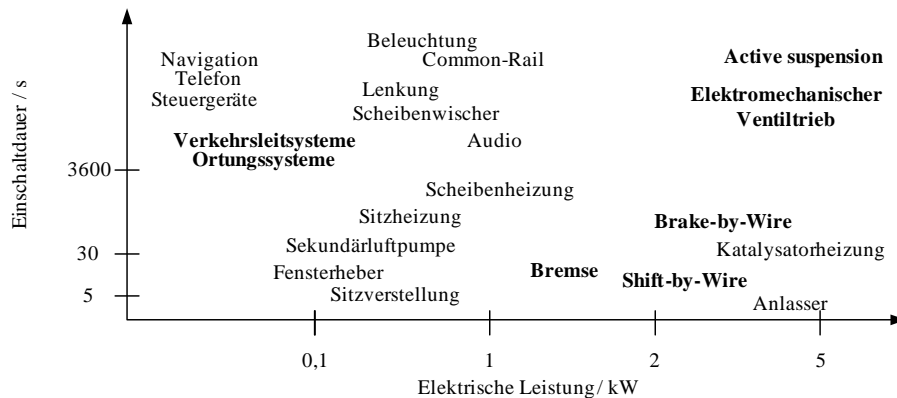


Abbildung 2.13.: Leistungen und Einschaltauern heutiger und zukünftiger (**fett gedruckt**) Verbraucher in einem Kraftfahrzeug, aus [25] (aktualisiert/erweitert)

2.3. Das erweiterte elektrische Bordnetz und seine Komponenten

Ausgehend von den dargestellten Problemen kann das Standardbordnetz durch eine Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellenbasis und einem optionalen Doppelschichtkondensator erweitert werden. Diese

Hilfsstromversorgung soll das Bordnetz unterstützen, wenn die vom Generator gelieferte Energie nicht ausreichend ist, um alle elektrischen Verbraucher zu versorgen. Für eine Hilfsstromversorgung gibt es mehrere Möglichkeiten. Die wohl einfachste Möglichkeit, mit dem geringsten Aufwand, um Energie in das Bordnetz einzuspeisen, wäre eine Vergrößerung des Generators. Dabei ist aber zu beachten, dass obwohl ein größerer Generator einen höheren Wirkungsgrad aufweisen könnte, dieser aber durch die Wirkungskette des Verbrennungsmotors und des Generators, stark geschmälert wird. Das Gleiche gilt für einen separaten Verbrennungsmotor mit einem weiteren Generator. Dieser Verbrennungsmotor könnte dauerhaft in einem optimalen Arbeitspunkt operieren und einen Generator antreiben. Doch wird durch diese Kombination wiederum CO₂ ausgestoßen.

Eine andere Möglichkeit, die ebenfalls chemische Energie in mechanische und anschließend in elektrische Energie wandelt wäre eine Mikroturbine. Diese weist zwar einen elektrischen Wirkungsgrad von $\eta_{Turbine,el} \geq 25\%$ auf, besitzt aber im Gegensatz zur Brennstoffzelle einen hohen Geräuschpegel und stößt ebenfalls wie der Verbrennungsmotor CO₂ aus. Aus diesen einigen genannten Nachteilen der alternativen Hilfsstromversorgungsmöglichkeiten, scheint die Brennstoffzelle eine gute Möglichkeit für die Bordnetzunterstützung zu sein. Besonders im Bereich des Umweltschutzes — kein CO₂-Ausstoß bei Wasserstoffbetrieb, hoher Wirkungsgrad und ein geringer Lärmpegel — hat die Brennstoffzelle einen enormen Vorteil. Aus diesen Gründen soll im Folgenden lediglich die Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellenbasis betrachtet werden.

Bei einer Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellenbasis speist eine Brennstoffzelle über einen Gleichspannungswandler Energie in das Bordnetz ein. Der Doppelschichtkondensator soll Stromspitzen decken, damit diese nicht von der Batterie geliefert werden müssen, um somit die Lebensdauer der Batterie zu verlängern und eine Verringerung der Kapazität und damit verbunden auch von Größe und Gewicht der Batterie zu ermöglichen. Auf Grund der energiegehaltabhängigen Spannung des Doppelschichtkondensators und der Brennstoffzellenspannung — die an die Bordnetzspannung angepasst werden muss — ist die Verwendung von leistungselektronischen Stellgliedern (DC/DC-Wandler) unumgänglich. Diese passen die unterschiedlichen Spannungsebenen an die Bordnetzspannung an und dies mit einem sehr hohen Wirkungsgrad $\eta_{LE} \rightarrow 1$. Zusätzlich ist das Speisen des Bordnetzes (bzw. das Laden der Energiespeicher) durch die Brennstoffzelle im Stillstand des Verbrennungsmotors möglich, was innovative Entwicklungen (z. B. Standklimaanlage) ermöglicht und somit den Komfort des Fahrzeugs vergrößert. Im Folgenden werden die zusätzlichen Komponenten beschrieben (vgl. Abbildung 2.1 auf Seite 7).

2.3.1. Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle ist ein zusätzlicher Energiewandler im erweiterten Bordnetz und soll zusätzlich Energie zur Unterstützung des Bordnetzes zur Verfügung stellen.

2.3.1.1. Allgemeines

Das Prinzip der Brennstoffzelle wurde im Jahre 1839 vom englischen Physiker Sir William Grove (1811-1896) entdeckt. Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler, der die chemische Energie, die sich in einem Brenngas befindet (z. B. Wasserstoff) mit einem Oxidanten (z. B. Sauerstoff) direkt

in elektrische Energie umwandeln kann — was als „kalte Verbrennung“ bezeichnet wird — ohne einen Umweg über thermische Expansions- (z. B. Verbrennung von Kraftstoffen) oder mechanische Zwischenprozesse (z. B. Generator). Auf Grund der „kalten Verbrennung“ und der Tatsache, dass die Brennstoffzelle nicht dem Carnot-Wirkungsgrad (maximaler theoretischer Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen) unterliegt, kann der Wirkungsgrad eines Brennstoffzellensystems (Brennstoffzelle und Peripherie) etwa doppelt so hoch sein, wie der eines Verbrennungsmotors [26–28]. Es gibt mehrere Brennstoffzellentypen, die im Abschnitt 2.3.1.4 auf Seite 27 beschrieben werden. Im Folgenden sollen sich alle Aussagen — wenn nicht allgemein gültig — auf die PEM-Brennstoffzelle (proton exchange membrane) beziehen. Der Carnot'sche Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine

$$\eta_C = 1 - \frac{T_U}{T_O} \quad (2.4)$$

ist abhängig von der Systemtemperatur T_O und der Umgebungstemperatur T_U . Bei der Brennstoffzelle ist der theoretische maximale Wirkungsgrad $\eta_{BZ,th}$ abhängig von der freien Reaktionsenthalpie ΔG_O^0 (maximal gewinnbare Arbeit) und der Reaktionsenthalpie (Heizwert) ΔH_O^0 :

$$\eta_{BZ,th} = \frac{\Delta G_O^0}{\Delta H_O^0} = 83,3\% \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta G_O^0 &= -237,3 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} && \text{Reaktionsenthalpie} \\ \Delta H_O^0 &= -285,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} && \text{oberer Heizwert bei } T_O = 298,15\text{K und } p_O = 1,013\text{bar} \end{aligned}$$

Damit erreicht der theoretische Wirkungsgrad bei Standardbedingungen einen Wert von $\eta_{BZ,th} = 83,3\%$ und kann unter idealen Bedingungen auf 94,5% ansteigen.

Abbildung 2.14 zeigt den Zusammenhang zwischen Carnot'schem und Brennstoffzellenwirkungsgrad in Abhängigkeit von der Systemtemperatur T_O . Hierbei handelt es sich um den Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle ohne Peripherie. Das bedeutet, dass der reale Wirkungsgrad eines Brennstoffzellensystems kleiner ist. Außerdem zeigt Abbildung 2.14, dass die Brennstoffzelle gerade bei geringen Systemtemperaturen (PEM-Brennstoffzelle $T_O = 80 \dots 100^\circ\text{C}$) einen sehr hohen Wirkungsgrad aufweist. Oberhalb von 1000°C haben dann Wärmekraftmaschinen einen besseren Wirkungsgrad [7, 26, 27, 29].

2.3.1.2. Aufbau

Die Brennstoffzelle ist ein Elektroden-Elektrolyt-System, dessen Aufbau in Abbildung 2.15 dargestellt ist. Bei einer PEM-Brennstoffzelle kommt als Elektrolyt eine ca. 1mm dicke protonleitende Folie (z. B. NAFION oder DOW) zum Einsatz. Im Betrieb weist diese einen Wassergehalt von 20...40% und eine spezifische Leitfähigkeit von $0,1\text{S}/\text{cm}$ auf. Die Elektrolytfolie wird auf beiden Seiten mit einem Katalysator beschichtet. Hierfür kommen für die Sauerstoff- und die Wasserstoffseite Edelmetalle (z. B. Platin) mit einer Konzentration von $0,1\text{mg}/\text{cm}^2$ zum Einsatz. Die Verwendung von Edelmetallen ist ein Grund für die hohen Kosten der Brennstoffzelle. Die beschichtete Folie befindet sich zwischen zwei porösen Elektroden. Diese führen die Gase Wasserstoff und Sauerstoff den Katalysatorschichten zu und die Reakti-

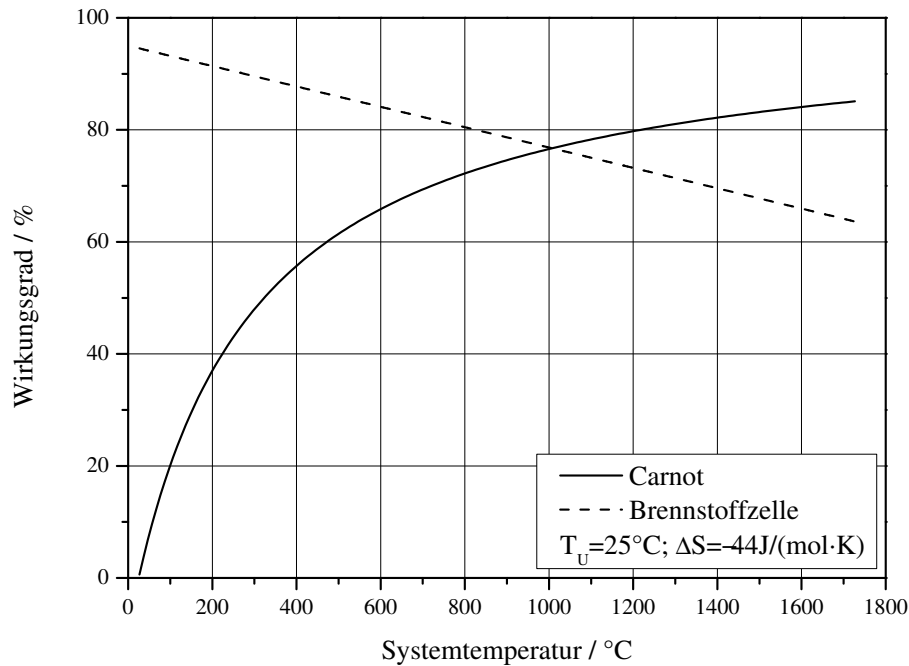


Abbildung 2.14.: Vergleich von Carnot'schem und Brennstoffzellenwirkungsgrad

onsprodukte Strom, Wasser und Wärme ab. Eine Brennstoffzelle ist die kleinste Einheit innerhalb eines Brennstoffzellenstapels (engl. Stack). Der Brennstoffzellenstack besteht aus mehreren Brennstoffzellen, die übereinandergestapelt werden. Somit ergibt sich elektrisch gesehen eine Reihenschaltung — wodurch sich die Spannungen der einzelnen Zellen addieren. Zur Abtrennung der einzelnen Brennstoffzellen innerhalb des Stacks dienen Bipolarplatten. Diese Platten haben mehrere Aufgaben. Sie übernehmen die elektrische Kontaktierung der Elektroden und leiten somit den Strom zur benachbarten Zelle weiter. Außerdem versorgen diese Platten mit ihren Kanälen die Elektroden mit Reaktionsgasen und führen das Reaktionswasser ab. Aufgrund des Materials (häufig Graphit) der Platten können sie gut die erzeugte Wärme an die benachbarten Kühlkammern abführen. Zusätzlich dichten sie die Gas- und Kühlkammern gegeneinander ab. Der Stack wird abgeschlossen durch Endplatten, Stromabgriffplatten, Zuganker, Gas- und Kühlwasseranschlüsse.

Typische Kenndaten einer PEM-Brennstoffzelle/ eines PEM-Brennstoffzellenstacks [7, 26, 27, 30, 31]:

- PEM-Brennstoffzelle:
 - Flächenleistung von bis zu $1\text{W}/\text{cm}^2$
 - Stromdichten bis $2\text{A}/\text{cm}^2$ mit Luft — mit Sauerstoff etwa doppelt so hoch
 - Spannung einer einzelnen Zelle beträgt $U_{BZ,Zelle} \leq 1\text{V}$
 - Zellendicke etwa 5mm bei einer Fläche von $400 \times 400\text{mm}^2$
- PEM-Brennstoffzellenstack:
 - kann aus mehr als 100 Zellen bestehen

2. Grundlagen — Stand der Technik

- Betriebstemperatur 70...100°C bei Gasdrücken von 2...5bar

Zur Erzeugung von elektrischer Energie benötigt der Brennstoffzellenstack weitere Komponenten. Diese benötigen für den Betrieb zum Teil elektrische Energie, was den Wirkungsgrad des gesamten Systems reduziert. Zu den Komponenten zählen:

- Luftverdichter zur Versorgung der Brennstoffzelle mit Luft
- Druckregler für die Reaktionsgase
- Kühlwasserkreislauf zur Abführung der Abwärme
- Systemsteuerung/ -regelung

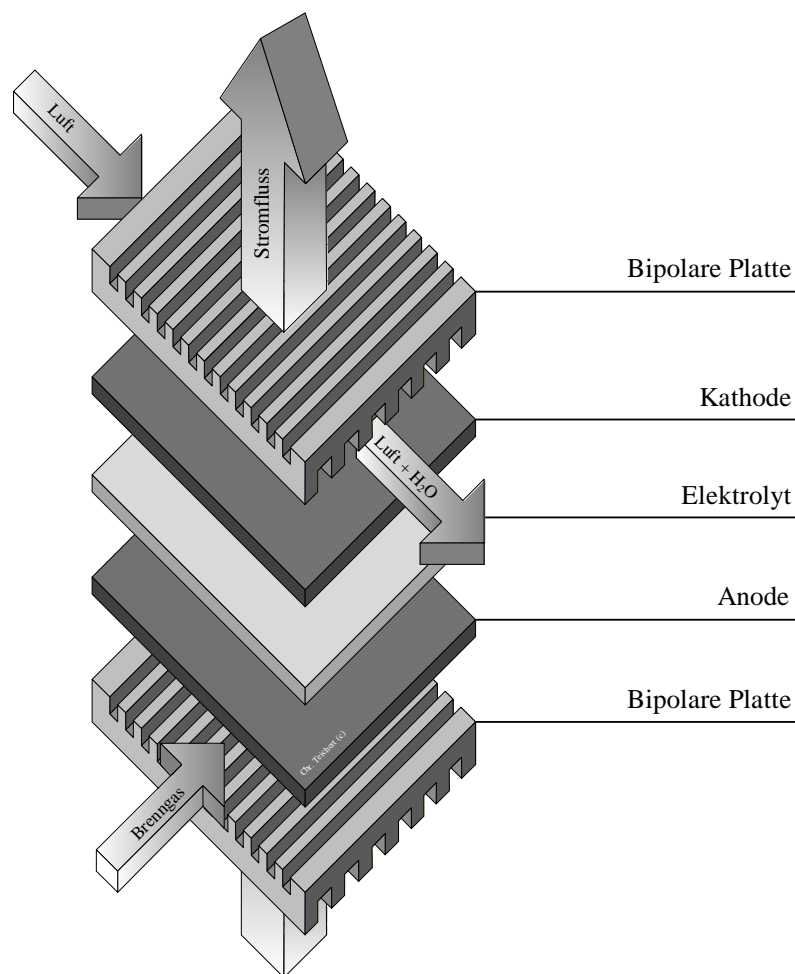


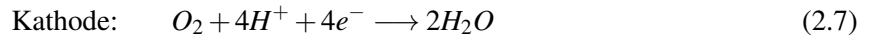
Abbildung 2.15.: Aufbau einer Brennstoffzelle [87, 32]

2.3.1.3. Funktion

Die Funktion einer PEM-Brennstoffzelle wird anhand Abbildung 2.16 beschrieben.

2. Grundlagen — Stand der Technik

Der gasförmige Wasserstoff (H) wird durch die poröse und mit einem Katalysator beschichtete Anode und der Sauerstoff (O), der sich in der Luft befindet, durch die Kathode geleitet. Bei einer PEM-Brennstoffzelle laufen anschließend folgende Reaktionen ab:



An der Anode geben zwei Wasserstoffmoleküle (H_2) zusammen vier Elektronen (e^-) ab. Dadurch werden vier Wasserstoffionen (H^+) gebildet, welche durch den Elektrolyten diffundieren können und anschließend auf die Kathode treffen. Da der Elektrolyt elektrisch nicht leitfähig ist, müssen die Elektronen den Weg über einen äußeren elektrischen Stromkreis nehmen. Zusammen mit den Wasserstoffionen und dem Sauerstoff reagieren diese zu Wasser (H_2O). Diese Reaktion kommt beim Stoppen der Zufuhr der Reaktionsgase oder beim Unterbrechen des äußeren Stromkreises zum Erliegen.

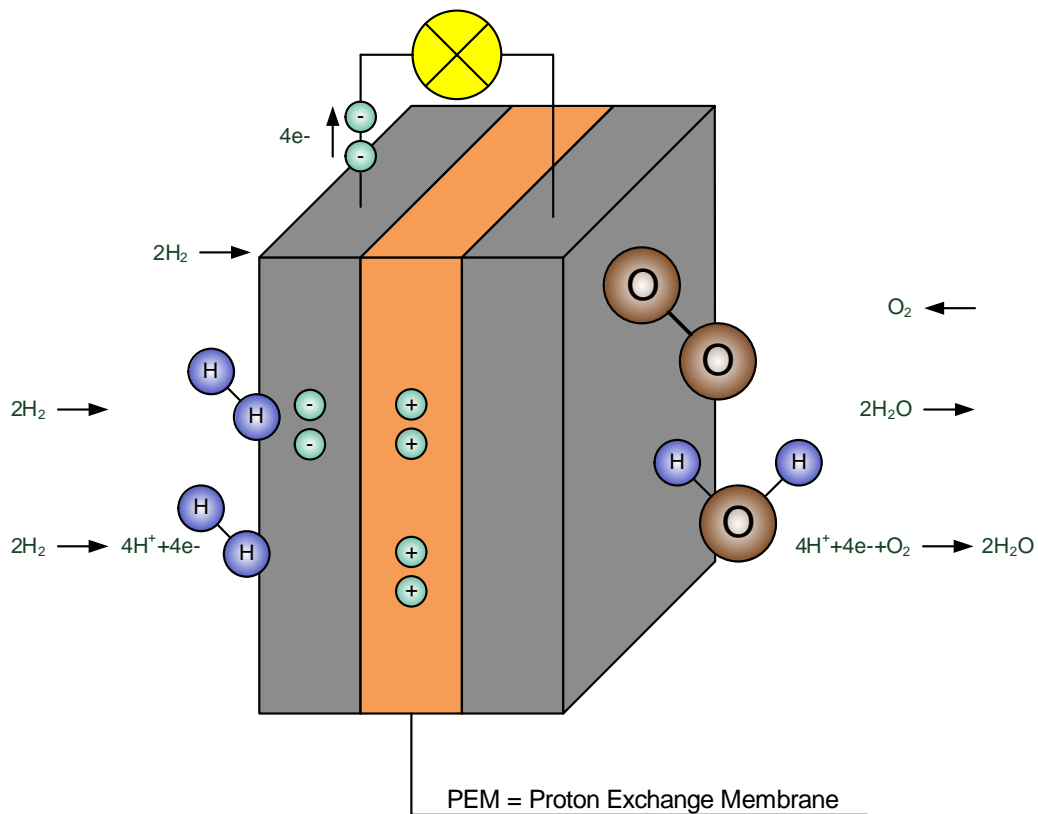


Abbildung 2.16.: Prinzipdarstellung einer Brennstoffzelle

2. Grundlagen — Stand der Technik

Die Leerlaufspannung $U_{BZ,0}$ der Brennstoffzelle kann mit der Nernstgleichung (2.9) beschrieben werden:

$$U_{BZ,0} = U_{BZ,th} + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \left\{ \frac{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right\} \quad (2.9)$$

- R Universelle Gaskonstante
- T Temperatur
- F Faradaykonstante
- n Anzahl der ausgetauschten Elektronen
- p_i Partialdrücke
- $U_{BZ,th}$ Maximal erreichbare Spannung der Brennstoffzelle

Die Ausgangsspannung U_{BZ} (vgl. Abbildung 2.17), die im Betrieb der Brennstoffzelle an den Anschlussklemmen anliegt, berechnet sich aus der Leerlaufspannung $U_{BZ,0}$ abzüglich der so genannten Überspannungen: Aktivierungsüberspannung (U_{Act}), ohmsche Spannungsabfälle (U_{Ohm}) und Konzentrationsüberspannung (U_{Conc}):

$$U_{BZ} = U_{BZ,0} - \Delta U_{Act} - \Delta U_{Ohm} - \Delta U_{Conc} \quad (2.10)$$

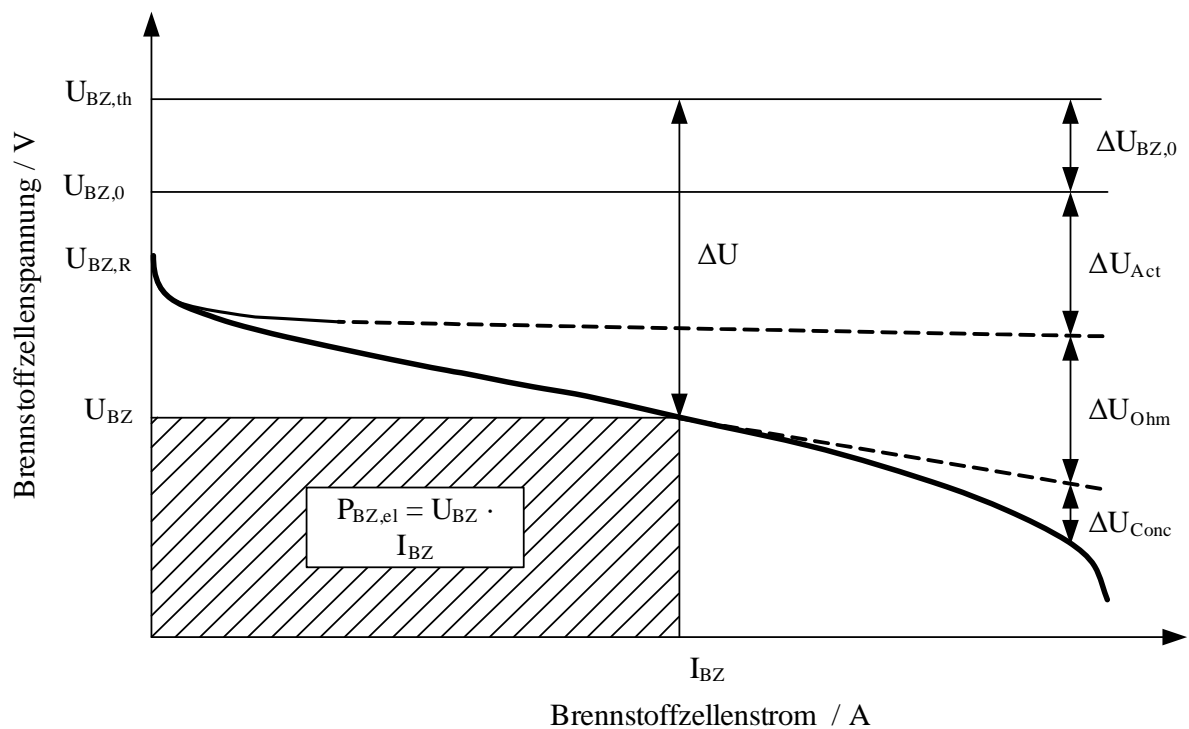


Abbildung 2.17.: Ausgangskennlinie mit Illustration eines Beispiels für I_{BZ} und U_{BZ}

Bei kleinen Strömen treten hauptsächlich Aktivierungsverluste auf, die verbunden sind mit einem Span-

2. Grundlagen — Stand der Technik

nungsabfall gemäß (U_{Act} ; vgl. Abbildung 2.18a):

$$U_{Act} = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{j}{j_0}\right) = b \cdot \log_{10} \cdot \left(\frac{j}{j_0}\right) \quad (2.11)$$

- α Durchtrittsfaktor
- j Stromdichte
- j_0 Austauschstromdichte
- b Tafelparameter

Im Nennarbeitsbereich der Brennstoffzelle dominieren die ohmschen Verluste (die den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle beeinflussen), die Spannungsabfälle (U_{Ohm} ; vgl. Abbildung 2.18b) hervorrufen, die sich wie folgt berechnen:

$$U_{Ohm} = j \cdot r_{Ohm} \quad (2.12)$$

r_{Ohm} Flächenspezifischer Widerstand der Brennstoffzelle

Die ohmschen Spannungsabfälle resultieren hauptsächlich aus dem spezifischen Elektrolytwiderstand. Mit zunehmendem Brennstoffzellenstrom nimmt ebenfalls die Konzentrationsüberspannung (U_{Conc} ; vgl. Abbildung 2.18c) zu. Diese ist zurückzuführen auf Stofftransporthemmungen, welche aus der sinkenden Konzentration des Brennstoffs resultieren gemäß [33, 34].

$$U_{Conc} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln\left(1 - \frac{j}{j_0}\right) \quad (2.13)$$

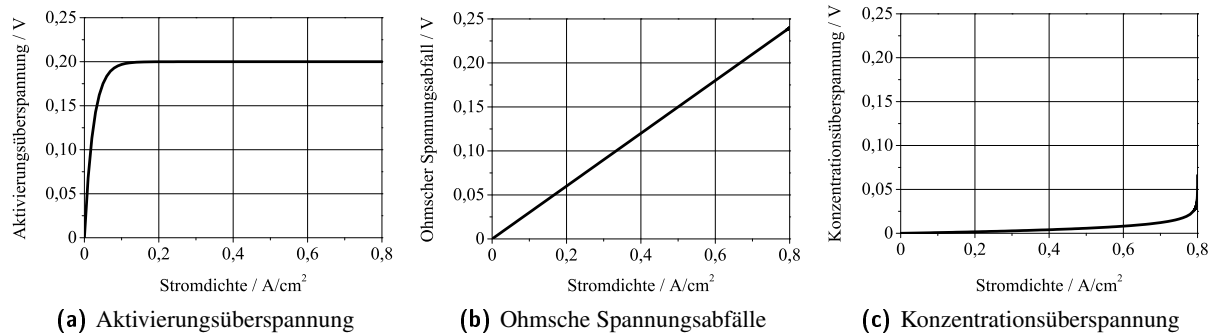


Abbildung 2.18.: Überspannungen innerhalb der Brennstoffzelle

2.3.1.4. Brennstoffzellentypen

Tabelle 2.3 und Abbildung 2.19 geben einen Überblick über unterschiedliche Brennstoffzellentypen, deren Betriebstemperatur und die im Inneren ablaufenden chemischen Reaktionen. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da es noch weitere Typen von Brennstoffzellen gibt. Im automobilen Einsatz werden PEM-Brennstoffzellen favorisiert, da diese gerade im Teillastbereich gute Wirkungsgrade aufweisen.

Tabelle 2.3.: Brennstoffzellentypen

Kurzbezeichnung	Bezeichnung
PEM-FC	Proton exchange membrane fuel cell (Membran-Brennstoffzelle)
AFC	Alkaline fuel cell (Alkalische Brennstoffzelle)
SPFC	Solid Polymer Fuel Cells (Feststoffpolymer-Brennstoffzelle)
DMFC	Direct methanol fuel cell (Direkt-Methanol-Brennstoffzelle)
PAFC	Phosphoric acid fuel cell (Phosphorsäure-Brennstoffzelle)
MCFC	Molten carbonate fuel cell (Karbonatschmelzen-Brennstoffzelle)
SOFC	Solid oxide fuel cell (Oxidkeramische Brennstoffzelle)

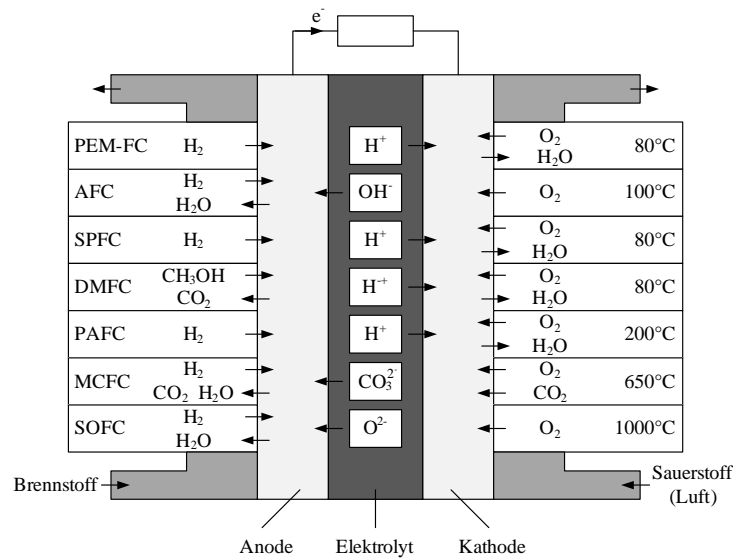


Abbildung 2.19.: Prinzipdarstellung unterschiedlicher Brennstoffzellentypen [7, 27, 35]

2.3.1.5. Vor- und Nachteile der Brennstoffzelle beim derzeitigen Stand der Technik

Im Folgenden werden die wesentlichen Vor- und Nachteile einer Brennstoffzelle gegenübergestellt. Der größte Vorteil der Brennstoffzelle ist die direkte Umwandlung chemisch gebundener Energie in elektrische Energie und das mit einem hohen Wirkungsgrad ($\eta_{BZ,max} = 94,5\%$) bei geringer Temperatur (PEM-Brennstoffzelle). Bei dieser Wandlung kommt es zu keiner Emission von Schadstoffen — bei der Verwendung von reinem Wasserstoff wird noch nicht einmal CO_2 emittiert. Zudem entstehen bei der Energiewandlung an sich keine Geräusche. Die Brennstoffzelle besitzt im Inneren keine bewegten Teile, wodurch kein Verschleiß entsteht. Diesen Vorteilen stehen auch Nachteile/Herausforderungen gegenüber die es zu beseitigen bzw. zu lösen gilt, um die Brennstoffzelle noch konkurrenzfähiger zu anderen Energiewandlern zu machen. Einer der größten Nachteile der Brennstoffzelle sind die hohen Herstellungskosten, die u. a. durch die Verwendung teurer Werkstoffe (Edelmetalle z. B. Platin) entstehen. Des Weiteren kann der hohe Wirkungsgrad auf Grund von Peripheriekomponenten, die ebenfalls Energie für den Betrieb benötigen, nicht vollständig genutzt werden. Außerdem ist die Lebenserwartung nicht zufriedenstellend, dies gilt besonders, für den mobilen Betrieb. Um die Lebenserwartung der Brennstoff-

zelle im Betrieb zu verlängern, ist es vorteilhaft der Brennstoffzelle nur statische Ströme zu entnehmen. Dadurch wird eine Platinkorrosion verhindert und irreversible Schädigungen der Elektroden und der Elektrolytmembran der Brennstoffzelle verringert. Diese Schädigungen werden auch als Alterung der Brennstoffzelle bezeichnet und verkürzen die Lebensdauer und verringern die Leistungsfähigkeit sowie den Wirkungsgrad der Zellen [36].

Zudem gibt es noch viele Herausforderung bei der Herstellung, Verteilung und Speicherung vom Brenngas Wasserstoff.

Auf Grund des hohen Wirkungsgrads ist die Brennstoffzelle, trotz ihrer noch zu lösenden Nachteile, ein interessanter Energiewandler, um einerseits elektrische Energie zu erzeugen und andererseits den bei konventioneller Erzeugung elektrischer Energie entstehenden CO_2 -Ausstoß zu verringern.

2.3.1.6. Herstellung von Wasserstoff

In Abschnitt 2.3.1.1 wurde beschrieben, dass die PEM-Brennstoffzelle Wasserstoff direkt in elektrische Energie wandeln kann. Der Energieträger Wasserstoff (H) tritt meist in der dimerisierten Form — als Wasserstoffmolekül (H_2) — auf. Dieses ist aber in der Natur nur selten vorhanden, da es schnell mit Sauerstoff (O) zu Wasser (H_2O) reagiert. Aus diesem Grund muss der Wasserstoff erst mit unterschiedlichen Methoden hergestellt werden. Im Folgenden werden unterschiedliche Herstellungsmethoden aufgezählt, die in [30] beschrieben werden:

- Elektrolyse
- Dampfreformer
- Partielle Oxidation
- Autotherme Oxidation
- Kværner-Verfahren
- Vergasung von Feststoffen
- Biochemische Herstellung
- Chemische Herstellung
- Dissoziation

Da an die Reinheit von Wasserstoff teilweise höchste Anforderungen gestellt werden, muss dieser nachträglich gereinigt werden, damit Spuren von beispielsweise Kohlenmonoxid nicht den Katalysator der Brennstoffzelle irreversibel beschädigen. In [30] sind Reinigungsverfahren beschrieben, die den Reinheitsgrad des Wasserstoffs erhöhen.

Im Anschluss an die Herstellung kann der Wasserstoff in Wasserstoffspeichern, wie Kryospeicher oder Drucktanks, gespeichert werden [37].

Aufgrund der molekularen Struktur des Wasserstoffs, stellt die Speicherung ein Problem dar. Da das Wasserstoffmolekül das kleinste ist, kann es bei einem bestehenden Druckunterschied zwischen Umgebung

und Tank eine konventionelle Werkstoffstruktur leicht durchdringen. Deshalb kommt es zu einem erheblichen Wasserstoffverlust. Ein weiteres Problem ist die große Gaskonstante des Wasserstoffs, welche die größte aller Elemente ist. Deshalb sind für die Speicherung einer großen Speichermasse ein großer Druck und eine geringe Temperatur erforderlich. Aus diesen Gründen werden mehrschichtige Spezialtanks benötigt, die einen hohen Druck ermöglichen, isoliert sind und den Wasserstoffverlust minimieren — vollständige Dichtigkeit für Wasserstoff ist nicht möglich. Dieser Verlust weist einen Wert auf, der bei aktuellen Spezialtanks bei etwa 1% pro Tag liegt. Diese geringe Menge birgt jedoch die Gefahr, dass sich im Fahrzeug ein explosionsfähiges Gasgemisch (Wasserstoff und Sauerstoff) bildet, welches aus dem Fahrzeug gepumpt werden muss, was den technischen Aufwand vergrößert. Heutzutage wird der Wasserstoff meist in flüssiger Form in kryogenen Tanks bei -253°C und einem Druck von 0,1MPa gespeichert. Diese Tanks sind im Vergleich zu Benzintanks bezogen auf die Reichweite erheblich größer [38].

2.3.2. Doppelschichtkondensator

Der Doppelschichtkondensator ist der zweite Energiespeicher im erweiterten Bordnetz. Aufgrund seiner Eigenschaften (z. B. hohe Leistungsdichte) gibt es mehrere Einsatzmöglichkeiten. Dazu zählt u. a. die Deckung von auftretenden Lastspitzen.

2.3.2.1. Allgemeines

Die Speicherung von elektrischer Energie durch Ladungstrennung ist seit der Entwicklung der sogenannten Leydener Flasche Mitte des 18. Jahrhunderts bekannt. Diese Flasche wird auch als erster Kondensator bezeichnet. Ein Doppelschichtkondensator (DSK, engl. double layer capacitor - DLC; firmenspezifisch auch Supercap, Ultracap oder Goldcap genannt) ist ein Speicher für elektrische Energie, dessen Prinzip auf dem Helmholtz-Effekt beruht. Der Doppelschichtkondensator könnte die in einem Bordnetz auftretenden dynamischen Belastungen – z. B. Starten des Verbrennungsmotors – von der Batterie übernehmen und somit ihre Lebensdauer erhöhen. Außerdem könnte die Kapazität der Batterie geringer ausfallen, wodurch das Batterievolumen abnehmen würde, dies macht die Batterie kleiner und vor allem leichter [39]. Ein Doppelschichtkondensator ermöglicht bis zu 500.000 vollständige Lade- und Entladezyklen und hat eine Lebensdauer von bis zu 20 Jahren.

Doppelschichtkondensatoren sind Speicher für kurze Lade- und Entladevorgänge. Ihr Wirkungsgrad bei Ladung und Entladung liegt bei 95%.

Damit der Doppelschichtkondensator konkurrenzfähig wird zur Batterie müssen bei mindestens gleichem Energiegehalt die Kosten gesenkt werden [40, 88, 41].

Die Kapazität eines Kondensators ist abhängig von der Größe der Oberfläche A und vom Abstand d seiner Elektroden. Für einen Plattenkondensator gilt [42]:

$$C = \frac{A \cdot \epsilon_0}{d} \text{ mit } \epsilon_r = 1 \text{ (Vakuum)} \quad (2.14)$$

Somit ist die Kapazität direkt proportional zur Oberfläche A und indirekt proportional zum Abstand d der Elektroden. Daraus folgt, dass zur Vergrößerung der Kapazität C die Oberfläche vergrößert, bzw. der

Abstand der Elektroden verkleinert werden muss.

2.3.2.2. Aufbau

Der Kondensator besteht aus zwei Elektroden, zwischen denen sich ein Elektrolyt befindet (vgl. Abbildung 2.21). Anders als bei Batterien besteht bei einem Doppelschichtkondensator die Anode und die Kathode aus dem selben Material. Dadurch hat der Doppelschichtkondensator theoretisch keine vorgegebene Polarisierung. Wenn der Doppelschichtkondensator einmal in eine bestimmte Richtung aufgeladen wurde, sollte man diese Polarisierung aus technischen Gründen beibehalten, damit die Lebenserwartung nicht verkürzt wird, durch auftretende unerwünschte Nebenreaktionen, die zu Schäden führen. Aus diesem Grund ist die Polarisierung auf dem Gehäuse aufgedruckt (vgl. Abbildung 2.20) [89].



Abbildung 2.20.: Doppelschichtkondensator der Firma Maxwell

Im ungeladenen Zustand sind die Ionen gleichmäßig im Elektrolyten verteilt (s. Abbildung 2.22). Bei einem Doppelschichtkondensator wird durch den Einsatz von porösen Elektroden (z. B. Kohlenstoff/ Aktivkohle — gute Polarisierbarkeit), die sich in einem Elektrolyten befinden die Oberfläche stark vergrößert. Dabei werden Oberflächen erreicht, die Werte von $1000...3000\text{m}^2/\text{g}$ aufweisen. Bei einer typischen spezifischen Kapazität von $10\mu\text{F}/\text{cm}^2$ entspricht dies $100...300\text{F}/\text{g}$ [43].

Die Aktivkohle wird mit Hilfe von organischen Bindemitteln auf eine Aluminiumfolie aufgetragen. Anschließend werden die so entstandenen Elektroden paarweise — getrennt durch einen Separator (Abstandhalter), damit Berührungen und somit Kurzschlüsse vermieden werden — paarweise aufgewickelt und mit Zuleitungen versehen. Der Separator besteht aus einem porösen, nichtleitenden und ionendurchlässigen Material. Im letzten Arbeitsschritt wird die Anordnung mit einem Elektrolyten im Vakuum getränkt und in ein Gehäuse eingesetzt und verschlossen [41].

Gleichung (2.14) ist nur im Vakuum gültig. Wenn in dem feldfüllenden Zwischenraum ein Dielektrikum eingebracht wird, muss Gleichung (2.14) mit einem Faktor ϵ_r multipliziert werden — der Permittivitätszahl. Bei einem Doppelschichtkondensator ist aber kein Dielektrikum vorhanden. Die Speicherfunktion wird durch die elektrische Doppelschicht übernommen, die sich an den Grenzflächen zwischen zwei Medien ausbildet [41].

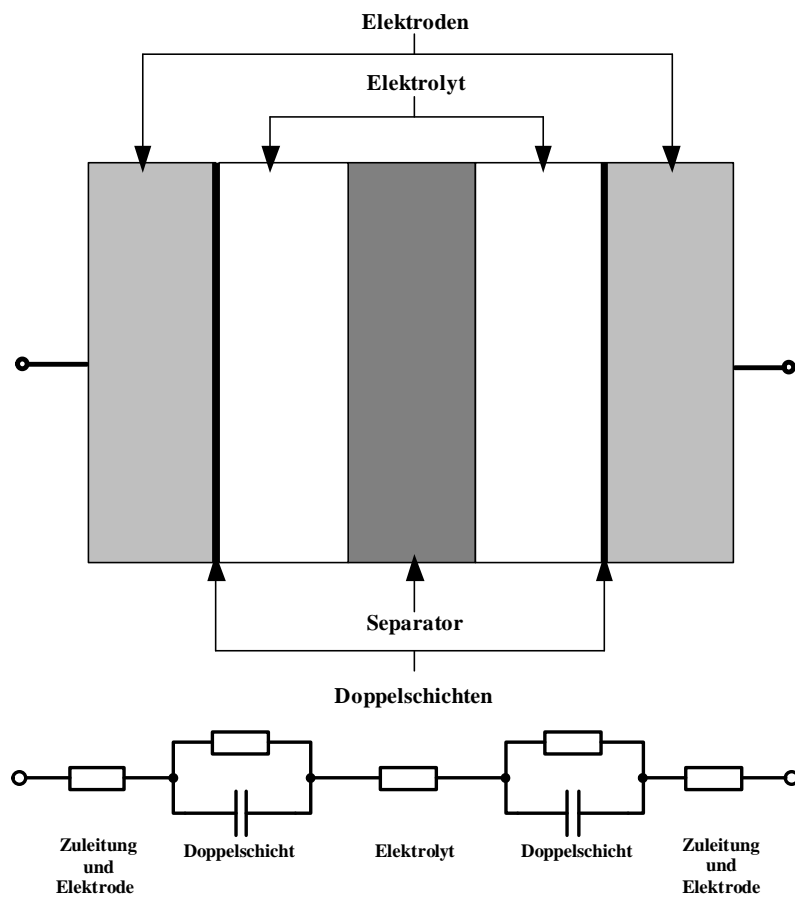


Abbildung 2.21.: Aufbau des Doppelschichtkondensators und einfaches Ersatzschaltbild [41]

2.3.2.3. Funktion

Wenn eine Spannung an den Kondensator angelegt wird, wandern die negativen Ionen zur positiven Elektrode, die positiven Ionen zur negativen Elektrode. Es bildet sich eine Doppelschicht aus, deren Dicke weitestgehend vom Ionendurchmesser abhängig ist (wenige Å), dadurch können große Kapazitäten erreicht werden [22].

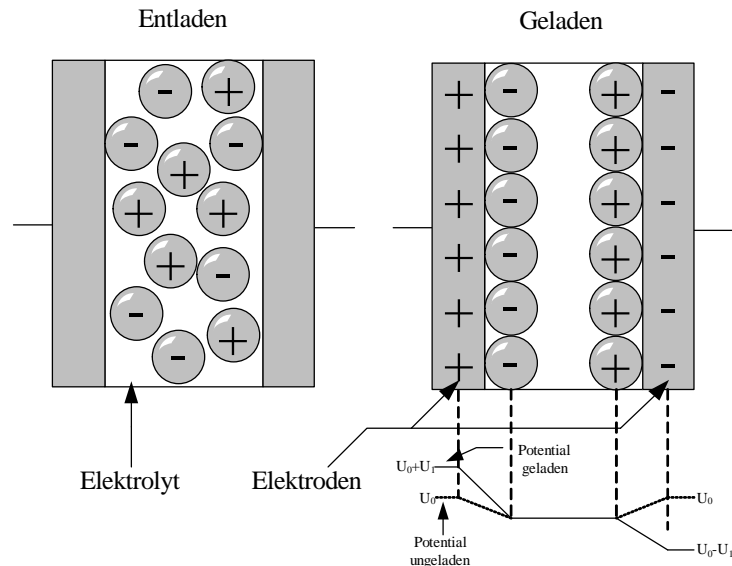


Abbildung 2.22.: Funktionsprinzip eines Doppelschichtkondensators [44]

Aufgrund des organischen Elektrolyten (spezielle Salze) sind Spannungen zwischen 2...3V pro Zelle zulässig. Oberhalb dieser Spannung beginnen chemische Reaktionen, wodurch sich Gase bilden, die den Doppelschichtkondensator zerstören [88]. Durch Reihenschaltung mehrerer Kondensatoren sind höhere Spannungen möglich, wodurch sich aber die Gesamtkapazität verringert. Dieser Speicher ermöglicht aufgrund seiner großen Leistungsdichte eine schnelle Energieaufnahme und -abgabe. Die große Leistungsdichte resultiert aus dem geringen Innenwiderstand ($R_{i,Kon}$) des Doppelschichtkondensators, der im $m\Omega$ -Bereich je Einzelkondensator liegt. Im Gegensatz zur Batterie besitzt der Doppelschichtkondensator jedoch nur eine geringe Energiedichte. Das folgende Beispiel zeigt den deutlichen Unterschied der Energiedichte zwischen Doppelschichtkondensator und Bleibatterie.

Batterie: Varta Bleisäure 4Ah/12V

Kondensator: Maxwell 160F/48V

Die in einem elektrischen Feld im Kondensator gespeicherte Energie berechnet sich wie folgt:

$$E_{Kon} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{Kon}^2 \quad (2.15)$$

Die maximale Energie $E_{Kon,max}$ des Kondensators im o. g. Beispiel beträgt somit:

2. Grundlagen — Stand der Technik

$$E_{Kon,max} = \frac{1}{2} \cdot 160F \cdot (48V)^2 = 184,3kWs. \quad (2.16)$$

Bei einer Entladung des Kondensators von 48V auf 12V beträgt die entnommene Energie:

$$\Delta E_{Kon,48V \rightarrow 12V} = \frac{1}{2} \cdot 160F \cdot \left((48V)^2 - (12V)^2 \right) = 172,8kWs \quad (2.17)$$

Das bedeutet, dass 93,75% der Energie des vollständig geladenen Kondensators entnommen werden kann, wenn der Kondensator eine Restspannung von 12V aufweist.

Massebezogen:

Batterie-Energiedichte e_{Bm} :

$$e_{Bat,m} = \frac{E_{Bat}}{m_{Bat}} = \frac{48Wh}{1,7kg} \quad (2.18)$$

$$e_{Bat,m} = 28,24 \frac{Wh}{kg} \quad (2.19)$$

Volumenbezogen:

Batterie-Energiedichte e_{BV} :

$$e_{Bat,V} = \frac{E_{Bat}}{V_{Bat}} = \frac{48Wh}{857,96cm^3} \quad (2.23)$$

$$e_{Bat,V} = 55,95 \frac{kWh}{m^3} \quad (2.24)$$

Kondensator-Energiedichte e_{Km} :

$$e_{Kon,m} = \frac{E_{Kon}}{m_{Kon}} = \frac{51,2Wh}{14,2kg} \quad (2.20)$$

$$e_{Kon,m} = 3,61 \frac{Wh}{kg} \quad (2.21)$$

$$\frac{e_{Bat,m}}{e_{Kon,m}} = 7,82 \quad (2.22)$$

Kondensator-Energiedichte e_{KV} :

$$e_{Kon,V} = \frac{E_{Kon}}{V_{Kon}} = \frac{51,2Wh}{12409,28cm^3} \quad (2.25)$$

$$e_{Kon,V} = 4,13 \frac{kWh}{m^3} \quad (2.26)$$

$$\frac{e_{Bat,V}}{e_{Kon,V}} = 13,56 \quad (2.27)$$

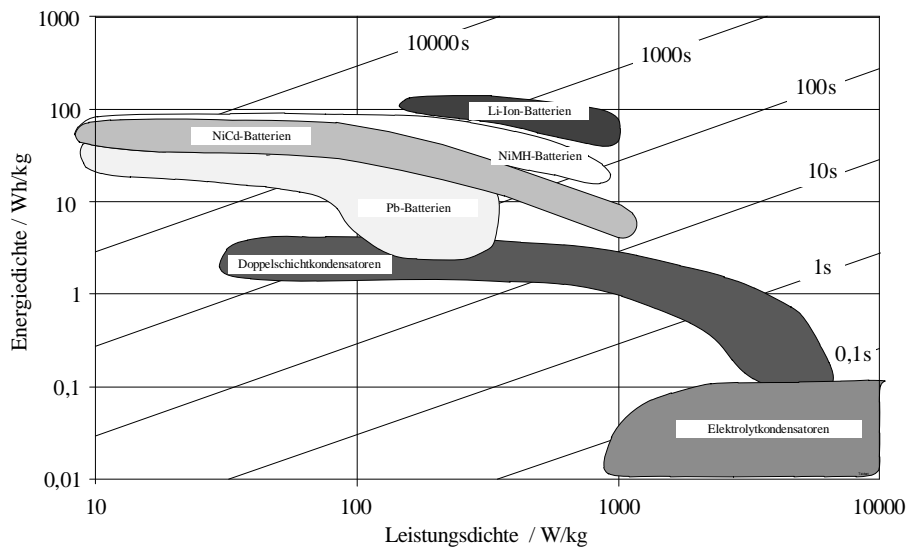


Abbildung 2.23.: Ragonedigramm [45]

Abbildung 2.23 bestätigt die Aussage der Gleichungen (2.18) bis (2.27). Sie zeigt auch, dass die Batterietypen NiCd, NiMH und Li-Ion noch höhere Energie- und Leistungsdichten aufweisen als Kondensatoren allgemein und Bleibatterien.

2.3.3. Optionale höhere Spannungsebene

Die Verwendung von leistungselektronischen DC/DC-Wandlern — die im folgenden Abschnitt erläutert werden — eröffnet auch die Möglichkeit, eine höhere Spannungsebene zur Verfügung zu stellen. Diese ist in der Lage mit den u. g. Vor- und Nachteilen leistungsstarke elektrische Komponenten mit Energie zu versorgen, was z. B. wichtig für mechanische Aktoren ist. Zudem sind neue Komponenten realisierbar, die in einem 12V-Bordnetz nicht umsetzbar wären. Zu diesen Innovationen zählen z. B. der elektrische Ventiltrieb und X-by-Wire.

Im Folgenden sollen Vor- und Nachteile einer erhöhten Spannungsebene aufgezählt werden.

Auf Grund der höheren Spannung — im Vergleich zur 12V-Spannungsebene — können leistungsstarke Verbraucher (z. B. Heizungen) mit einem verringerten Strom versorgt werden. Da sich der Laststrom verringert, könnten Leitungsquerschnitte der Leitungen des Bordnetzes verkleinert werden. Dies führt zu einer Einsparung von Rohstoffen (z. B. Kupfer). Damit sind eine Reduzierung des Gewichts und eine Senkung von Kosten verbunden.

Für Halbleiter-Leistungsbaulemente bedeutet eine Vergrößerung der Versorgungsspannung, dass die Chipflächen reduziert werden können. Außerdem ist bei einer Spannungserhöhung mit einem steigenden Wirkungsgrad zu rechnen, da u. a. die Verluste in den Zuleitungen bei der Energieversorgung verringert werden, was zur Einsparung von Kraftstoff führt.

Den genannten Vorteilen stehen auch Nachteile gegenüber, zu ihnen zählt u. a. die Möglichkeit der Lichtbogenentstehung beim Ausschalten induktiver Lasten. Des Weiteren können sich die Lebenserwartungen von Glühlampen verkürzen, da der Draht der Wendel einen kleineren Querschnitt aufweisen muss. Bei ausschließlicher Verwendung einer höheren Spannungsebene müssten alle herkömmlichen Verbraucher neu entwickelt werden, was hohe Kosten zur Folge hätte. Für 12V-Verbraucher müsste zusätzlich ein leistungselektronischer Wandler in das Fahrzeug integriert werden. Zudem treten bei höheren Spannungen verstärkte Korrosionen an Steckverbindungen auf.

2.4. Leistungselektronische Stellglieder

2.4.1. Grundlagen

In elektrischen Netzen oder Systemen können unterschiedliche Spannungsformen (Gleich- oder Wechselspannung) und -amplituden auftreten. Zur Anpassung dieser unterschiedlichen Spannungen — z. B. Anpassung an unterschiedliche Verbraucher — werden leistungselektronische Schaltungen verwendet. Die Aufgabe dieser Schaltungen ist die möglichst verlustarme Umformung sowie Steuerung und Regelung elektrischer Energie unter zur Hilfenahme von Halbleiter-Leistungsbaulementen.

„Stromrichter sind Einrichtungen zum Umformen oder Steuern elektrischer Energie unter Verwendung von Stromrichterventilen (DIN 41 750, Bl. 1). Mit Stromrichtern lässt sich also der Energiefluss zwi-

schen verschiedenen Stromsystemen steuern. Bei der Kupplung von Wechsel- und Gleichstromsystemen ergeben sich vier Grundfunktionen.“ (s. Abbildung 2.24) [46]

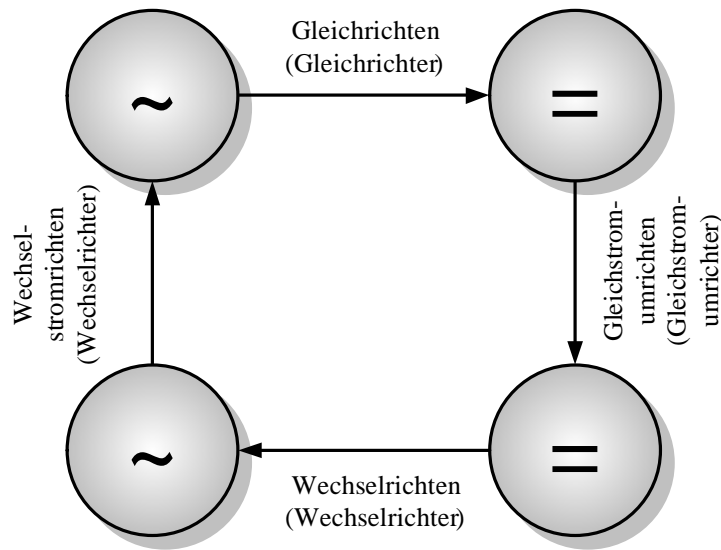


Abbildung 2.24.: Arten der Energieumformung [46]

Die vier Umwandlungsgrundfunktionen der elektrischen Energieumwandlungen werden von unterschiedlichen Stromrichtern vorgenommen, auf die in den folgenden Abschnitten eingegangen wird. Grundlage der Stromrichterschaltungen sind Leistungsbaulemente (z. B. MOSFET oder IGBT).

2.4.2. Halbleiter-Leistungsbaulemente

Die Aufgabe der Leistungsbaulemente ist im Allgemeinen die Funktion als Schalter. Dabei müssen sie je nach Anwendung folgende Anforderungen erfüllen [47]:

- hohe Sperrfähigkeit
- hohe Stromtragfähigkeit
- hohe Schaltleistung
- Einsatz bei hohen Schaltfrequenzen ermöglichen
- belastbar bei steilen Spannungsflanken du/dt und Stromflanken di/dt
- geringe Verluste
- elektrische Isolation vom Kühlkörper
- selbstschützend (Überlast, Kurzschluss)
- potenzialgetrennte, leistungsarme Ansteuerung
- geringes Volumen, geringes Gewicht

- hohe Betriebstemperatur (150°C, 200°C angestrebt)
- sehr hohe Wärmeleitfähigkeit
- hohe Lebenserwartung (Zuverlässigkeit)
- usw.

2.4.2.1. Diode

Die Diode ist ein nicht steuerbares, nichtlineares Bauelement und somit die einfachste Variante eines elektrischen Ventils. Sie besitzt zwei Elektroden, die mit Anode und Kathode bezeichnet werden. Dabei bestehen die Anode aus einem p-dotierten und die Kathode aus einem n-dotierten Halbleiter. Aus diesen zwei Materialien entsteht beim Kombinieren ein pn-Übergang. Dieses Konstrukt ermöglicht die Funktion eines elektrischen Ventils, indem die Diode den Strom lediglich in eine Richtung fließen lässt und somit beispielsweise zum Gleichrichten von Wechselspannung eingesetzt werden kann [48, 49].

2.4.2.2. MOSFET

Der MOSFET (**M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor) ist der Transistor mit der größten Bedeutung im unteren Spannungs- und Leistungsbereich. Er ermöglicht die höchsten Schaltfrequenzen unter den Leistungsbaulementen. In Kfz-Anwendungen ist der MOSFET allen anderen Leistungsschaltern deutlich überlegen, da er einen geringen Durchlasswiderstand im unteren Spannungsbereich aufweist. Aus diesem Grund wird er dort hauptsächlich eingesetzt. Abbildung 2.25 zeigt das Schaltzeichen des N-Kanal MOSFET.

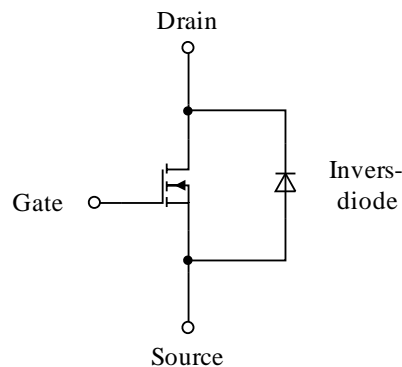


Abbildung 2.25.: Schaltzeichen des N-Kanal MOSFET

Ein vertikaler Leistungs-MOSFET besitzt die Anschlüsse **S**ource, **D**rain, und **G**ate. Aufbaubedingt besitzt der MOSFET immer eine Inversdiode und kann grundsätzlich in vier unterschiedlichen Varianten hergestellt werden [50]:

- selbstleitend
- selbstsperrend

- P-Kanal-Typ
- N-Kanal-Typ.

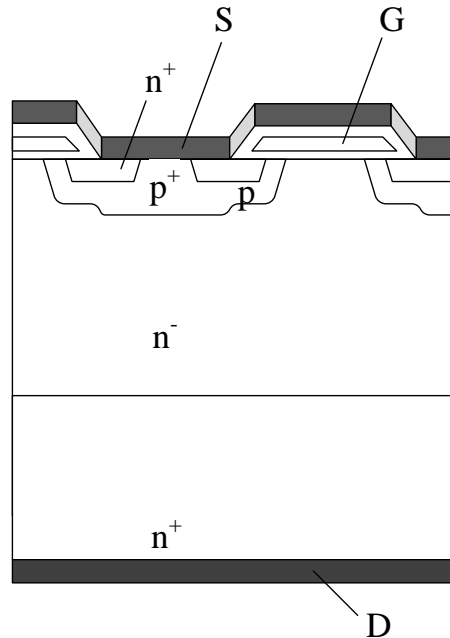


Abbildung 2.26.: Aufbauschema des MOSFET [51]

In Abbildung 2.26 ist der Aufbau eines MOSFET dargestellt. Die Basis eines MOSFET ist in einzelne p-Wannen untergliedert. In dieser befinden sich die n⁺-Zonen (Source). Durch eine Steuerspannung am Gate wird ein n-Kanal erzeugt. Der Gate-Bereich ist durch eine Isolationsschicht (i. a. SiO₂) getrennt [47].

Die Ansteuerung eines MOSFET erfolgt durch eine Steuerspannung im Volt-Bereich, die zwischen Gate und Source angelegt wird. Die Höhe dieser Spannung bestimmt den Widerstand zwischen Drain und Source (spannungsgesteuerter Widerstand). In leistungselektronischen Schaltungen wird der MOSFET meist als Schalter eingesetzt, das bedeutet, dass der MOSFET vollständig leitend (mit restlichem R_{DSon} im mΩ-Bereich) oder vollständig gesperrt ist (es fließt lediglich ein kleiner Leckstrom). Ein weiterer Vorteil des MOSFET ist die im stationären Zustand nicht erforderliche Ansteuerleistung. Lediglich beim Schalten müssen im Inneren die vorhandenen parasitären Kapazitäten umgeladen werden, wodurch Gateströme entstehen.

Außerdem weist der MOSFET eine gute Robustheit gegen den Avalanche-Effekt auf, solange die maximale Avalanche-Energie nicht überschritten wird [50].

2.4.2.3. IGBT

Der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) kommt häufig zum Einsatz bei Anwendungen mit höherer Spannung. Er ist in der Lage, bei einer hohen Sperrspannung einen großen Strom zu schalten und benötigt dafür lediglich eine geringe Ansteuerleistung. Abbildung 2.27 zeigt das Schaltzeichen eines IGBT.

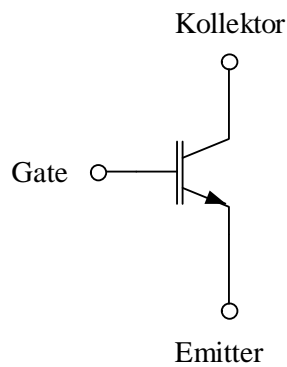


Abbildung 2.27.: Schaltzeichen des IGBT

Der IGBT vereinigt die Vorteile des MOSFET (Spannungssteuerung) und eines Bipolartransistors (hohe Stromdichten). Bei Auslegung für höhere Sperrspannungen weisen die bipolar leitenden IGBTs deutlich geringere Durchlaßspannungen bei allerdings geringeren Schaltgeschwindigkeiten auf als die unipolar leitenden MOSFETs; erstere werden daher für Sperrspannungen ab 600V ... 6500V bevorzugt eingesetzt. Das Haupteinsatzgebiet des IGBT liegt bei größeren Leistungen (>100W) und nicht zu geringen Spannungen (>100V).

Abbildung 2.28 zeigt den Aufbau eines IGBT. Einen IGBT kann man sich in einer stark vereinfachten Betrachtung als MOSFET vorstellen, bei dem die n^+ -Zone auf der Drain-Seite durch eine p-Zone ersetzt wurde [47].

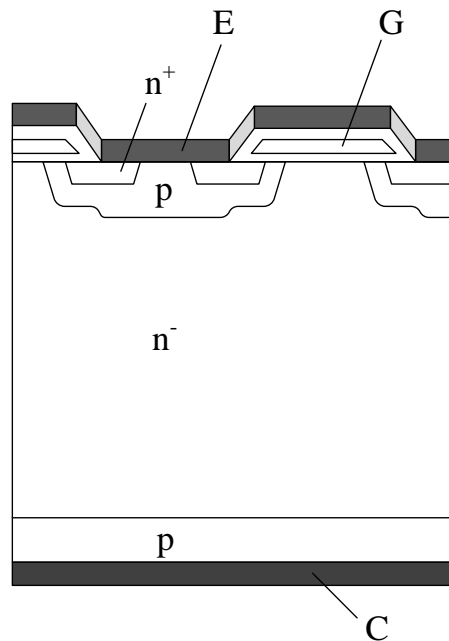


Abbildung 2.28.: Aufbauschema des IGBT [47]

In Abbildung 2.29 ist das vereinfachte Ersatzschaltbild des IGBT dargestellt [50].

Sollte die Leistung sehr groß sein, werden weiterhin Thyristoren eingesetzt, die hier nicht weiter behan-

delt werden sollen, aber beispielsweise in [52, 53] ausführlich betrachtet werden.

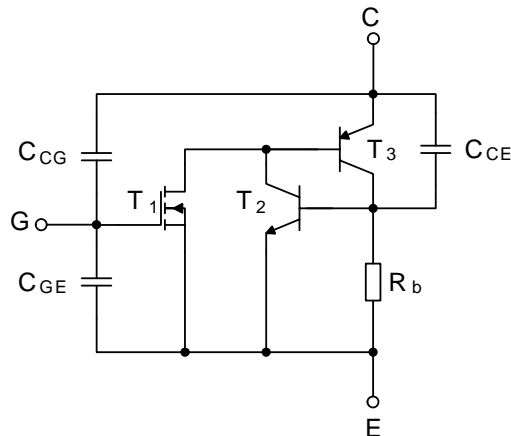


Abbildung 2.29.: Ersatzschaltbild des IGBT

2.4.3. Leistungselektronische Grundsaltungen

2.4.3.1. Gleichstromsteller

Die Aufgabe von Gleichstromstellern, die auch als DC/DC-Wandler bezeichnet werden, ist die Umformung der Eingangsgleichspannung in eine Ausgangsgleichspannung mit einem anderen Mittelwert (eventuell mit einer umgekehrten Polarität) $U_1 \neq U_2$ [54, 55].

Im Folgenden werden drei Gleichstromsteller vorgestellt (s. Abbildung 2.30):

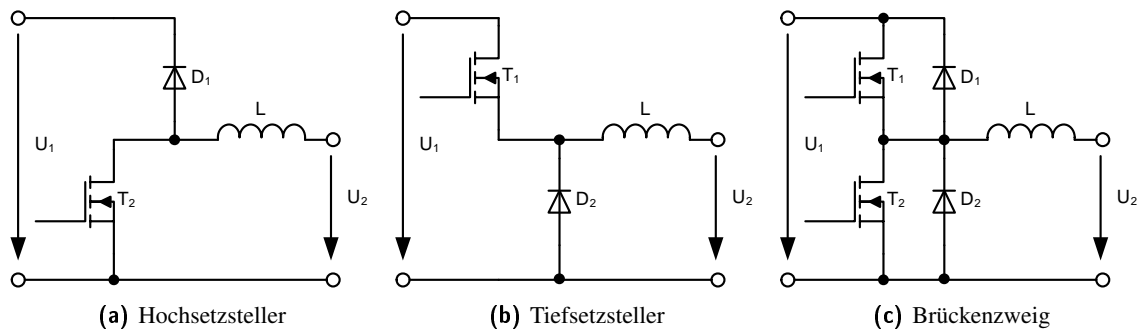


Abbildung 2.30.: DC/DC-Wandler

Hochsetzsteller Die Schaltung in Abbildung 2.30a ermöglicht das Heraufsetzen einer Gleichspannung. Sie wird als Hochsetzsteller, Hochsetz-Gleichstromsteller oder Boost Converter bezeichnet. Ausgehend von der Energieflussrichtung stellt bei der Darstellung in dieser Abbildung die rechte Seite die Eingangsseite und die linke Seite die Ausgangsspannung der Schaltung dar.

Um die Eingangsgleichspannung heraufzusetzen, wird der Transistor ein- und ausgeschaltet, wodurch die Induktivität sich periodisch auf- und abmagnetisiert. Die Ausgangsspannung des Hochsetzstellers berechnet sich für den stationären, nichtlückenden Betrieb zwischen zwei Spannungsquellen nach [56,

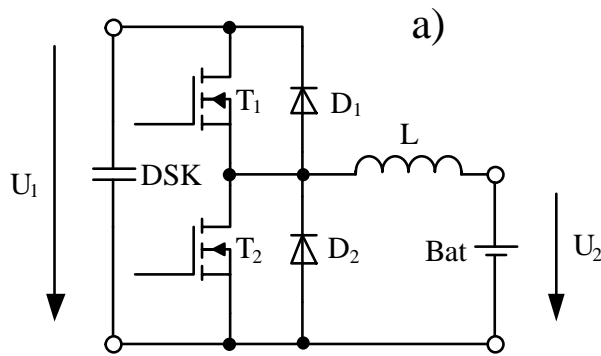


Abbildung 2.31.: Zusammensetzung des Brückenzeigs aus Tief- und Hochsetzsteller

57]:

$$U_1 = U_2 \cdot \frac{t_{ein} + t_{aus}}{t_{aus}} \geq U_2 \quad (2.28)$$

Tiefsetzsteller Die Schaltung in Abbildung 2.30b ermöglicht das Herabsetzen einer Gleichspannung (Energieflussrichtung von links nach rechts). Sie wird als Tiefsetzsteller, Tiefsetz-Gleichstromsteller oder Buck Converter bezeichnet.

Zum Herabsetzen der Eingangsgleichspannung U_1 wird der Transistor periodisch ein- und ausgeschaltet, wodurch sich über der Diode D_2 eine pulsierende Gleichspannung mit einem kleineren arithmetischen Mittelwert ergibt. Die Ausgangsspannung berechnet sich wie folgt [56, 57]:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{t_{ein}}{t_{ein} + t_{aus}} \leq U_1 \quad (2.29)$$

Brückenzeig Der Brückenzeig (s. Abbildung 2.30c) ist die Kombination aus Hoch- und Tiefsetzsteller. Er ermöglicht einen bidirektionalen Energiefluss. Somit können beispielsweise Energiespeicher mit einer höheren (Batterien in Reihe geschaltet) oder variablen Spannung (Doppelschichtkondensator) an eine Sammelschiene mit einer geringeren Spannung angeschlossen werden. Der Brückenzeig arbeitet als Hochsetzsteller in die eine Richtung und als Tiefsetzsteller in die andere.

Das Beispiel der Gleichstromsteller zeigt, dass es in der Leistungselektronik sowohl uni- als auch bidirektionale Schaltungstopologien gibt.

Die Spannung des Doppelschichtkondensators ändert sich mit dem Energiegehalt. Aus diesem Grund kann der Doppelschichtkondensator nicht direkt an das Bordnetz angeschlossen werden, sondern muss über ein leistungselektronisches Stellglied versorgt werden. Für den automobilen Einsatz eignet sich hierfür ein Brückenzeig, da er lediglich über eine geringe Bauteilanzahl verfügt und einfach zu steuern ist. Abbildung 2.31 zeigt die Grundschiung des Brückenzeigs, der sich aus einem Tiefsetzsteller und einem Hochsetzsteller zusammensetzt. Der Hochsetzsteller wird benötigt, um den Kondensator aufzuladen, der Tiefsetzsteller passt die höhere Kondensatorspannung der Bordnetzspannung an.

2.4.3.2. Wechselrichter

Ein Wechselrichter (s. Abbildung 2.32) formt die Eingangsgleichspannung U_{Bat} in eine Wechselspannung U_{Gen} mit einer einstellbaren Frequenz $f_1 = f_{Gen}$ um [55]. Mit einem Wechselrichter können Drehstromverbraucher (z. B. Asynchron- oder Synchronmaschinen) aus einer Gleichspannungsquelle (Batterie) versorgt werden.

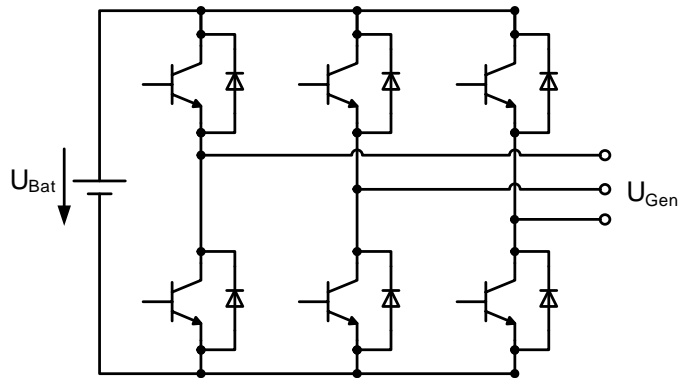


Abbildung 2.32.: Wechselrichter

2.4.3.3. Kombination leistungselektronischer Schaltungen

Durch die Kombination mehrerer leistungselektronischer Grundschaltungen ist es möglich, weitere Schaltungen abzuleiten. Beispielsweise entsteht durch Zusammensetzen der Grundschaltungen eines Gleichrichters und eines Wechselrichters ein Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis. Auf diese Weise können eine Vielzahl weiterer Schaltungen entworfen werden, die die elektrischen Parameter in erforderlicher Weise anpassen können und dies bei einem sehr hohen Wirkungsgrad $\eta \rightarrow 1$. Der hohe Wirkungsgrad sorgt dafür, dass die leistungselektronischen Komponenten wenig Verlustleistung produzieren und somit den Energiehaushalt des Bordnetzes so gut wie nicht belasten.

2.4.3.4. Leistungselektronische Schaltungen mit Transformator

Die bislang beschriebenen Schaltungen waren ohne einen Transformator ausgeführt. Im Folgenden wird eine mögliche Schaltung vorgestellt, die über einen Transformator verfügt. Abbildung 2.33 zeigt als Beispiel einen Sperrwandler (vgl. Hochsetzsteller - Abschnitt 2.4.3.1). Ein großer Vorteil dieser Schaltung mit Transformator — gegenüber den Schaltungen ohne Transformator — ist das über die Windungszahlen zu beeinflussende Übersetzungsverhältnis.

Ein weiterer großer Vorteil einer leistungselektronischen Schaltung mit Transformator ist die galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärseite, was ein wichtiger Sicherheitsaspekt ist, da dadurch Hochvoltbordnetze von Niedervoltbordnetzen galvanisch getrennt werden können.

Außerdem ist es möglich, durch zusätzliche Sekundärwicklungen mehrere Ausgangsspannungen zur Verfügung zu stellen. Eine weitere Schaltung mit einem Transformator ist der Durchflusswandler (vgl. Tiefsetzsteller - Abschnitt 2.4.3.1 auf Seite 40).

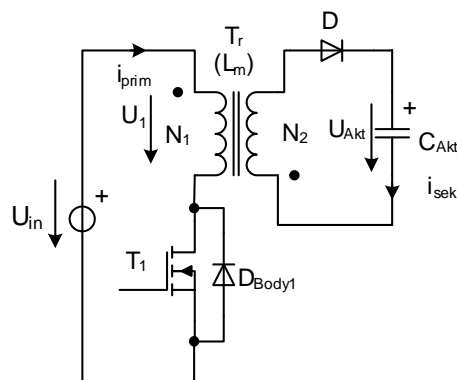


Abbildung 2.33.: Sperrwandler

2.5. Fahrzyklen

Fahrzyklen dienen in der Autoindustrie der reproduzierbaren Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und Emissionsausstoß eines Fahrzeugs. Weltweit gibt es unterschiedliche, normierte Fahrzyklen. Diese werden auf dem Rollenprüfstand — bei PKW — oder auf dem Motorenprüfstand — bei Nutzfahrzeugen über 3,5t — abgefahren. Zusätzlich zum Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf des Fahrzyklusses sind außerdem Randbedingungen — z. B. Schaltzeitpunkte — definiert. Im Folgenden werden unterschiedliche Fahrzyklen aus Europa, Japan und den USA erläutert, die der Simulation (s. Kapitel 3) als Basis für reproduzierbare Ergebnisse dienen.

2.5.1. EU NEFZ

Der NEFZ (Neue Europäische Fahrzyklus, vgl. Abbildung 2.34) ist der europäische Standardzyklus zur Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsmessung. Er besteht aus vier aufeinanderfolgenden synthetischen innerstädtischen Phasen (UDC, Urban Driving Cycle) und einer synthetischen außerstädtischen Phase (EUDC, Extra Urban Driving Cycle) [58, 59].

2.5.2. USA FTP 72

Der FTP 72 (Federal Test Procedure 72, s. Abbildung 2.35) auch bekannt als UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) wurde in den 1970er Jahren entwickelt. Hierzu wurden Messungen im Kalifornischen Los Angeles (USA) während des morgendlichen Berufsverkehrs durchgeführt. Der FTP 72 soll einen Stadtzyklus mit häufigen Stoppphasen wiedergeben[58].

2.5.3. USA FTP 75

Der FTP 75 (Federal Test Procedure 75, s. Abbildung 2.36) ist eine Erweiterung des FTP 72. Die ersten 1365 Sekunden gleicht der FTP 75 dem FTP 72. Anschließend wiederholt sich der FTP für weitere 505 Sekunden. Der FTP 75 wird in drei Phasen unterteilt, die sich aus unterschiedlichen Geschwindigkeitsverläufen zusammensetzen [58]:

2. Grundlagen — Stand der Technik

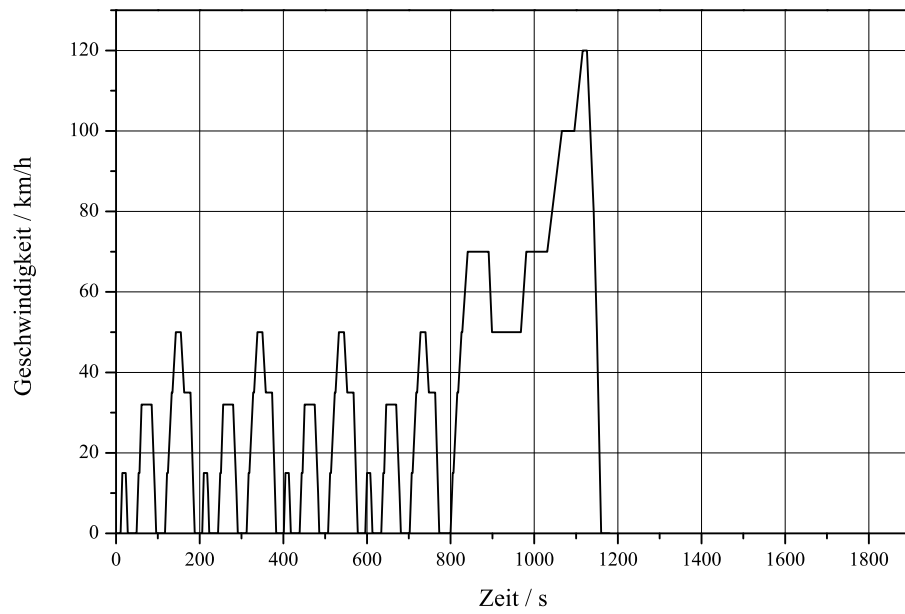


Abbildung 2.34.: Fahrzyklus: EU NEFZ

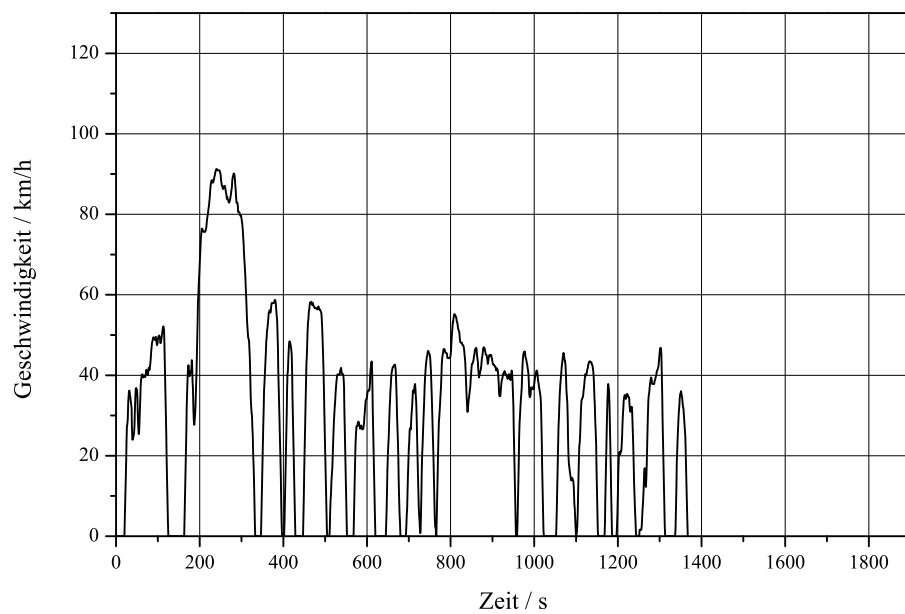


Abbildung 2.35.: Fahrzyklus: USA FTP 72

2. Grundlagen — Stand der Technik

- ct-Phase – cold transient (505 Sekunden)
- s-Phase – stabilized (860 Sekunden)
- ht-Phase – hot transient (505 Sekunden)

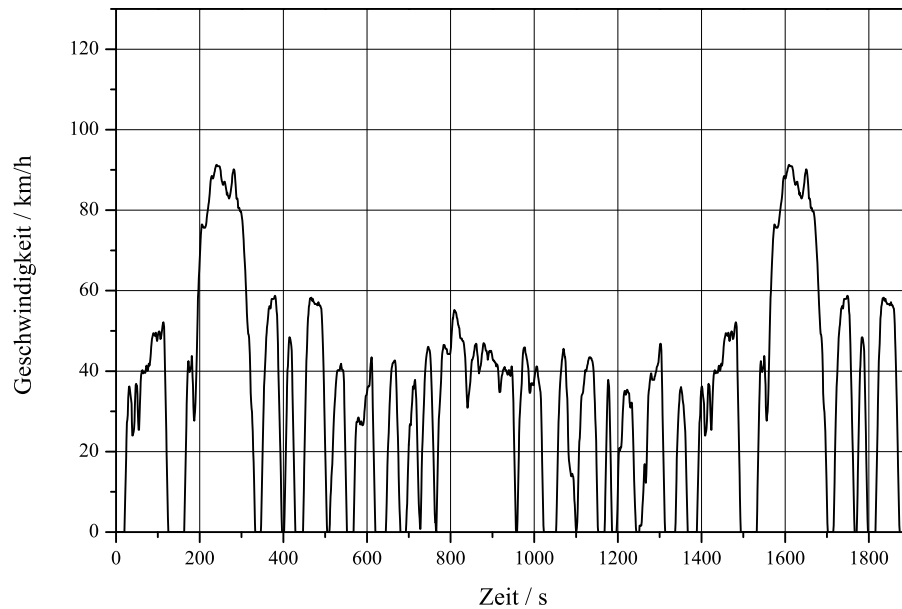


Abbildung 2.36.: Fahrzyklus: USA FTP 75

2.5.4. USA SC 03 und USA US 06

Die Fahrzyklen SC 03 (Start Control Cycle 03; s. Abbildung 2.37) und US 06 (s. Abbildung 2.38) gehören zusammen mit dem FTP 75 zum SFTP-Fahrzyklus (Supplemental Federal Test Procedure). Diese wurden entwickelt, um weitere Fahrzustände zu überprüfen, z. B. [60, 61]:

- Aggressives Fahren, mit starken Geschwindigkeitsänderungen
- Motorstarts
- Anfahren
- Fahren mit Klimatisierung

2.5.5. USA HWFET

Der HWFET (Highway Fuel Economy Test, s. Abbildung 2.39) dient der Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs in PKW und Kleintransportern. Dieser Fahrzyklus hat eine relativ hohe Durchschnittsgeschwindigkeit und keine Leerlaufanteile [62].

2. Grundlagen — Stand der Technik

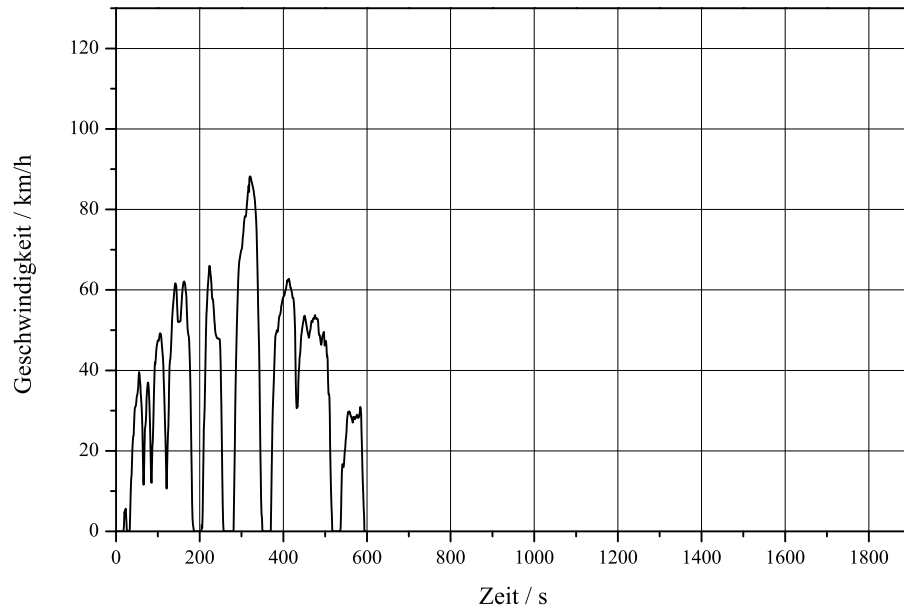


Abbildung 2.37.: Fahrzyklus: USA SC03

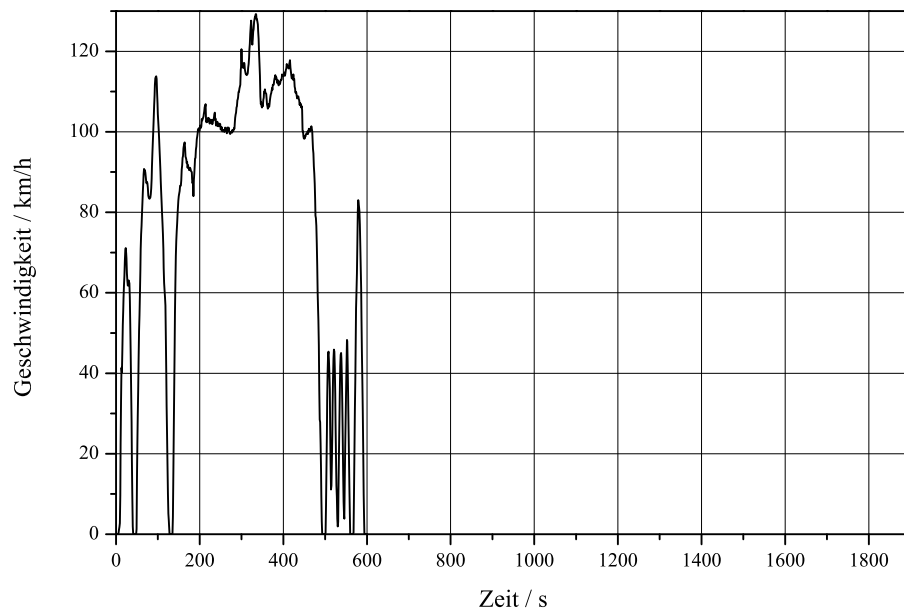


Abbildung 2.38.: Fahrzyklus: USA US06

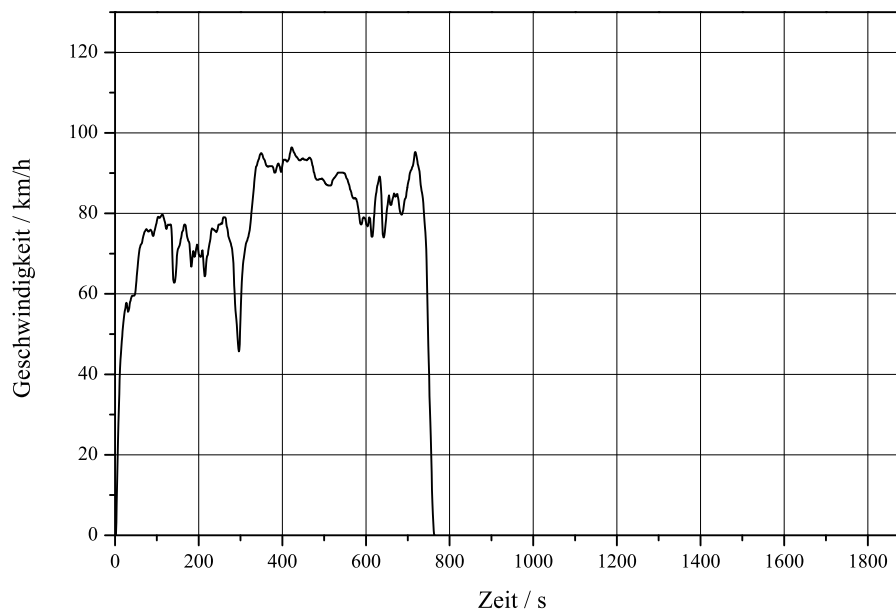


Abbildung 2.39.: Fahrzyklus: USA HWFET

2.5.6. USA NYCC

Der NYCC (New York City Cycle, s. Abbildung 2.40) simuliert eine langsame Fahrt durch eine verkehrsreiche Innenstadt mit häufigen Stopp und Leerlaufphasen, wie sie typischerweise in New York vorkommt [63].

2.5.7. USA UC

Der UC (The California Unified Cycle – auch LA 92 genannt; s. Abbildung 2.41), wurde für leichte Nutzfahrzeuge vom California Air Resources Board entwickelt. Dieser Fahrzyklus hat eine einfache 3-Phasen Struktur, ist aber aggressiver (höhere Geschwindigkeit, größere Beschleunigung, kürzere Pausen und weniger Leerlaufphasen) als der FTP 75 [63].

2.5.8. JAPAN 10 15 Mode

Der 10 15 Mode (s. Abbildung 2.42) war bis 2008 der japanische Standardfahrzyklus zur Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und Emissionsausstoß. Wie der NEFZ besteht der 10 15 Mode aus synthetischen Phasen. Dieser setzt sich zusammen aus 3 aufeinanderfolgenden synthetischen städtischen Phasen (10-Mode) und einer Autobahn Phase (15-Mode). Der Fahrzyklus ist mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 22,7 km/h und einer Höchstgeschwindigkeit von 70km/h langsamer als der NEFZ, spiegelt aber die japanischen Verkehrsbedingungen (Höchstgeschwindigkeit auf der Autobahn 80km/h) gut wieder [64, 65].

2.5.9. JAPAN JC08

Der transiente Fahrzyklus JC08 (s. Abbildung 2.43) hat in Japan im Jahr 2008 (für Importeure ab 2010) den synthetischen 10 15 Mode abgelöst und wird ab Oktober 2011 vollständig ersetzen [64].

2. Grundlagen — Stand der Technik

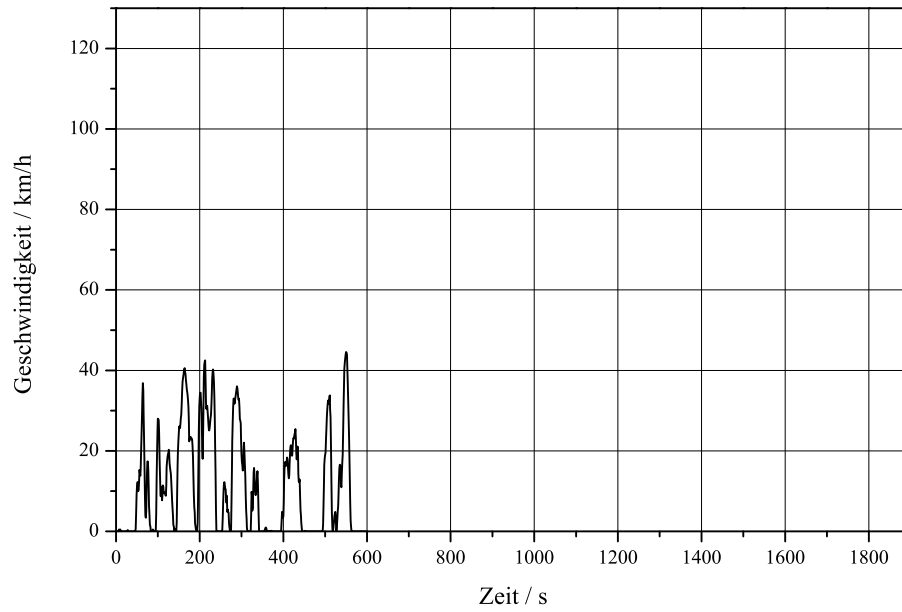


Abbildung 2.40.: Fahrzyklus: USA NYCC

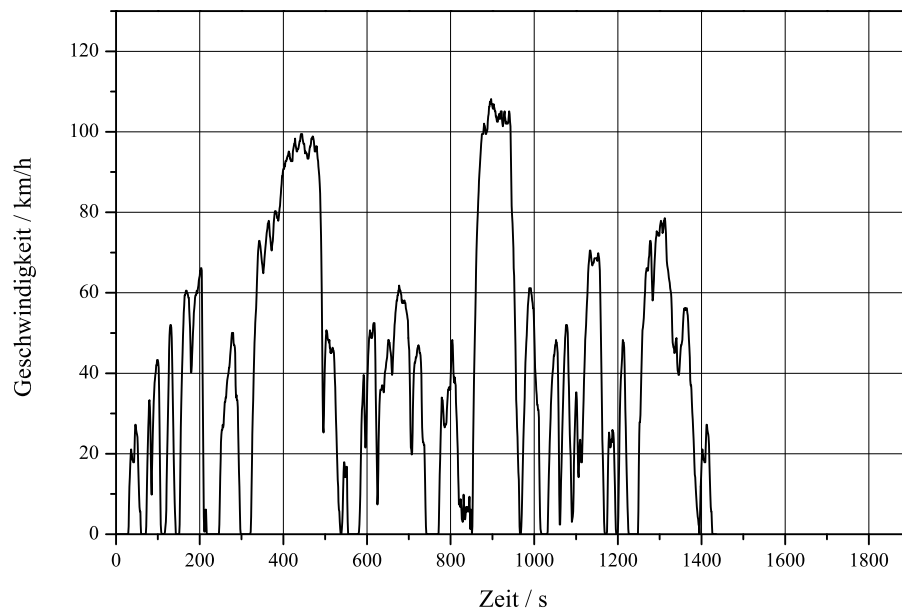


Abbildung 2.41.: Fahrzyklus: USA UC

2. Grundlagen — Stand der Technik

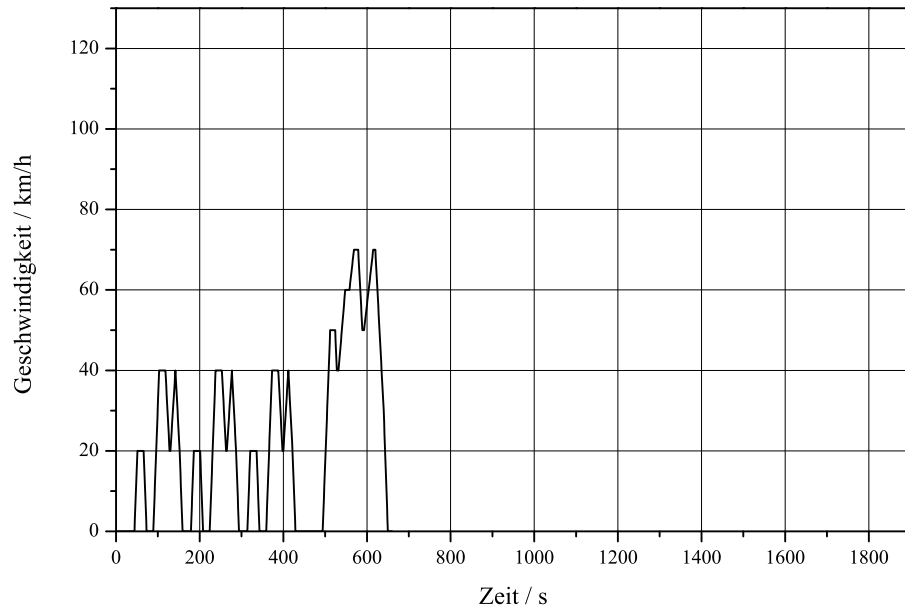


Abbildung 2.42.: Fahrzyklus: JAPAN 10 15 Mode

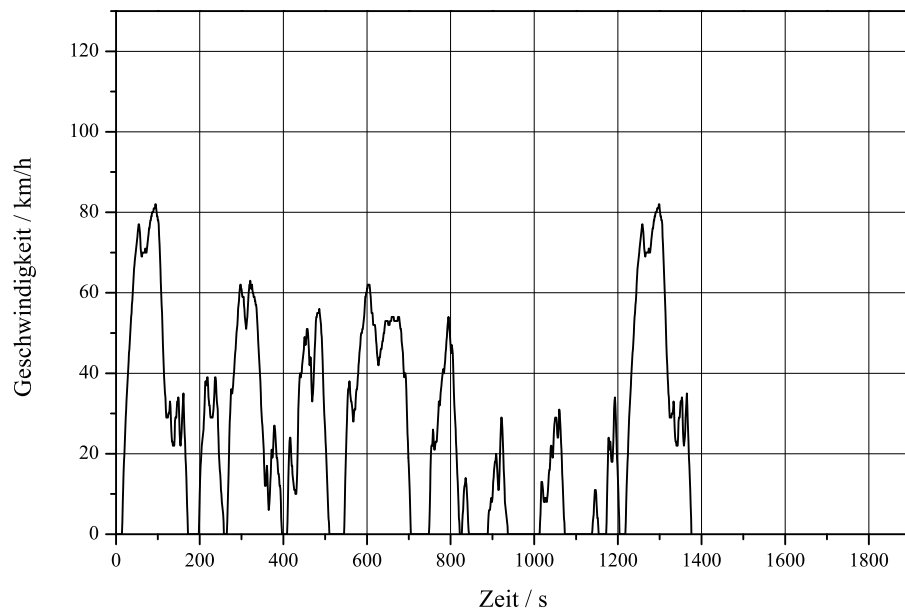


Abbildung 2.43.: Fahrzyklus: JAPAN JC08

2.5.10. WLTP

Der vorangegangene Abschnitt zeigt, dass es eine große Anzahl an Fahrzyklen gibt, obwohl noch nicht einmal alle verfügbaren Fahrzyklen genannt wurden. Diese können grob in zwei Gruppen eingeteilt werden. Zum einen in transiente Fahrzyklen und zum anderen in synthetische Fahrzyklen. Letztere sind nicht realitätsnah, was zusätzlich durch die Nichtbeachtung von Nebenaggregaten — z. B. Klimaanlage und Infotainmentsystemen, die den fossilen Kraftstoffverbrauch erhöhen — weiter verschlechtert wird. Da die einzelnen Fahrzyklen sehr unterschiedlich sind, lassen sich die Ergebnisse nur schlecht oder gar nicht miteinander vergleichen. Deshalb soll unter Führung der UN¹ ein neuer Fahrzyklus entstehen (WLTP – Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure), der weltweit gültig sein soll. Dieser Fahrzyklus soll die genannten Nachteile bestehender Fahrzyklen beseitigen. Der WLTP soll im Jahre 2014 festgelegt und ab 2020 verbindlich zur Bestimmung von Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß werden [66].

¹engl. United Nations (UN)/ Vereinte Nationen (VN)

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

3.1. Modellierung der Komponenten des erweiterten elektrischen Bordnetzes

Im Rahmen dieser Arbeit ist u. a. ein Simulationsprogramm in Matlab™ entstanden, um das erweiterte Bordnetz beim Betrieb mit unterschiedlichen Leistungen zu untersuchen. Mit diesem Programm ist es möglich, Energieflüsse, Ströme, Spannungen, Ladezustände etc. zu berechnen und ausgeben zu lassen. Grundlage der Simulation sind Modelle realer Komponenten, Fahrzyklen, Lastszenarien und Energiemanagementstrategien (vgl. Abbildung 3.1). Die Fahrzeugparameter werden über Menüs ausgewählt. Zusätzlich wird der Umfang des Bordnetzes gewählt – ob eine Hilfsstromversorgung und/oder ein Doppelschichtkondensator vorhanden sein sollen. Des Weiteren sind die Brennstoffzellenleistung, der Generatortyp und die Batteriegröße zu wählen. Abschließend wird der Fahrzyklus und die Energiemanagementstrategie festgelegt.

Das folgende Kapitel zeigt die Modellierung aller Komponenten des erweiterten elektrischen Bordnetzes.

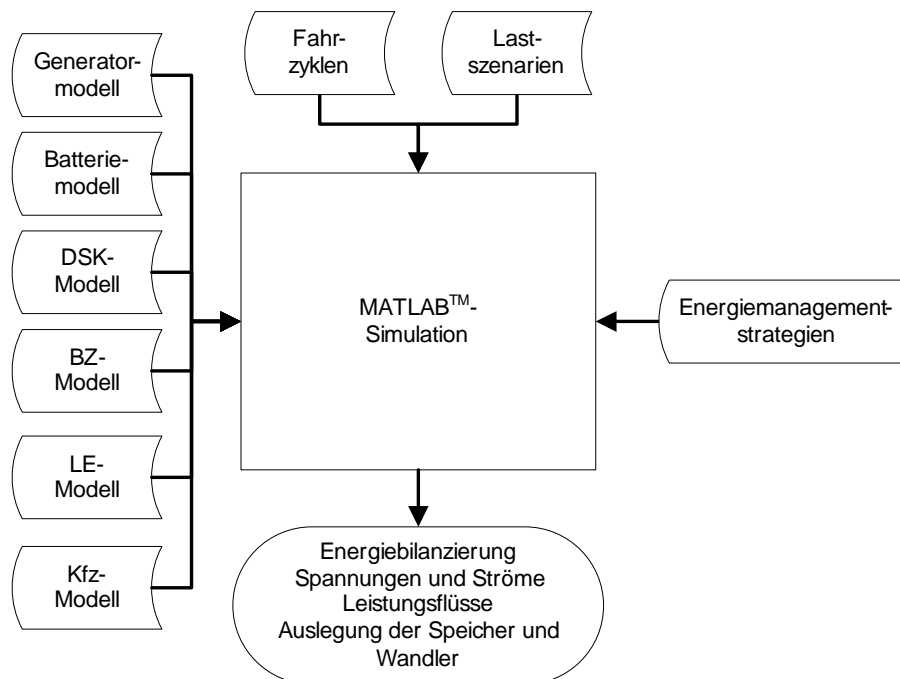


Abbildung 3.1.: Komponenten des Simulationsprogrammes

3.1.1. Fahrzeugparameter

Ausgangspunkt der Simulation sind die Geschwindigkeiten verschiedener, genormter Fahrzyklen, wie sie die Abbildungen 2.34 bis 2.43 zeigen. Aus der jeweiligen Geschwindigkeit v_{Fahrzeug} wird unter Verwendung der Getriebeübersetzung $\ddot{u}_{\text{Getriebe}}$ des entsprechenden Ganges, der Achsgetriebeübersetzung $\ddot{u}_{\text{Achsgetriebe}}$ und des Radumfanges $l_{\text{Radumfang}}$ zunächst die Verbrennungsmotordrehzahl

$$n_{\text{Motor}} = \frac{v_{\text{Fahrzeug}} \cdot \ddot{u}_{\text{Achsgetriebe}} \cdot \ddot{u}_{\text{Getriebe}}}{l_{\text{Radumfang}}} \quad (3.1)$$

berechnet. Anschließend wird dieses Ergebnis mit dem konstanten Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}_{\text{Motor-Generator}}$

$$n_{\text{Gen}} = n_{\text{Motor}} \cdot \ddot{u}_{\text{Motor-Generator}} \quad (3.2)$$

multipliziert. In Fahrzeugen wird das Übersetzungsverhältnis zwischen Verbrennungsmotor und Generator immer so gewählt, dass im Leerlauf des Verbrennungsmotors der Generator eine minimale Drehzahl von $n_{\text{Gen,min}} = 1.800 \text{min}^{-1}$ und bei maximaler Verbrennungsmotordrehzahl eine maximale Generator-drehzahl von $n_{\text{Gen,max}} < 20.000 \text{min}^{-1}$ erreicht. Dadurch variiert dieses Übersetzungsverhältnis je nach Fahrzeugtyp zwischen $\ddot{u}_{\text{Motor-Generator}} = 1 : 2 \dots 1 : 3$ [67]. Abbildung 3.2 zeigt schematisch den Simulationsablauf, der als Ausgangsgröße den maximal möglichen Generatorstrom liefert.

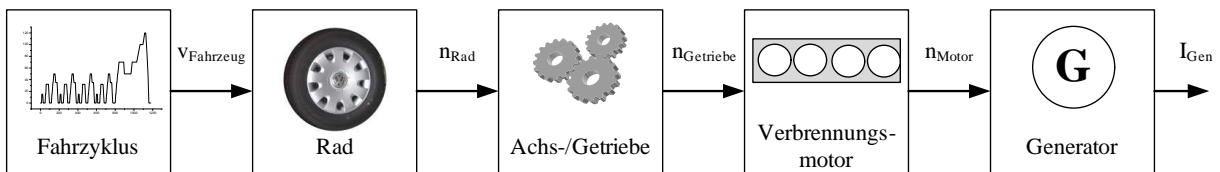


Abbildung 3.2.: Simulationsablauf

Tabelle 3.1 zeigt als Beispiel Fahrzeugdaten eines Volkswagen Lupo 1,0l, die für eine Simulation des Bordnetzes benötigt werden. Dargestellt sind die Übersetzungen aller Gänge des Getriebes, das Achsgetriebeübersetzungsverhältnis und der Radumfang des Fahrzeugs. Daten für weitere Fahrzeuge können aus Anhang A.3 entnommen werden.

Tabelle 3.1.: Fahrzeugdaten

VW Lupo	1,0l
Getriebeübersetzung	
1. Gang	3,465 : 1
2. Gang	2,100 : 1
3. Gang	1,450 : 1
4. Gang	1,100 : 1
5. Gang	0,890 : 1
Achsgetriebeübersetzung	4,060 : 1
Radumfang	1,80m

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

In Abbildung 3.3 ist die Generator Drehzahl $n_{Generator}$ dargestellt. Der Verlauf ist das Ergebnis der Umrechnung des NEFZ unter Berücksichtigung der Fahrzeugdaten, wie sie Tabelle 3.1 für das als Beispiel gewählte Fahrzeug zeigt. Dabei ist zu erkennen, dass die Generator Drehzahl niemals Null wird. Dies ist dem geschuldet, dass ein Verbrennungsmotor — anders als ein Elektromotor — im Stillstand des Fahrzeugs eine Leerlauf Drehzahl aufweisen muss (außer es ist eine Start-Stopp-Funktion integriert). Die Generator Drehzahlen werden dem Generatormodell zur Verfügung gestellt, das im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

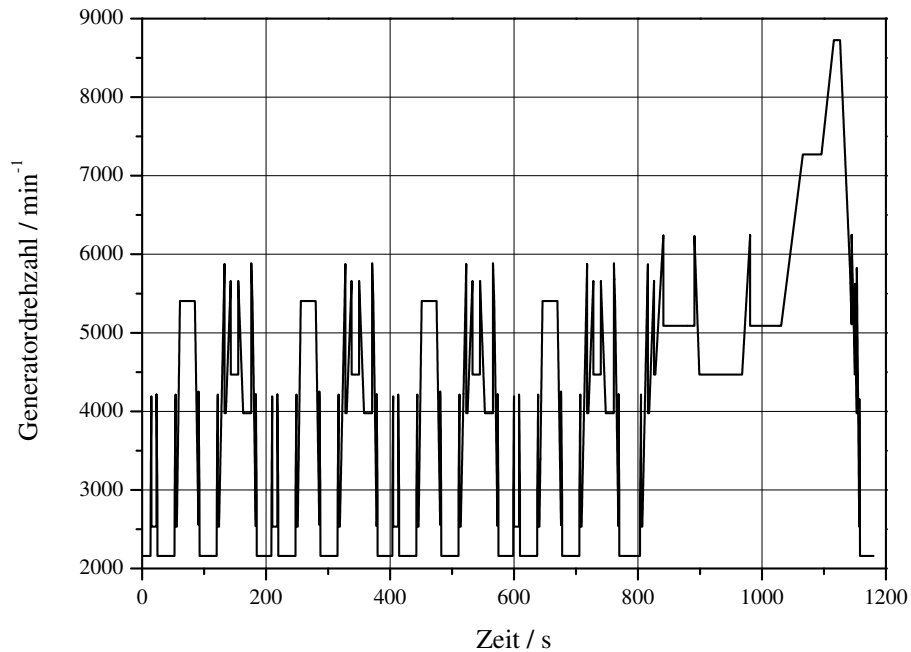


Abbildung 3.3.: Verlauf der Drehzahl des Generators beim Durchfahren des Neuen Europäischen Fahrzyklusses

3.1.2. Generator

Der Generator als standardmäßig installierter Energiewandler in konventionellen Fahrzeugen wird unter Verwendung von Kennlinien modelliert (s. Abbildung 3.4 und 3.5). Das Modell erhält am Eingang die im Vorfeld berechnete Generator Drehzahl $n_{Generator}$ und gibt am Ausgang den möglichen maximalen Generatorstrom $I_{Gen,max}$ aus. In Abhängigkeit davon, welcher Strom im Bordnetz gefordert wird, kann der tatsächliche Generatorstrom i_{Gen} deutlich kleiner sein als der maximale Generatorstrom $i_{Gen,max}$.

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

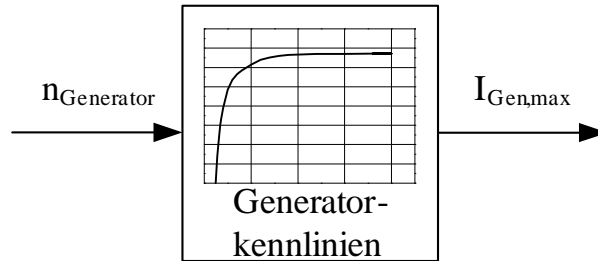


Abbildung 3.4.: Generatormodell

Damit die Auswirkungen unterschiedlicher Generatormaximalströme auf das Bordnetz untersucht werden können, wurden im Simulationsprogramm die Kennlinien der in Tabelle 3.2 aufgelisteten Generatortypen hinterlegt. Für einige Generatortypen sind ihre Kennlinien in Abbildung 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.2.: Generatortypen (Firma BOSCH [85])

Typ	Generatornennstrom
KCB1-14V 40-70A	70A
KCB1-14V 50-90A	90A
NCB1-14V 70-120A	120A
E8-14V 75-140A	140A
AL4006HO	170A
AL1277HO	175A
AL1263HO	180A
AL1262HO	203A
AL7534HO	236A

Abbildung 3.6 zeigt den maximal möglichen Generatorstrom beim Durchfahren des NEFZ für das als Beispiel gewählte Fahrzeug. Aus Abbildung 3.6 ist außerdem erkennbar, dass das simulierte Fahrzeug über keine Start-Stopp-Funktion verfügt, da bei stillstehendem Fahrzeug ($v = 0$) der Generator trotzdem einen kleinen Strom ans Bordnetz liefern könnte. Bei aktiver Start-Stopp-Funktion würde dieser Wert Null sein.

Damit Aussagen bezüglich des Wirkungsgrads während des Betriebs des Generators getroffen werden können, wurde ein Wirkungsgradkennlinienfeld, wie es Abbildung 2.4 zeigt, in die Simulation integriert. Dieses fließt in die Kraftstoffsverbrauchsberechnung mit ein.

3.1.3. Batterie

Neben der Bereitstellung der Energie für das Starten des Verbrennungsmotors besteht die Aufgabe der Batterie im Bordnetz im Ausgleich zwischen dem Energiebedarf der Verbraucher und der vom Generator erzeugten elektrischen Energie. Damit die Batterie in der Simulation als Speicher fungiert, muss das Modell den hinein- und herausfließenden Strom (I_{Bat}) vorzeichenbehaftet integrieren. Die herausfließenden Ströme werden definiert als Entladeströme (negatives Vorzeichen) und die hineinfließenden als Ladeströme (positives Vorzeichen). Die Ladung (Q_{Bat}) kann dann berechnet werden nach

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

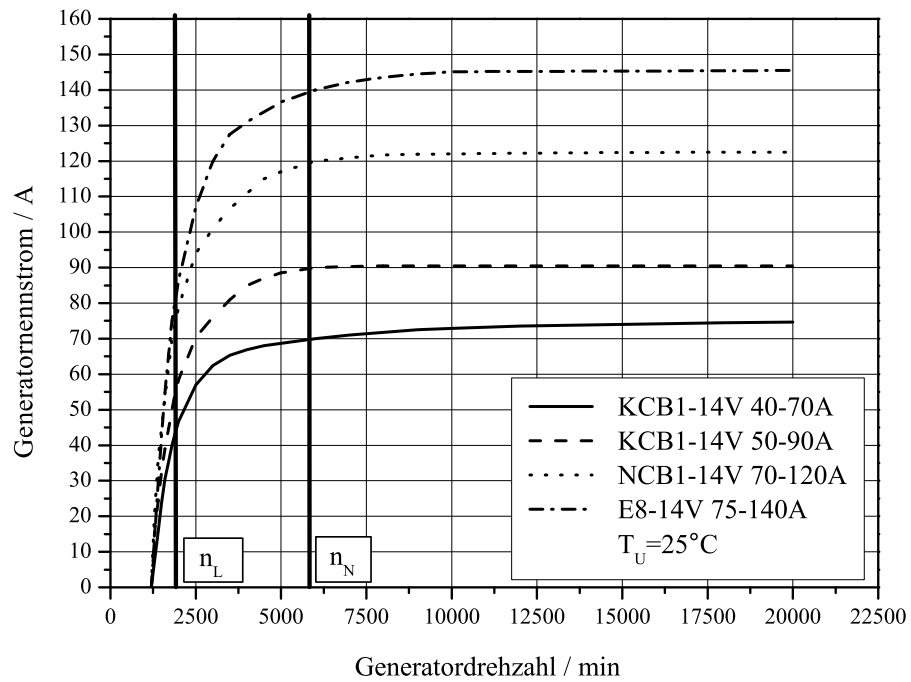


Abbildung 3.5.: Maximale Generatorströme in Abhängigkeit von der Drehzahl [85]

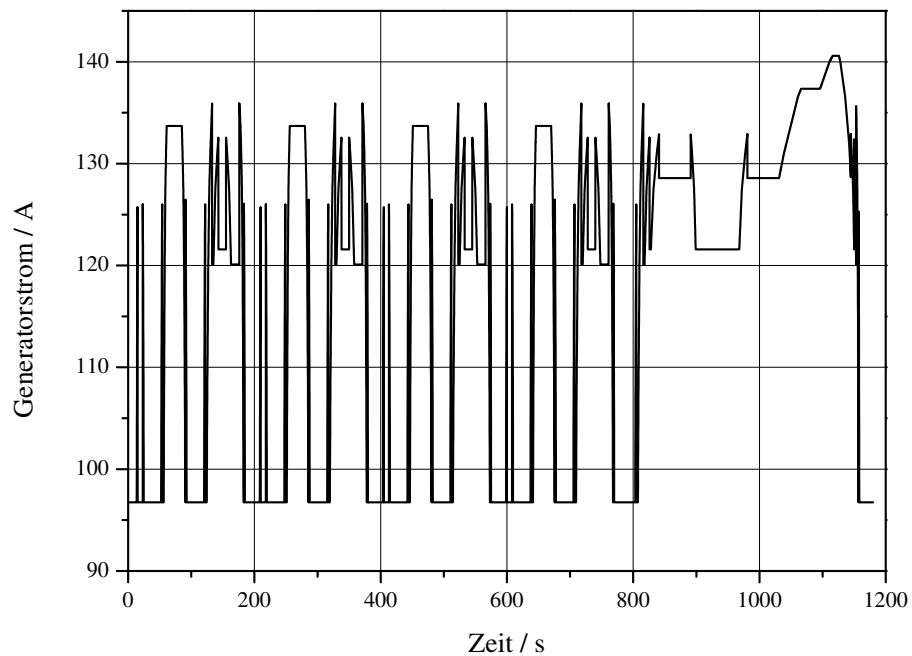


Abbildung 3.6.: Maximaler Generatorstrom (E8-14V 75-140A; Generatornennstrom $I_{Gen,nen} = 140\text{A}$) beim Durchfahren des Neuen Europäischen Fahrzyklusses

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

$$Q_{Bat} = \int I_{Bat} dt \quad (3.3)$$

Bei der Berechnung der Ladung nach (3.3) ist zu beachten, dass die Batterie zu Beginn der Simulation eine bestimmte Anfangsladung Q_{Start} aufweist, die als Ausgangswert für Ermittlung des Ladezustandes SOC_{Bat} berücksichtigt werden muss. Dieser ergibt sich daraufhin zu

$$SOC_{Bat} = \frac{Q_{Bat} \cdot 100\%}{Q_{Bat,100\%}} \quad (3.4)$$

wobei $Q_{Bat,100\%}$ der vom Hersteller genannten Ladung bzw. Batteriekapazität entspricht. Eine Batterie muss in einer Simulation als eine stromgesteuerte Spannungsquelle betrachtet werden [9]. Das Ersatzschaltbild der Bleibatterie (Abbildung 3.7) besteht aus einer Spannungsquelle, deren Spannungswert U_{Quelle} vom Ladezustand abhängig (vgl. Abbildung 3.8) ist. Dazu kommt ein Innenwiderstand $R_{i,Bat}$, der ebenfalls vom Ladezustand abhängt (vgl. Abbildung 3.9). Die Verlustleistung P_V einer Batterie ergibt sich somit nach Abbildung 3.7 zu:

$$P_V = (I_{Bat})^2 \cdot R_{i,Bat} = I_{Bat} \cdot (U_{Quelle} - U_{Bat}) \quad (3.5)$$

Durch die Verluste ist der Wirkungsgrad der Batterie immer $\eta_{Bat} < 1$. Bei der Batterie unterscheidet man zwischen zwei Wirkungsgraden:

- Energiewirkungsgrad: $\eta_{Wh} = \frac{E_{entl}}{E_{lad}}$
- Amperestundenwirkungsgrad $\eta_{Ah} = \frac{C_{entl}}{C_{lad}}$

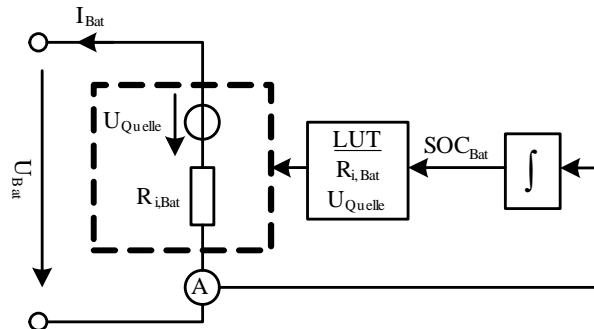


Abbildung 3.7.: Batteriemodell für Ladebilanz- und Verbrauchssimulationen [68]

Die Werte der Spannungsquelle U_{Quelle} und des Innenwiderstandes $R_{i,Bat}$ sind in einem LUT (look-up table) in der Simulation hinterlegt. Mit diesen Werten ist es möglich, ein einfaches, aber meist ausreichend genaues Batteriemodell zu erstellen, um Energieflüsse im Bordnetz nachzubilden. Dieses Modell kann einfach erweitert werden, um Temperatureinflüsse zu berücksichtigen. Alterungseinflüsse werden in diesem Modell hingegen nicht berücksichtigt und können auch nicht ohne Weiteres integriert werden.

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

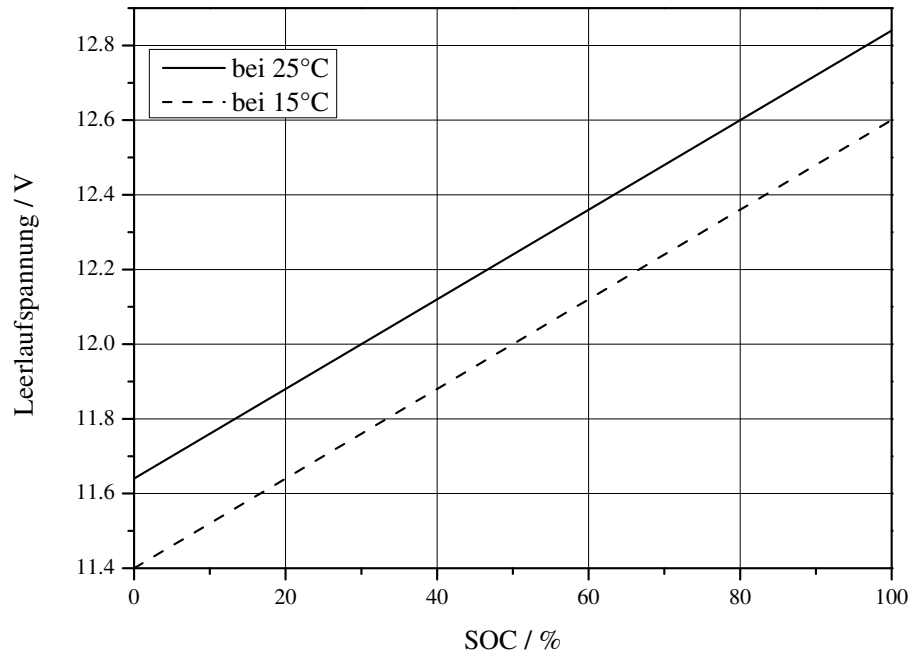


Abbildung 3.8.: Leerlaufspannung einer Bleibatterie in Abhängigkeit vom Ladezustand [90]

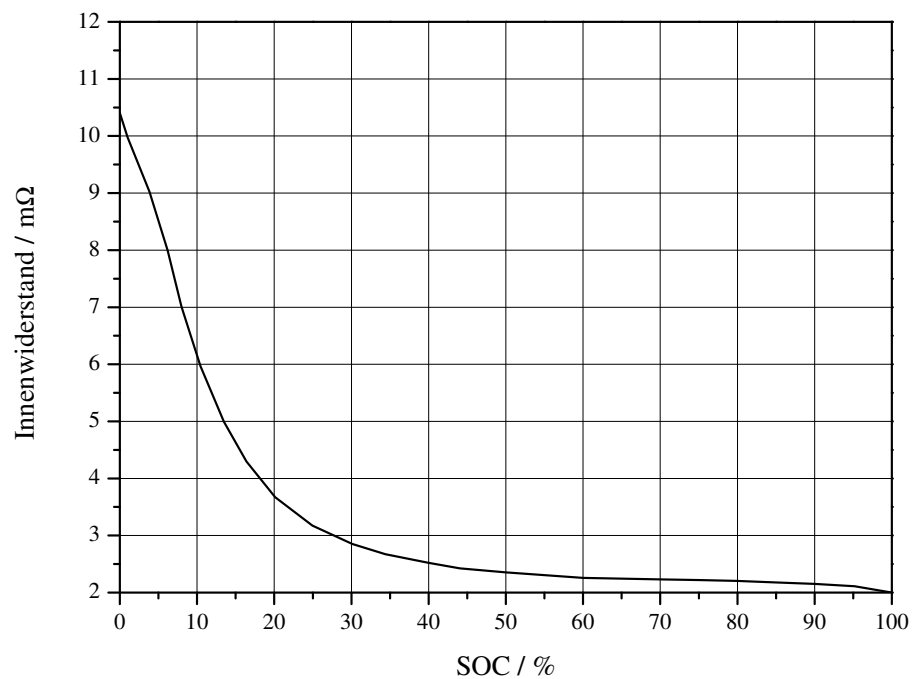


Abbildung 3.9.: Batterieinnenwiderstand als Funktion des SOC [90]

Aufgrund der relativ kurzen Simulationszeit, die abhängig von der Dauer der Fahrzyklen ist (max. Fahrzyklusdauer < 30 min), werden die Selbstentladung und Alterungseffekte vernachlässigt. Des Weiteren ist in aktuellen Fahrzeugen der Ruhestrom viel größer als die Selbstentladung, so dass die Selbstentladung vernachlässigt werden kann.

3.1.4. Lasten

Zur Simulation eines Bordnetzes müssen zusätzlich zu den Energiewandlern und –speichern auch die Verbraucher (Lasten) modelliert werden. Da nicht jeder Fahrer zur gleichen Zeit dieselben Verbraucher einschaltet, ist es nicht möglich, ein allgemeingültiges Lastszenario zu definieren. Es handelt sich hierbei um eine statistische Verteilung. Wie groß die Last eines Bordnetzes ist, ist also nicht nur abhängig vom Ausstattungsgrad eines Fahrzeugs sondern auch von anderen Parametern, z. B.:

- Fahrer und seine Vorlieben
- Wetter und Jahreszeit
- Tageszeit (Tag oder Nacht)

Deshalb kann die Bordnetzlast temporär eine größere oder kleinere Leistung aufweisen. Im Gegensatz zu den Fahrzyklen, die normiert sind, gibt es bei den Lastszenarien keine Vorgaben. Aus diesem Grund wurde für die Simulation ein eigenes Lastszenario entworfen. Dieses besteht aus einzelnen Komponenten (Lasten), die nach logischen Gesichtspunkten ein- oder ausgeschaltet werden. Die Höhe der Ströme bzw. Leistungen wurde an realen Fahrzeugen ermittelt. Abbildung 3.10 zeigt hierfür beispielsweise den Starterstrom und die Bordnetzspannung beim Startvorgang des Verbrennungsmotors eines Volkswagen Caddy 1,4l. Das Diagramm zeigt den hohen Losreißstrom des Starters, der bei erfolgreicher Zündung auf Null abfällt. Gleichzeitig bricht die Batteriespannung ein und erreicht nach dem Startvorgang wieder ihren Ausgangswert. Weitere aufgenommene Messwerte wurden durch Tabelle 2.2 bestätigt.

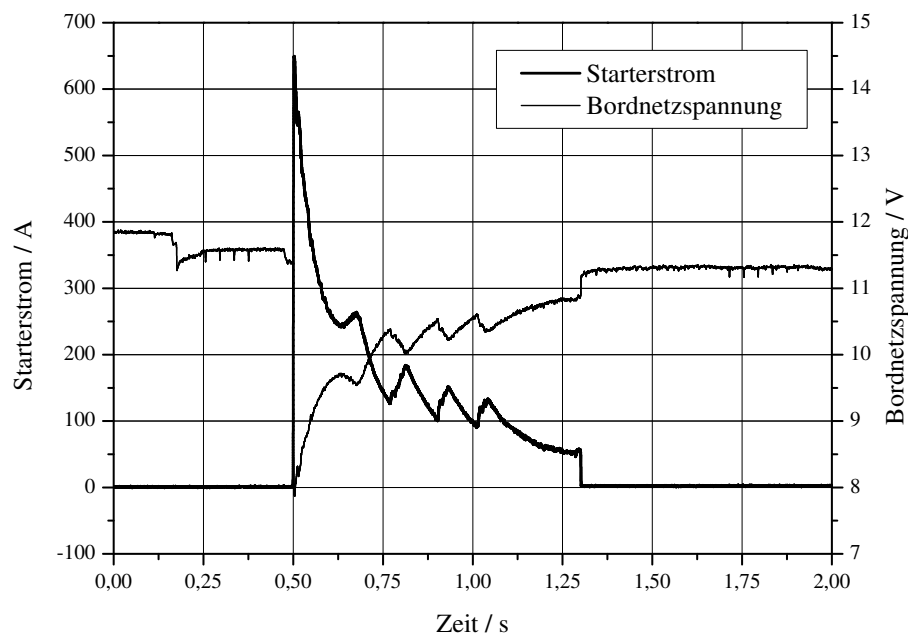


Abbildung 3.10.: Starterstrom und Bordnetzspannung beim Startvorgang des Verbrennungsmotors eines Volkswagen Caddy 1,4l Ottomotor

Damit unterschiedlich große Bordnetzlasten — unterschiedliche Durchschnittsleistungen — simuliert und verglichen werden können, wurden die entworfenen Lastszenarien mit einem Offset versehen. Die

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

Verläufe wurden ansonsten beibehalten. Somit konnte die durchschnittliche Bordnetzlast in 500W-Schritten verändert werden. Das Offset entspricht der Anhebung des Grundlastbedarfs eines Fahrzeugs (d. h. die Leistung der Dauerverbraucher wurde verändert). Die so entstandenen Verläufe sind als Lastszenarien in der Simulation hinterlegt. Abbildung 3.11 zeigt Lastszenarien mit Durchschnittsleistungen von 500W ... 3500W. Ein dynamisches Lastszenario hat den Vorteil gegenüber einer statischen Lastleistung, dass erst durch diese Dynamik Energiespeicher benötigt werden und somit Analysen an diesen Komponenten durchgeführt werden können. Bei einer statischen Lastleistung wären keine elektrischen Energiespeicher nötig, da der Energiewandler auf diese Leistung dimensioniert werden könnte, ohne dass elektrische Energie temporär zwischengespeichert werden müsste.

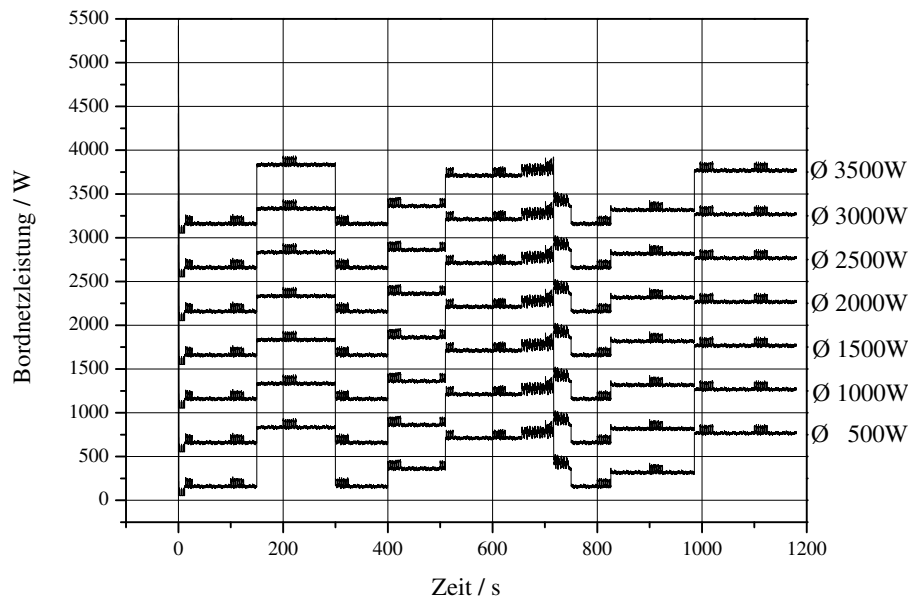


Abbildung 3.11.: Lastszenarien mit Durchschnittsleistungen von 500W ... 3500W

3.1.5. Brennstoffzelle

Das Verhalten der Brennstoffzelle wird durch die U-I-Charakteristik (s. Abbildung 3.12) nachgebildet, die in der Simulation hinterlegt ist. Diese Abbildung zeigt die im Abschnitt 2.3.1 beschriebene statische Kennlinie der Brennstoffzelle. Dabei sind die Brennstoffzellenspannung und der –strom abhängig von der Anzahl einzelner in Reihe geschalteter Zellen und der Reaktionsfläche. Die Leistung der Brennstoffzelle ergibt sich dann aus dem Produkt aus der Brennstoffzellenspannung und dem –strom. Da bei den Simulationsergebnissen die Vorgänge innerhalb der Brennstoffzelle nicht von Interesse sind, ist dieses Modell ausreichend für die erforderliche Nachbildung.

3.1.6. Doppelschichtkondensator

Der Doppelschichtkondensator muss wie die Batterie Energie speichern können. Dazu wird ebenfalls der hinein- und der herausfließende Strom vorzeichenbehaftet aufintegriert. Die vom Energiegehalt abhängige Spannung des Kondensators gemäß

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

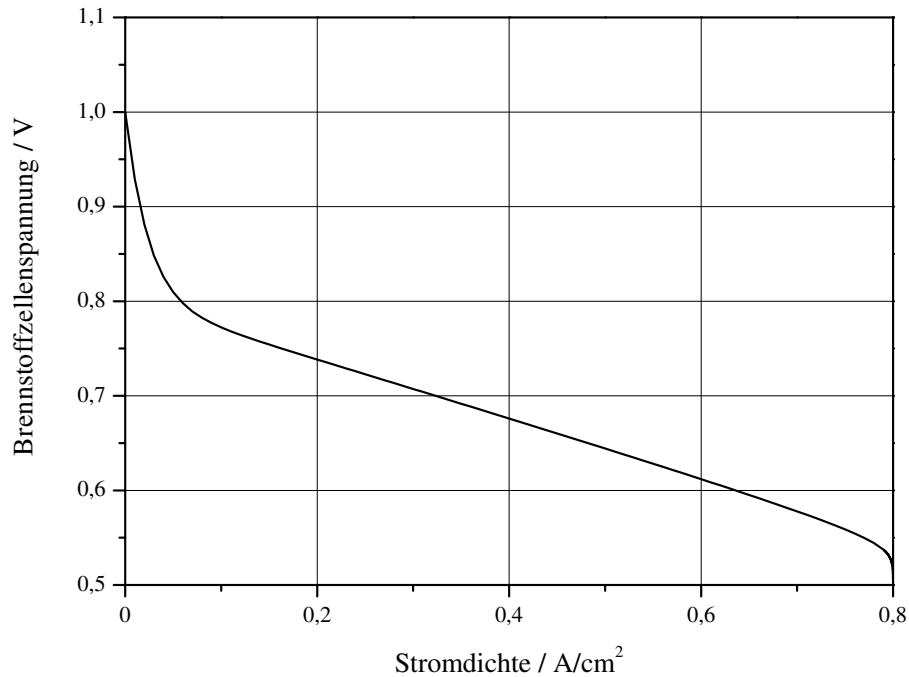


Abbildung 3.12.: u-j-Kennlinie einer einzelnen Brennstoffzelle

$$E_{Kon} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{Kon}^2 \quad (3.6)$$

berechnet sich schließlich zu:

$$U_{Kon} = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int i_{Kon} dt \quad (3.7)$$

Bei der Berechnung der Kondensatorspannung muss darauf geachtet werden, dass der Kondensator zu Beginn der Simulation eine Anfangsspannung aufweist.

Da der Doppelschichtkondensator Verluste beim Laden und Entladen aufweist, wird dies in der Simulation berücksichtigt, gemäß dem Ersatzschaltbild in Abbildung 3.13. Wie die Messung in Abbildung 3.14 zeigt, ist die Selbstentladung des Doppelschichtkondensators innerhalb von 30 Minuten vernachlässigbar. Aus diesem Grund wurde im Modell auf eine Berücksichtigung der Selbstentladung verzichtet, da standardisierte Fahrzyklen (s. Abschnitt 2.5) selten länger als 30 Minuten dauern. Abbildung 3.15 zeigt die Selbstentladung desselben Doppelschichtkondensators innerhalb von sieben Tagen.

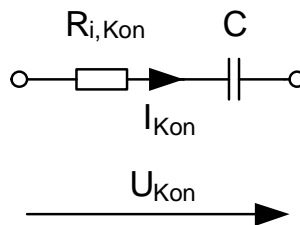


Abbildung 3.13.: Simulationsmodell des Doppelschichtkondensators

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

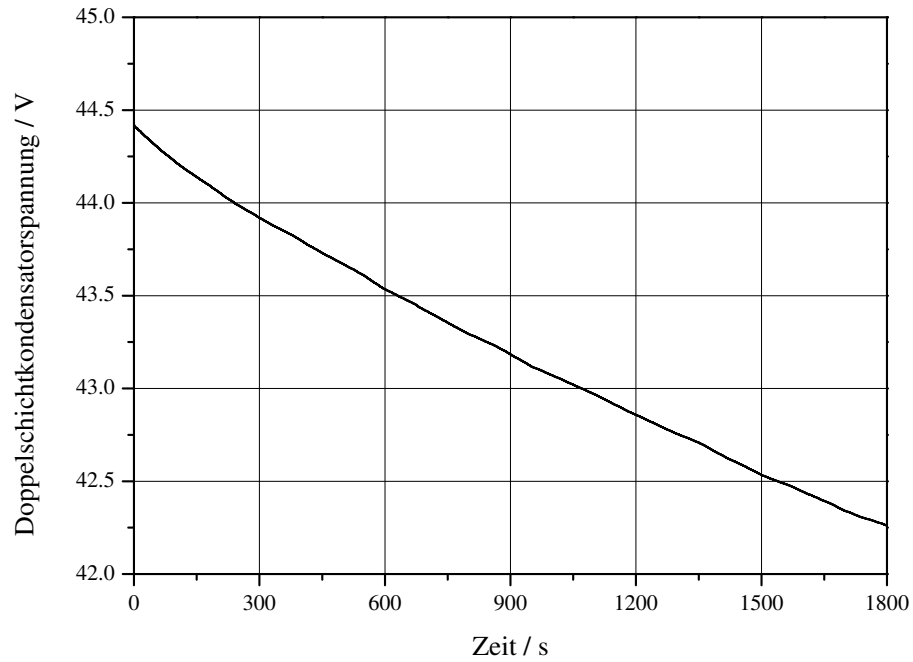


Abbildung 3.14.: Selbstentladung eines Doppelschichtkondensators (Messung am Maxwell Doppelschichtkondensator 160F/48V bei Raumtemperatur)

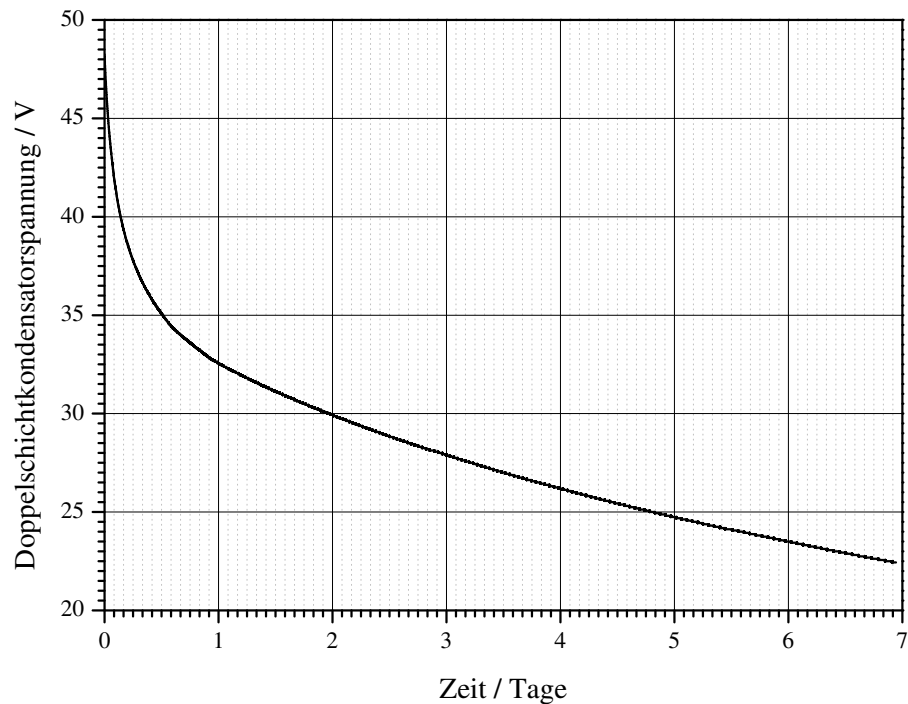


Abbildung 3.15.: Langzeitmessung der Selbstentladung eines Doppelschichtkondensators (Maxwell 160F/48V)

3.2. Simulationsoberfläche

In Abbildung 3.16 ist das Ein- und Ausgabefenster des Simulationsprogrammes dargestellt. Das Feld 1 in dieser Abbildung gibt die Fahrzeug- und Bordnetzdaten wieder (Einstellmöglichkeiten für Getriebe-, Generatorübersetzungen, Radumfang etc.). Im Feld 2 werden das Lastszenario, das Fahrzeug (auf Grund der Eingabe werden Getriebedaten, Batteriegröße, Radumfang und Generatorübersetzungsverhältnis eingesetzt), der Generator, die Energiemanagementstrategie und der Fahrzyklus gewählt. Nach Durchführung der Simulation werden die Ergebnisse im Feld 3 graphisch dargestellt, zusätzlich können sie in tabellarischer Form in eine Datei exportiert werden. Die Diagramme sind je nach gewünschter Ergebnisdarstellung flexibel und individuell auf dem Display anordbar.

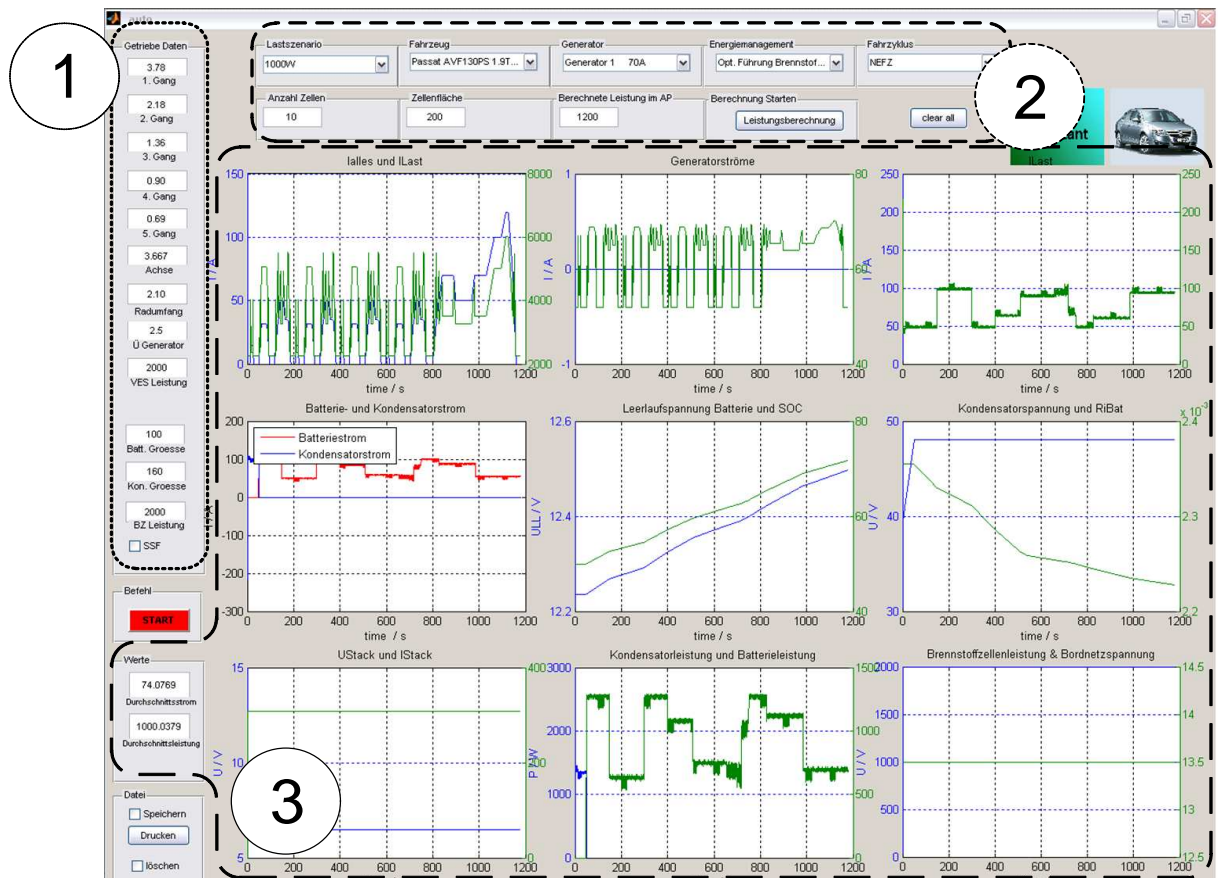


Abbildung 3.16.: Grafische Bedienoberfläche des Simulationsprogrammes

3.3. Potenzial der Hilfsstromversorgung

Die Simulation soll im ersten Schritt das Potenzial einer Hilfsstromversorgung aufzeigen. Dazu wird der in Abschnitt 2.2.2.5 erläuterte Ladezustand der Batterie (SOC) betrachtet. Dieser sinkt ab, wenn die Batterie ein im Bordnetz auftretendes Energiedefizit abdecken muss. Im Gegensatz dazu steigt der Ladezustand an, wenn ein Energieüberschuss vorhanden ist und die Batterie geladen wird. Abbildung 3.17

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

zeigt den Ladezustand der Batterie eines Standardbordnetzes (ohne Energiemanagement) beim Durchfahren des NEFZ mit unterschiedlichen Bordnetzleistungen ($SOC_{Start}=85\%$). Dabei ist zu erkennen, dass der Generator ($I_{Gen,max} = 140A$) bei einer mittleren Bordnetzleistung $P_{BN} \leq 1500W$ alle elektrischen Verbraucher mit Energie versorgen und gleichzeitig die Batterie laden kann. Bei größeren Bordnetzleistungen hingegen sinkt der Ladezustand ab. Die Folge wäre u. U. ein unkontrolliertes Entladen der Batterie, wodurch ein erneuter Start des Verbrennungsmotors nicht garantiert werden könnte. Die fein gedruckten Graphen zeigen jeweils die gleichen Simulationsergebnisse, jedoch mit der in Abschnitt 2.2.1.5 beschriebenen Start-Stopp-Funktion (SSF).

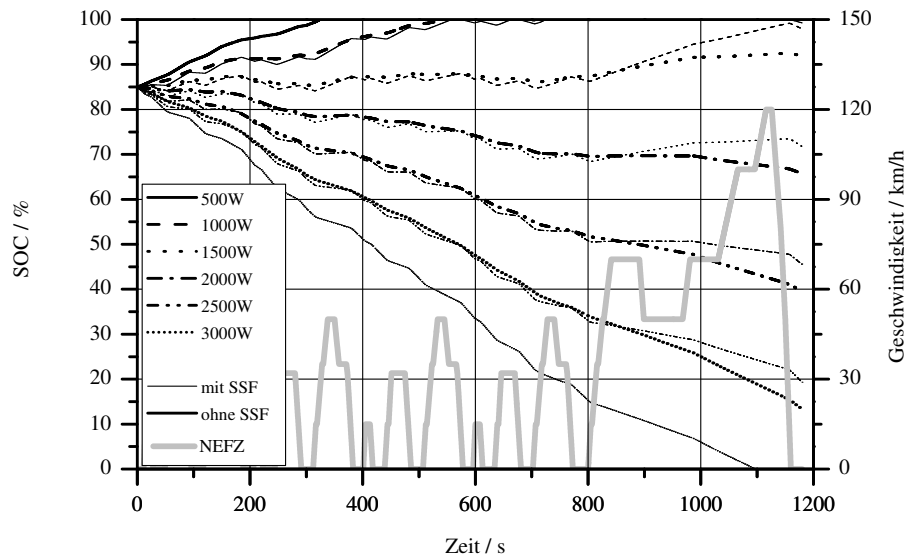


Abbildung 3.17.: Ladezustand (SOC) der Batterie beim Durchfahren des NEFZ mit unterschiedlichen Bordnetzleistungen ($I_{Gen,max} = 140A$; $C_{Bat} = 44Ah$)

Das Diagramm in Abbildung 3.18 zeigt ein Simulationsergebnis mit einer Bordnetzleistung von 3kW, ebenfalls beim Durchfahren des NEFZ. In diesem Fall soll das Bordnetz von einer Hilfsstromversorgung mit unterschiedlichen Leistungen unterstützt werden. Aus dem Diagramm geht hervor, dass bei den Werten der Brennstoffzellenleistung $P_{BZ} < 1500W$ der Ladezustand der Batterie weiter fällt — die Gesamtleistung von Generator und Brennstoffzelle in dem Fall also noch nicht ausreichend ist. Bei einer Brennstoffzellenleistung von $P_{BZ} \approx 1500W$ ist der Energiehaushalt des Bordnetzes ausgeglichen. Oberhalb dieser Leistung steht ein Energieüberschuss zur Verfügung, welcher in der Batterie gespeichert wird. Auch in diesem Fall zeigen die dünn gedruckten Graphen die jeweils gleichen Ergebnisse mit aktivierter Start-Stopp-Funktion (SSF).

Die für die elektrischen Verbraucher benötigte Energie wird, wie schon beschrieben, vom Generator erzeugt. Dazu muss die chemisch gebundene Energie des Kraftstoffs (i. d. R. Benzin oder Diesel) im Verbrennungsmotor in Wärmeenergie und anschließend in mechanische Energie umgewandelt werden, bevor der Generator wiederum diese in elektrische Energie umsetzen kann. Dies zeigt abermals die nicht ideale Wirkungskette zur Erzeugung elektrischer Energie in einem Kraftfahrzeug im Gegensatz zur Brennstoffzelle. Anhand dieser Aussage wird das Einsparpotenzial (an fossilen Kraftstoffen) der

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

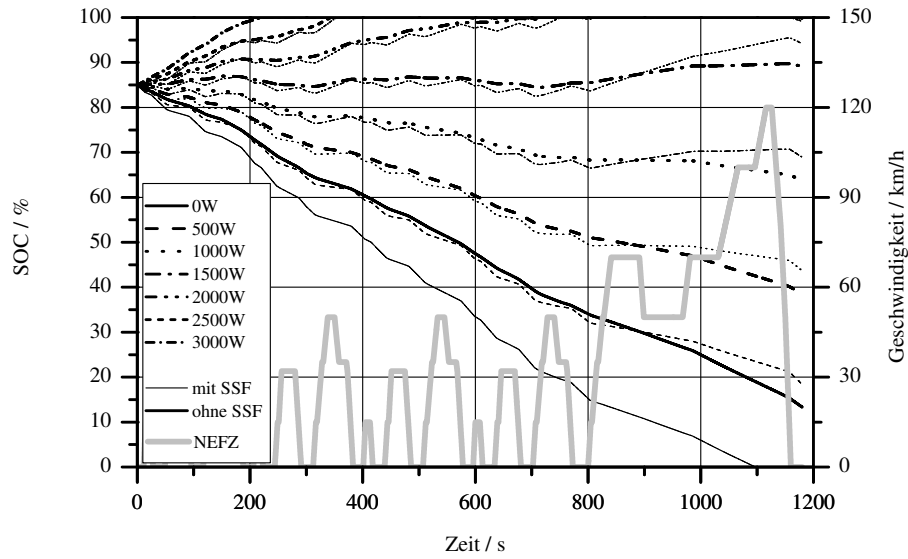


Abbildung 3.18.: Ladezustand (SOC) der Batterie beim Durchfahren des NEFZ mit konstanter Bordnetzleistung ($P_{BN} = 3000\text{W}$) und Hilfsstromversorgung mit unterschiedlichen Leistungen ($I_{Gen,max} = 140\text{A}$; $C_{Bat} = 44\text{Ah}$)

Hilfsstromversorgung mit Brennstoffzelle beim Betrieb mit Wasserstoff untersucht. Zur Bestimmung des Mehrverbrauchs an fossilem Kraftstoff zur Erzeugung elektrischer Energie im Kraftfahrzeug wird folgende Energiebilanz betrachtet:

$$E_{VM} = E_{Gen} \quad (3.8)$$

$$E_{VM} = \int \frac{P_{el,Gen}}{\eta_{Gen}} dt \quad (3.9)$$

für $P_{el,Gen} = konst.$ gilt dann für jeden Berechnungsschritt:

$$E_{VM,spez} \cdot V_{Kraftstoff} = \frac{P_{el,Gen} \cdot t}{\eta_{Gen}} \quad (3.10)$$

$$\frac{H_{Kraftstoff} \cdot \overline{\eta_{VM}} \cdot V_{Kraftstoff}}{t} = \frac{I_{Gen} \cdot U_{Gen}}{\eta_{Gen}} \quad (3.11)$$

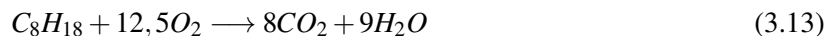
$$V_{Kraftstoff} = \frac{I_{Gen} \cdot U_{Gen} \cdot t}{\eta_{Gen} \cdot \overline{\eta_{VM}} \cdot H_{Kraftstoff}} \quad (3.12)$$

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

E_{VM}	Gewandelte Energie des Verbrennungsmotors
$E_{VM,spez}$	Gewandelte spezifische Energie des Verbrennungsmotors
E_{Gen}	Gewandelte Energie des Generators
$V_{Kraftstoff}$	Volumen des Kraftstoffs
$P_{el,Gen}$	Elektrische Leistung des Generators
η_{Gen}	Wirkungsgrad des Generators
η_{VM}	Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors
I_{Gen}	Generatorstrom
U_{Gen}	Generatorspannung
$H_{Kraftstoff}$	Heizwert des Kraftstoffs

Das Diagramm in Abbildung 3.19 zeigt den Mehrbedarf an fossilem Kraftstoff zur Erzeugung elektrischer Energie mit einem 140A-Generator für Bordnetze unterschiedlicher Leistungen beim Durchfahren des jeweiligen Fahrzyklusses. Als Randbedingen wurden für den Heizwert von Benzin $H_{Kraftstoff} = 8667^{Wh/l}$ und als durchschnittlicher Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors $\overline{\eta_{VM}} = 25\%$ angenommen [60]. Der Wirkungsgrad des Generators ergibt sich aus dem Wirkungsgradkennlinienfeld, das in der Simulation hinterlegt ist. Damit die einzelnen Ergebnisse der jeweiligen Fahrzyklen miteinander vergleichbar sind, wurde der Verbrauch auf $l/100km$ normiert. Der Mehrbedarf steigt nahezu linear mit der benötigten Leistung des Bordnetzes an. Daraus geht hervor, dass ein Bordnetz mit einer konstanten Leistung von $1kW$ beim Durchfahren des NEFZ etwa $0,311$ ($2,8l/100km$) Benzin zusätzlich benötigt.

Die aktuellen Debatten über CO_2 -Emission und die damit verbundene Erderwärmung führen dazu, dass bei einem Fahrzeug nicht nur der Kraftstoffverbrauch ein Verkaufskriterium ist, sondern auch der damit verbundene CO_2 -Ausstoß. Aus diesem Grund wird im Folgenden kurz auf den Zusammenhang zwischen Kraftstoffverbrauch und CO_2 -Emission eingegangen. Die vereinfachte Reaktionsgleichung



beschreibt den Vorgang bei der Verbrennung eines Benzin-Luft-Gemisches in einem Verbrennungsmotor, wobei Oktan (C_8H_{18}) mit Sauerstoff (O_2) zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) reagiert. Bei der Verbrennung von einem Kilogramm Benzin entstehen somit $2,33kg$ Kohlendioxid. Bezogen auf den Mehrverbrauch von $0,311$ ($2,8l/100km$) zur Erzeugung elektrischer Energie beim Durchfahren des NEFZ ergibt sich daraus ein Kohlendioxidmehrausstoß von $0,72kg$ ($6,52kg/100km$) für $1kW$ konstante Bordnetzleistung [69–71].

Abbildung 3.20 zeigt das durch die Hilfsstromversorgung gegebene Einsparpotenzial an fossilem Kraftstoff. Durch den Einsatz der brennstoffzellenbasierten Hilfsstromquelle ist es nicht nur möglich, das Bordnetz mit zusätzlicher Energie zu versorgen, es ist außerdem möglich, den fossilen Kraftstoffverbrauch und den damit verbundenen CO_2 -Ausstoß zu verringern. Aus diesem Grund ist die Hilfsstromversorgung nicht nur im Kfz eine vorteilhafte Lösung, sondern auch in weiteren Anwendungsfeldern einsetzbar. Das größte Marktpotential für eine Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellenbasis haben Personenkraftwagen mit einem Anteil von 74% . Ein Marktanteil von 23% wird für den Nutzfahrzeug-

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

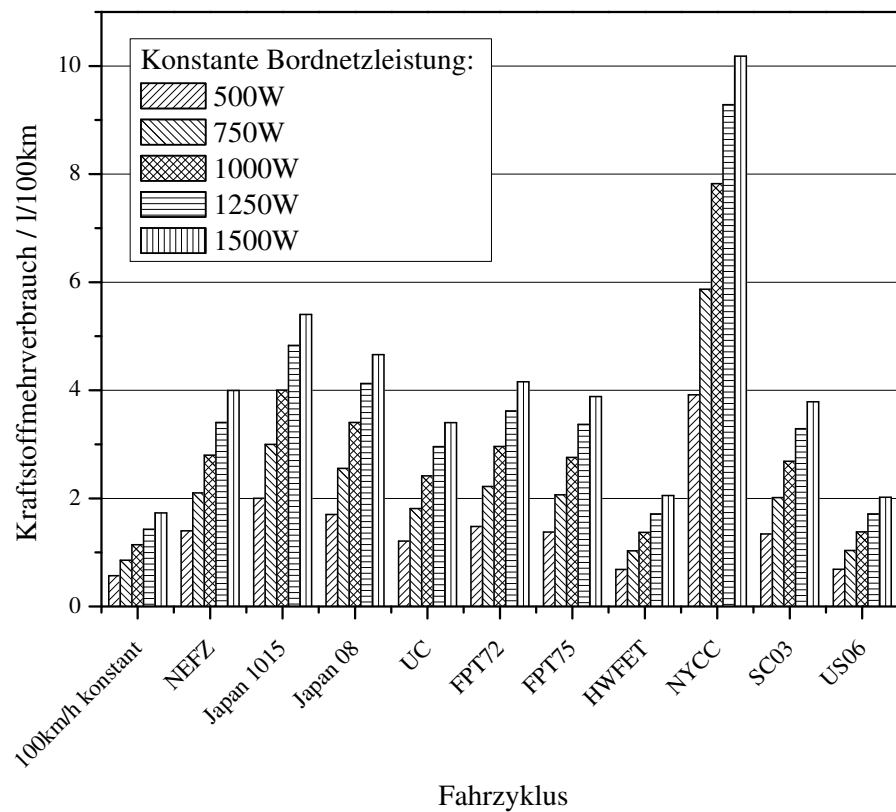


Abbildung 3.19.: Kraftstoffmeherverbrauch für die Erzeugung elektrischer Energie beim Durchfahren des jeweiligen Fahrzyklusses bei unterschiedlichen Bordnetzleistungen

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

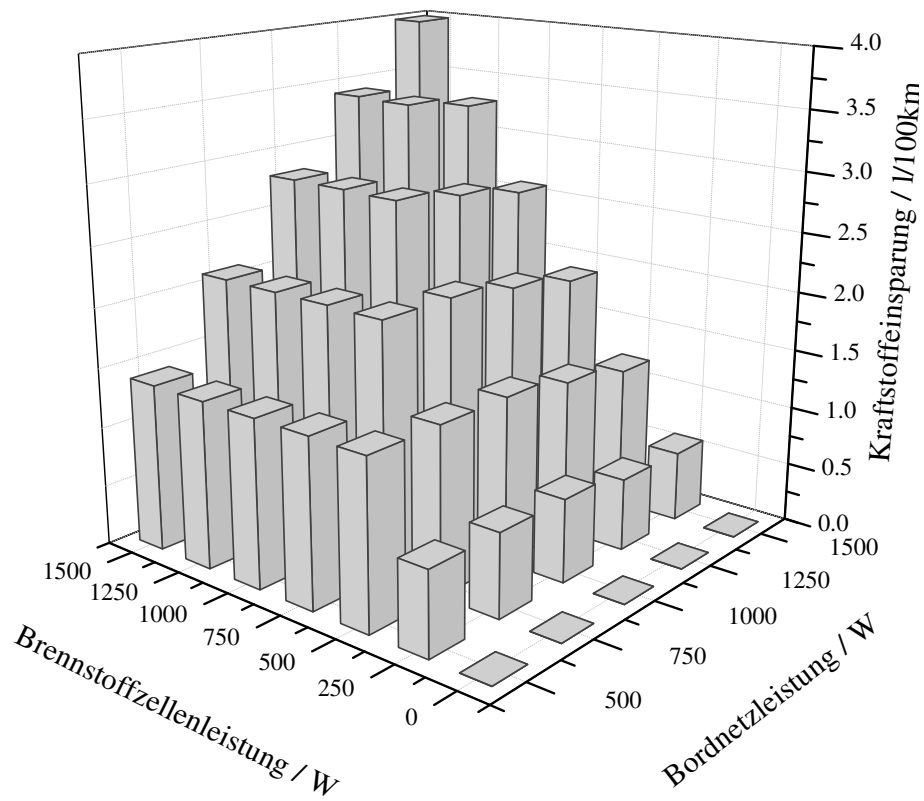


Abbildung 3.20.: Kraftstoffersparung in Bordnetzen unterschiedlicher Leistungen durch den Einsatz von Hilfsstromversorgungen auf Brennstoffzellenbasis (Betrieb mit Wasserstoff) mit unterschiedlichen Leistungen beim Durchfahren des NEFZ; Generator 140A

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

sektor prognostiziert. Des Weiteren gibt es einen Anteil von 3%, der auf Wohnmobile und Boote entfällt [72].

Selbst in einem batteriegespeisten Elektrofahrzeug ist die Verwendung einer Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellenbasis denkbar, da sie zum einen als sogenannter Range-Extender elektrische Energie an das Bordnetz liefert und zum anderen mit der — sonst ungewollten — Abwärme das Fahrzeuginnere an kalten Tagen erwärmen könnte. Die Fahrgastraumheizung stellt bei einem Elektrofahrzeug ein erhebliches Problem dar. In einem konventionellen Fahrzeug wird der Innenraum mit der Abwärme des Verbrennungsmotors erwärmt. In einem Elektrofahrzeug hingegen muss die knappe elektrische Energie, die sich in der Batterie befindet, in Wärme umgewandelt werden und steht somit nicht mehr für die Traktion des Fahrzeugs zur Verfügung, was gleichbedeutend mit einem Verlust an Reichweite ist.

Des Weiteren wäre der Einsatz einer Brennstoffzellen-Hilfsstromversorgung in einem Lkw denkbar. In Phasen von Lenkruhen des Fahrers könnten elektrische Verbraucher (z. B. Mikrowellenherd, Fernseher oder Konditionierung des Transportgutes) betrieben werden, ohne dass der große Verbrennungsmotor laufen müsste, damit sich die Batterie während der Verwendung dieser Komponenten nicht soweit entlädt, dass ein Wiederstarten des Verbrennungsmotors verhindert wird. Dies gilt besonders für US-amerikanische Trucks, denn dort ist das sogenannte Idling (Leerlaufen des Verbrennungsmotors) verboten [91]. Ein weiteres Anwendungsgebiet stellen Reisebusse mit erhöhtem Komfort dar. Beispielsweise könnten diese Fahrzeuge den Fahrgastraum im Stand weiter klimatisieren, während auf Fahrgäste gewartet wird, obwohl der Verbrennungsmotor ausgeschaltet ist. Außerdem wäre es denkbar, eine Hilfsstromversorgung auf einem Boot oder Campingfahrzeug zu installieren, um auch dort elektrische Verbraucher zu speisen und ein Wiederstarten des Verbrennungsmotors zu garantieren. Da die Brennstoffzelle im Betrieb selbst keine Geräusche erzeugt und somit leiser als die gegenwärtig verwendeten Generatoren ist, ist dieser Energiewandler auch für das Militär sehr interessant. Auch weil Brennstoffzellen schwieriger mit Wärmesensoren aufspürbar sind [73].

3.4. Fahrzyklen im Vergleich

Mit Hilfe des Simulationsprogramms ist es ebenfalls möglich, zusätzliche Informationen zu den Fahrzyklen zu erhalten. In der Tabelle 3.3 werden die Dauer des Fahrzyklusses und die maximale elektrische Energie

$$E_{Gen,max} = \int U_{Gen} \cdot I_{Gen,max} dt \quad (3.14)$$

angegeben, die ein Generator mit einem Nennstrom von 140A beim Durchfahren des jeweiligen Fahrzyklusses (mit und ohne SSF) in das Bordnetz einspeisen könnte. Dabei wurde eine Generatorspannung von 13,5V angenommen. Außerdem werden Leerlaufanteile, Höchstgeschwindigkeit, Durchschnittsgeschwindigkeit und Distanz aufgelistet.

3. Simulative Untersuchungen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

Tabelle 3.3.: Vergleich von Fahrzyklen

Fahrzyklus	Dauer s	Energie ohne SSF Ws	Energie mit SSF Ws	Leerlauf- anteile %	Höchst- geschwin- digkeit km/h	Durch- schnitts- geschwin- digkeit km/h	Distanz km
NEFZ	1180	$1,86 \cdot 10^6$	$1,50 \cdot 10^6$	23,84	120	33,56	11,00
JAPAN 10 15	660	$9,81 \cdot 10^5$	$7,23 \cdot 10^5$	31,47	70	22,72	4,17
JAPAN JP 10	135	$2,00 \cdot 10^5$	$1,50 \cdot 10^5$	26,81	40	17,70	0,66
JAPAN JC 08	1376	$2,11 \cdot 10^6$	$1,63 \cdot 10^6$	26,25	82	27,03	10,33
USA UC	1435	$2,33 \cdot 10^6$	$1,96 \cdot 10^6$	15,23	108,15	39,63	15,80
USA FTP 72	1369	$2,21 \cdot 10^6$	$1,85 \cdot 10^6$	17,73	91,20	31,53	11,99
USA FTP 75	1874	$3,04 \cdot 10^6$	$2,57 \cdot 10^6$	17,99	91,20	34,13	17,77
USA HWFET	765	$1,43 \cdot 10^6$	$1,42 \cdot 10^6$	0,54	96,40	77,68	16,51
USA NYCC	598	$7,98 \cdot 10^5$	$4,61 \cdot 10^5$	32,24	44,58	11,43	1,90
USA SFTP SC03	596	$9,71 \cdot 10^5$	$8,25 \cdot 10^5$	17,89	88,19	34,80	5,76
USA SFTP US06	600	$1,08 \cdot 10^6$	$1,04 \cdot 10^6$	6,58	129,23	77,33	12,89

4. Auslegung des Bordnetzes

Bei der Dimensionierung der Bordnetzkomponenten (Energiewandler und -speicher) sind mehrere Freiheitsgrade vorhanden. Das folgende Kapitel zeigt Möglichkeiten für die Dimensionierung der kombinierten Komponenten im Standard- und im erweiterten Bordnetz auf.

Die Aufgabe der Energiespeicher — Batterie und ggf. Doppelschichtkondensator — ist die Versorgung der elektrischen Verbraucher, wenn die von den Energiewandlern zur Verfügung gestellte elektrische Energie nicht ausreichend ist – z. B. auf Grund eines stillstehenden Verbrennungsmotors. Die vorzusehende Größe des Energiespeichers ist infolgedessen abhängig von der Leistung eingeschalteter Verbraucher und der Dauer, die diese Verbraucher aus den Energiespeichern versorgt werden müssen. In diesem Kapitel sollen die Intervalle, in denen die Energiewandler keine oder nur eine geringe Energiemenge in das Bordnetz einspeisen, aus den Fahrzyklen abgeleitet werden, ohne auf Extremsituationen (z. B. lange Standzeiten) einzugehen. Für einen uneingeschränkten Komfort während dieser Intervalle ist ein Energiespeicher mit einer hohen Amperestundenzahl vonnöten. Dies bedeutet — je nach Dimensionierung — gleichzeitig ein großes Volumen und hohes Gewicht. Dies steht aber im Widerspruch zu der Tatsache, dass Fahrzeuge leichter werden müssen, um Kraftstoff einzusparen und dass der Bauraum in Fahrzeugen begrenzt ist.

Bei der Dimensionierung der Energiewandler — Generator und ggf. Brennstoffzelle — ist darauf zu achten, dass der Energiehaushalt innerhalb des Bordnetzes ausgeglichen ist. Das bedeutet, dass der Ladezustand der Batterie nach dem Abstellen des Fahrzeugs den gleichen oder einen höheren Ladezustand aufweist, wie bei Antritt der Fahrt.

4.1. Architekturen des erweiterten elektrischen Bordnetzes

Das im vorangegangenen Kapitel vorgestellte erweiterte Bordnetz beinhaltet zwei Energiewandler (Generator und Brennstoffzelle) und bis zu zwei Energiespeicher (Batterie und Doppelschichtkondensator). Daraus ergeben sich weitere Kombinationsvarianten, die Vor- und Nachteile aufweisen. Bei den unterschiedlichen Möglichkeiten ist zu beachten, dass auf jeden Fall mindestens ein Energiewandler (Generator oder Brennstoffzelle) und ein Energiespeicher (Batterie oder Doppelschichtkondensator) vorhanden sein müssen, damit Energie ins Bordnetz eingespeist bzw. temporär zwischengespeichert werden kann, um zu jeder Zeit ein eventuelles Energiedefizit zu decken. Tabelle 4.1 zeigt die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten.

Die erste Variante der Tabelle 4.1 ist das bekannte Standardbordnetz mit Generator und Batterie mit den genannten zukünftigen Problemen der Energieversorgung. Diese Topologie kann — wie die zweite Topologie zeigt — erweitert werden durch eine Brennstoffzelle, die das Bordnetz unterstützt. Diese Topologie

4. Auslegung des Bordnetzes

Tabelle 4.1.: Kombinationsmöglichkeiten im erweiterten Kfz-Bordnetz

	Generator	Brennstoffzelle	Batterie	Doppelschichtkondensator
1.	✓		✓	
2.	✓	✓	✓	
3.	✓	✓	✓	✓
4.	✓	✓		✓
5.	✓			✓
6.		✓	✓	
7.		✓		✓
8.		✓	✓	✓

wird in dieser Arbeit als erweitertes Bordnetz bezeichnet. Es ist auch denkbar, einen Doppelschichtkondensator mit bidirektionalen Wandler in das Bordnetz zu integrieren (vgl. dritte Topologie der Tabelle 4.1), um die Batterie zu entlasten oder, wie es 4. zeigt, zu ersetzen. Die fünfte Topologie beschreibt ein abgewandeltes Standardbordnetz mit einem Doppelschichtkondensator als Energiespeicherkomponente, das auf eine Batterie verzichtet. Durch das Entfernen des Generators entstehen Topologien, die wieder lediglich einen Energiewandler aufweisen. Diese können ebenfalls mit beiden Energiespeichern kombiniert werden, sodass die Topologien 6 - 8 entstehen. Dadurch ist auch eine Topologie möglich, bei der die klassischen Komponenten des Standardbordnetzes (Generator und Batterie) vollständig durch eine Brennstoffzelle und einen Doppelschichtkondensator ersetzt werden. Diese Topologie wird als Extremstudie in Abschnitt 4.5 diskutiert. In dieser Arbeit wird hauptsächlich die Kombination aus Generator, Brennstoffzelle und Batterie betrachtet.

4.2. Auswahl und Dimensionierung des Energiewandlers und -speichers im Standardbordnetz

Im Standardbordnetz ist normalerweise nur ein Energiewandler (Generator) installiert. Bei der Dimensionierung des Generators sind folgende Kriterien zu beachten:

- Generatorspannung (z. B. 14V)
- Leistungsabgabe
- Maximalstrom
- Drehzahlbereich

4. Auslegung des Bordnetzes

Die Höhe der erforderlichen Leistungsabgabe eines Generators ist ausschließlich von den im Fahrzeug vorhandenen Verbrauchern abhängig und nicht von der Fahrzeuggröße. Das heißt, dass ein Kleinwagen nicht automatisch einen kleineren Generator besitzen muss, als ein Mittelklassewagen. Häufig wird dies aber der Fall sein, da Kleinwagen meist eine geringere Ausstattung besitzen als Mittelklasse- oder Oberklassefahrzeuge.

Die einfachste Möglichkeit der Generatordimensionierung besteht darin, die mittlere zu erwartende Bordnetzleistung abzuschätzen und ausgehend von diesem Wert einen passenden Generator zu wählen (vgl. Tabelle 4.2). Dabei ist zu beachten, dass dieser immer größer dimensioniert werden sollte als die mittlere Bordnetzleistung, da in Phasen, in denen das Fahrzeug steht oder der Verbrennungsmotor eine geringe Drehzahl aufweist, der Generatorstrom geringer ist als sein Nennstrom und somit möglicherweise die Batterie sich aus diesem Grund entlädt, um ein vorhandenes Energiedefizit zu decken. Im Anschluss muss der Generator zusätzliche Energie zum Laden der Batterie zur Verfügung stellen. Verschärft wird diese Situation durch die o. g. Problematik bei einer aktiven Start-Stopp-Funktion. Deshalb ist u. a. für diesen Fall eine andere Methode zu wählen, um ein genaueres Ergebnis für die Dimensionierung des Generators zu erhalten.

Tabelle 4.2.: Maximale Leistung unterschiedlicher Generatortypen

Generatortyp	Generatornennstrom	Leistungsabgabe bei 13,5V
KCB1-14V 40-70A	70A	1008W
KCB1-14V 50-90A	90A	1221W
NCB1-14V 70-120A	120A	1721W
E8-14V 75-140A	140A	1958W

Eine andere Möglichkeit, den Generator zu dimensionieren, besteht darin, den Energiehaushalt des Bordnetzes zu analysieren. Ein Indikator dafür ist abermals der Ladezustand der Batterie. Aus dessen Verlauf ist erkennbar, ob der Generator genügend Energie zur Versorgung aller elektrischen Komponenten einspeisen kann. Unabhängig von der Batteriegröße zeigt der Ladezustand an, ob ein Energieüberschuss oder -defizit vorhanden ist. Dies wird durch einen positiven bzw. negativen Delta-Ladezustand (vgl. Abbildung 4.1) aufgezeigt. Den Abbildungen 4.2 – 4.11 liegt immer das Durchfahren des NEFZ zugrunde. Bei einem zu gering dimensionierten Generator sinkt der Ladezustand ab und der am Ende des Fahrzyklusses vorhandene Ladezustand ist kleiner als bei Fahrtantritt. Die Geschwindigkeit der Entladung ist bei jeweils gleicher Bordnetzleistung und gleichem Generator abhängig von der Höhe der Batteriekapazität. Sollte der Delta-Ladezustand nach dem Gebrauch des Fahrzeugs häufig einen negativen Wert aufweisen, kann dies zu einem kritischen Ladezustand der Batterie führen, da der Energiehaushalt nicht ausgeglichen ist. Der Wert des Delta-Ladezustands nach dem Durchfahren des NEFZ ist in der Abbildung 4.2 für unterschiedliche Generator- und Bordnetzleistungen dargestellt. Um Aussagen über den Ladezustand sowohl bei großer, als auch bei kleiner Bordnetzleistung machen zu können, wurde bei der Simulation für den Delta-Ladezustand ein Startladezustand der Batterie von $SOC_{Bat,Start} = 50\%$ angenommen. Dadurch ergibt sich der gleiche Abstand zwischen $SOC_{Bat} = 100\%$ und $SOC_{Bat} = 0\%$. Für den Betrieb ist dieser niedrige Ladezustand von $SOC_{Bat,Start} = 50\%$ ungeeignet. Die Simulation wurde

4. Auslegung des Bordnetzes

abgebrochen sobald der Ladezustand $SOC_{Bat} = 0\%$ oder $SOC_{Bat} = 100\%$ erreichte. In den folgenden Diagrammen wurden lediglich die mit einer Markierung versehenen Werte simuliert.

Aus Abbildung 4.2 ist erkennbar, bei welcher maximalen durchschnittlichen Bordnetzleistung ein Generator einen ausgeglichenen Energiehaushalt ermöglichen kann. Dieses Ergebnis ist durch die Verwendung anderer Fahrzyklen bestätigt wurden, wobei es durch das Verhältnis von Fahr- und Leerlaufphasen der unterschiedlichen Fahrzyklen zu kleineren Abweichungen in der maximal abzudeckenden Bordnetzleistung kommt. Die Nulldurchgänge des Delta-Ladezustands sind bei allen Batteriekapazitäten (bei identischer Bordnetzleistung) gleich. Somit sind diese unabhängig von der Kapazität der Batterie.

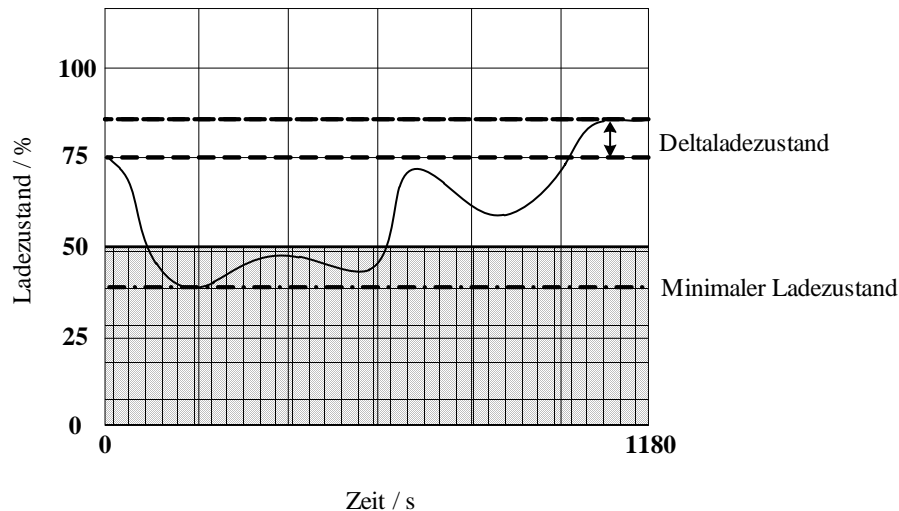


Abbildung 4.1.: Definition Delta-Ladezustand und minimaler Ladezustand

Für die Dimensionierung des Energiewandlers ist die Differenz zwischen Start-Ladezustand und End-Ladezustand der Batterie nicht der einzige entscheidende Parameter. Genauso wichtig wie dieser Wert ist die maximale Entladetiefe (bzw. der minimale Ladezustand) der Batterie (vgl. Abbildung 4.1).

Dieser Wert sollte nie unter 50% fallen. Aus diesem Grund wird zusätzlich zum Delta-Ladezustand der minimale Ladezustand ausgewertet. Die schraffierte Fläche in den Diagrammen der Abbildung 4.3 zeigt den Bereich des Ladezustands, den die Batterie, aufgrund der genannten Probleme, nicht erreichen sollte. Somit ist es möglich bei vorgegebenem minimalem Ladezustand der Batterie und bekannter durchschnittlicher Bordnetzleistung einen ausreichend leistungsstarken Generator auszuwählen oder zu überprüfen, ob ein gewählter Generator ein Unterschreiten des minimalen Ladezustandes verhindert.

Abbildung 4.4 zeigt die maximal benötigte Ladung einer Batterie, die zur Deckung des Energiedefizites von der Batterie geliefert werden müsste, bzw. die Ladungsmenge, die theoretisch in der Batterie gespeichert werden könnte, wenn der NEFZ durchfahren wird. Aus der Abbildung geht hervor, dass bei steigender Bordnetzleistung nicht nur die Generatorleistung ansteigen muss, sondern auch die Batteriekapazität, damit ein leistungsstarkes Bordnetz auch im Stillstand des Verbrennungsmotors für längere Zeit mit Energie aus der Batterie versorgt werden kann, ohne dass ein kritischer Ladezustand ($SOC_{Bat} < 50\%$) der Batterie erreicht wird. Dabei ist zusätzlich zu beachten, dass der End-Ladezustand der Batterie beim nächsten Start des Verbrennungsmotors zum Start-Ladezustand wird und der Ladezustand der Batterie

4. Auslegung des Bordnetzes

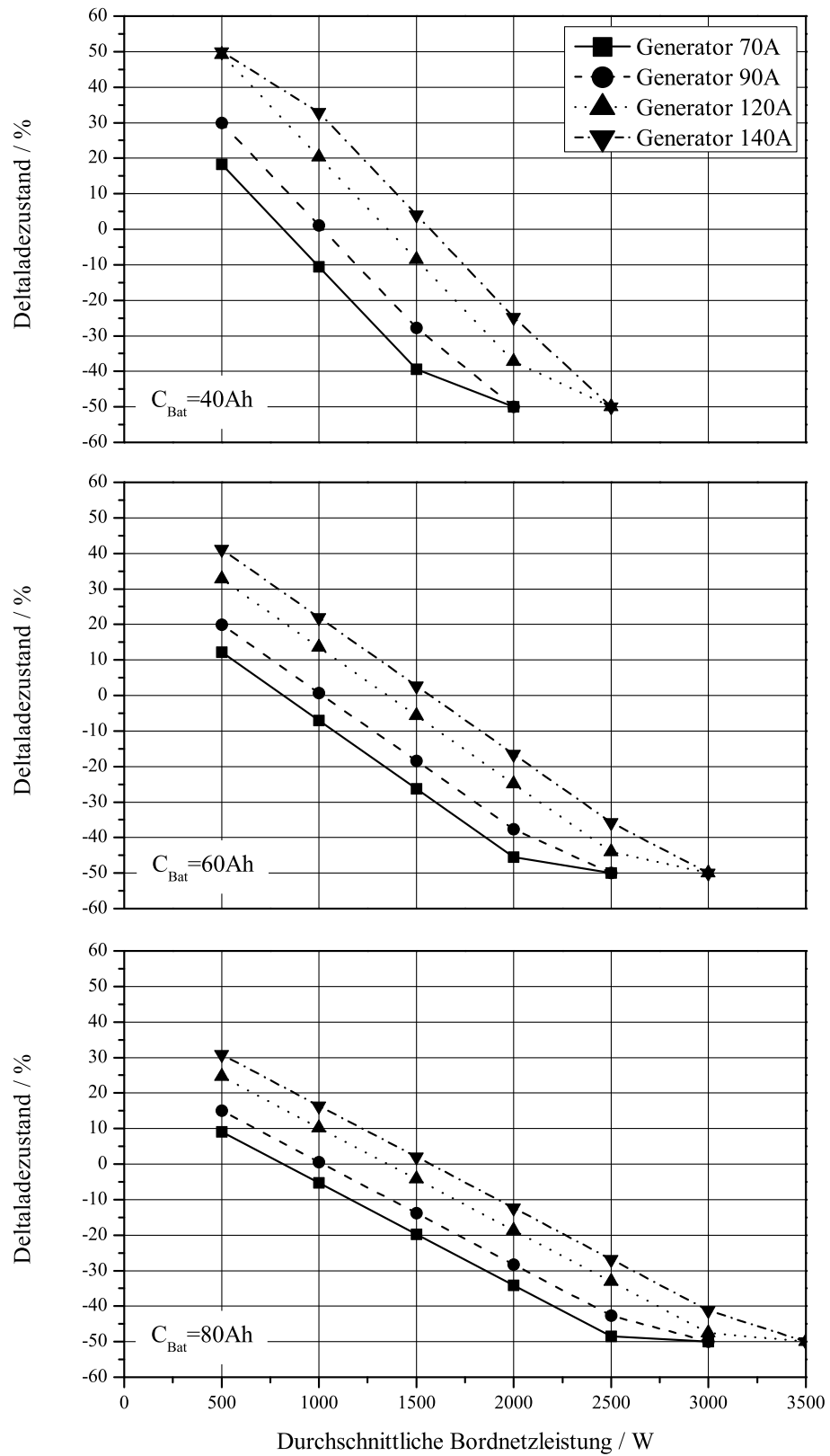


Abbildung 4.2.: Delta-Ladezustand der Batterie nach dem Durchfahren des NEFZ ($SOC_{Bat,Start} = 50\%$)

4. Auslegung des Bordnetzes

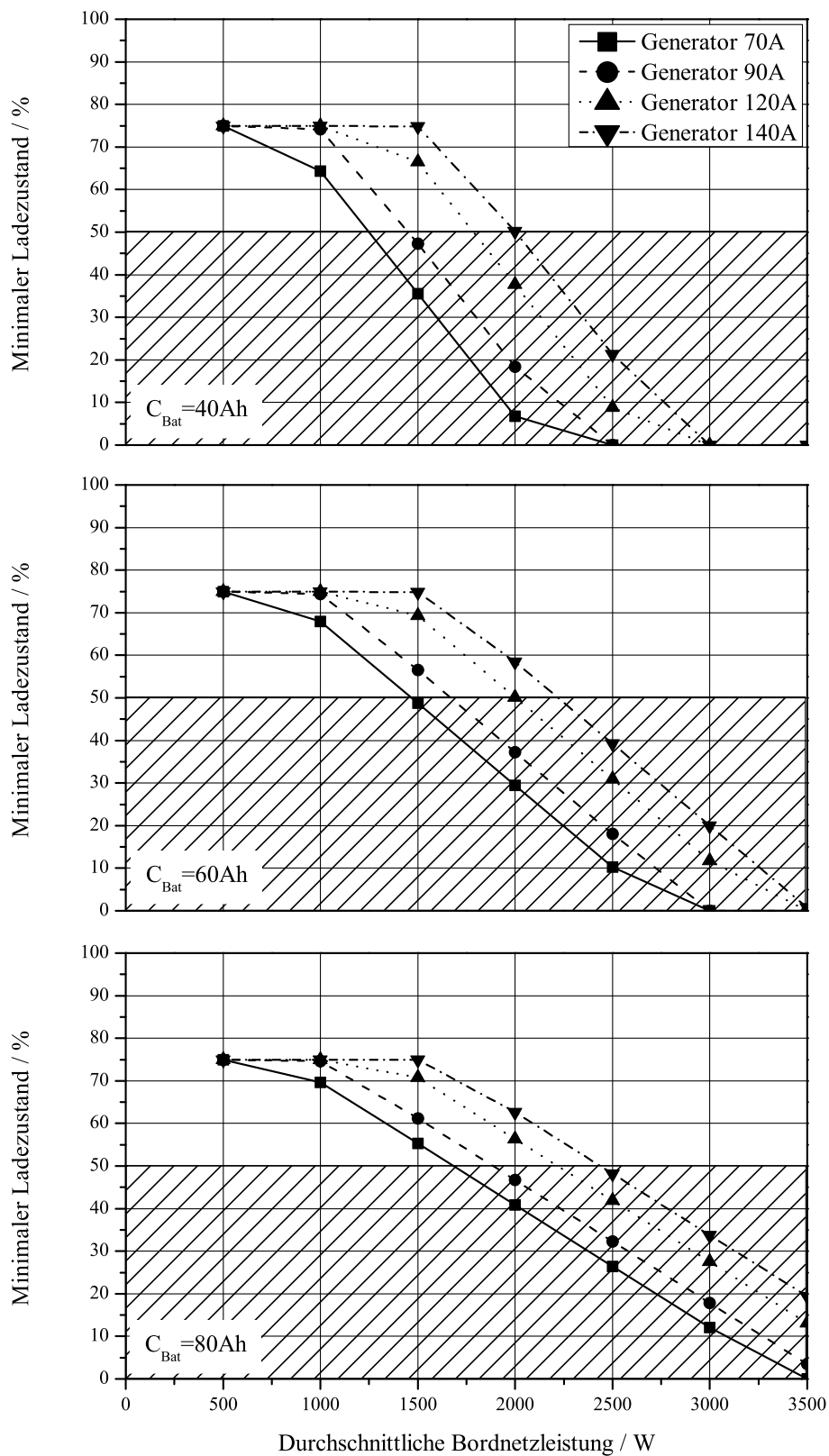


Abbildung 4.3.: Minimaler Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Bordnetzleistung ($SOC_{Bat,Start} = 75\%$)

4. Auslegung des Bordnetzes

somit bei einem negativen Energiehaushalt stetig abnimmt.

Eine Vergrößerung der Batteriekapazität führt auch zu größeren Batterievolumen, die den ohnehin geringen Bauraum im Fahrzeug weiter verringern. Zusätzlich ergibt sich ein erhöhtes Gewicht des Fahrzeugs. Aus diesen Gründen und der Tatsache des vorhandenen Energiedefizites, ist die Vergrößerung der Batterie oder ein Zwei-Batterie-Bordnetz für leistungsstarke Bordnetze keine Lösung, da weiterhin ein Energiedefizit im Bordnetz vorhanden ist.

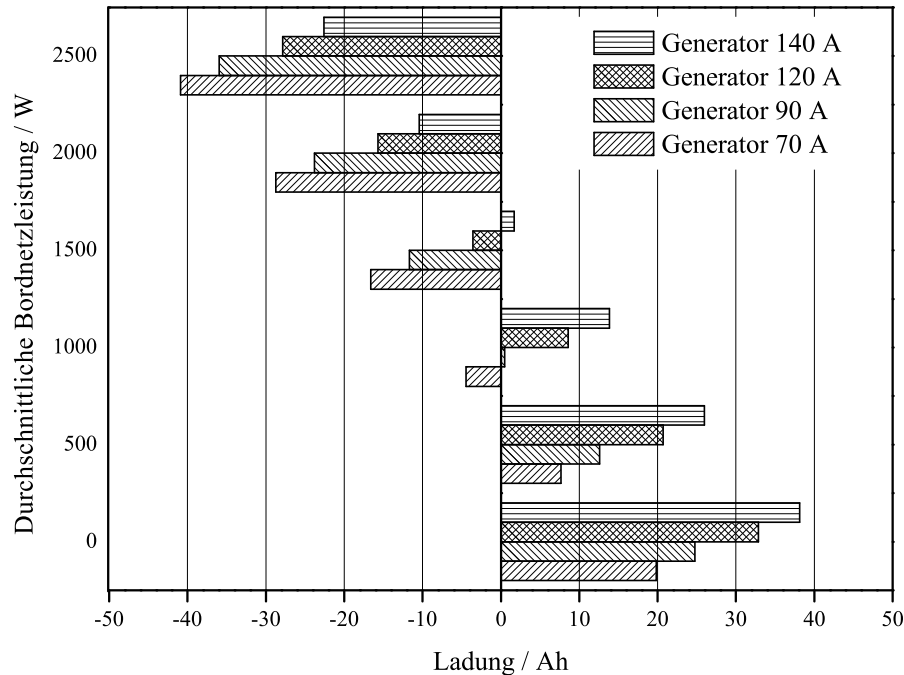


Abbildung 4.4.: Maximal benötigte bzw. maximal speicherbare Ladung beim Durchfahren des NEFZ

Für die Dimensionierung des Energiespeichers im Standardbordnetz wird durch das Simulationsprogramm der minimale Ladezustand der Batterie (SOC_{Bat}) während eines Fahrzyklusses ermittelt und ausgegeben. Dabei werden die Fahrzeugparameter Batteriekapazität ($10Ah < C_{Bat} < 100Ah$) und der Generator-nennstrom ($70A < I_{Gen,nen} < 140A$) nach jedem Simulationsdurchlauf variiert. Der Ladezustand der Batterie zu Beginn der Simulation beträgt 75%. Abbildung 4.5 stellt den minimalen Ladezustand während eines Fahrzyklusses (hier NEFZ) dar. Das Diagramm zeigt auf, welche Kombination sinnvoll bzw. weniger sinnvoll ist. So sind alle Ergebnisse mit stark absinkenden Ladezuständen ($SOC_{Bat} < 50\%$) nachteilig, da durch häufige Zyklen mit geringen Ladezuständen die Batterie irreversibel geschädigt wird. Außerdem wäre das Wiederstarten des Verbrennungsmotors nicht sichergestellt, sollte das Fahrzeug mit diesem niedrigen Ladezustand ($SOC_{Bat} < 50\%$) abgestellt werden. Andererseits ist im oberen und mittleren Diagramm der Abbildung 4.5 auch eine Überdimensionierung erkennbar. Bei kleinen Bordnetzleistungen ($\overline{P_{Last}} \leq 1000W$), großen Batteriekapazitäten ($C_{Bat} > 40Ah$) und/oder hohen Generator-nennströmen ($I_{Gen} > 90A$) ist der minimale Ladezustand nahezu konstant. In diesen Bereichen ist der Generator oder die Batterie zu groß dimensioniert und sollten auf Grund von begrenztem Bauraum im Motorraum und der Vorgabe, dass Fahrzeuge möglichst leicht sein sollen, verkleinert werden.

4. Auslegung des Bordnetzes

Aus dem unteren Diagramm der Abbildung 4.5 geht außerdem hervor, dass bei hoher Bordnetzleistung ($\overline{P_{Last}} = 2500\text{W}$) auch bei der Vergrößerung von Batteriekapazitäten Grenzen gesetzt sind, da die Leistung des Generators nicht ausreicht, um das Bordnetz zu versorgen und die Batterie zu laden. Der konstante minimale Ladezustand der Batterie im oberen Diagramm der Abbildung 4.5 erklärt sich daraus, dass selbst beim leistungsschwächsten Generator der Start-Ladezustand nicht unterschritten wird und alle Komponenten ausreichend mit Energie versorgt werden.

Aus den vorliegenden Ergebnissen lassen sich unterschiedliche Kombinationen der Energiewandlergröße und -speichergröße ableiten. Eine mögliche Kombination wäre bei einer Bordnetzlast $\overline{P_{Last}} = 1500\text{W}$ ein Generator mit einem Nennstrom von $I_{Gen,nen} = 120\text{A}$ und einer Batterie von $C_{Bat} = 40\text{Ah}$. Aus den Abbildungen 4.2 bis 4.4 geht hervor, dass durchschnittliche Bordnetzleistungen von $\overline{P_{Last}} > 1500\text{W}$ auch mit dem größten verwendeten Generator $I_{Gen,nen} = 140\text{A}$ nicht ausreichend abgedeckt werden können. Dies ist gekennzeichnet durch stets negative Delta-Ladezustände. Diese Kombination würde nach kürzester Zeit zu einem Liegenbleiben des Fahrzeugs aufgrund einer unkontrolliert entladenen Batterie führen. Deshalb werden Bordnetzleistung $\overline{P_{Last}} > 1500\text{W}$ im Folgenden ausschließlich mit einer Hilfsstromversorgung betrachtet.

4.3. Auswahl und Dimensionierung der Energiewandler und -speicher im erweiterten Bordnetz

Das erweiterte Bordnetz besitzt — im Gegensatz zum Standardbordnetz — einen weiteren Energiewandler (Brennstoffzelle), der einen ausgeglichenen Energiehaushalt ermöglichen soll. Zusätzlich kann das erweiterte Bordnetz sowohl — wie das Standardbordnetz — lediglich einen Energiespeicher (Batterie), als auch zwei Energiespeicher (Batterie und Doppelschichtkondensator) aufweisen. Für beide Fälle müssen die Energiewandler und -speicher separat auf einander abgestimmt werden. Dazu werden die im vorangegangenen Abschnitt genannten Kriterien auf das erweiterte Bordnetz angewandt, um dadurch eine sinnvolle Kombination von Wandlern und Speichern zu ermitteln. Im Folgenden sollen mögliche Dimensionierungen der enthaltenen Energiewandler und -speicher diskutiert werden. Dazu werden die gleichen Kriterien herangezogen, wie im vorangegangenen Abschnitt zur Dimensionierung der Wandler und Speicher im Standardbordnetz.

4.3.1. Energiewandler

Im erweiterten Bordnetz müssen die Leistungen von zwei Energiewandlern dimensioniert werden — zum einen die Leistung des Generators und zum anderen die der Brennstoffzelle, entsprechend

$$P_{BZ} + P_{Gen} = P_{Last} + P_{Bat} (+P_{Kon}) \quad (4.1)$$

4.3.1.1. Mit Brennstoffzelle kleinerer Leistung zur Unterstützung des Bordnetzes

Im ersten als Beispiel betrachteten Fall soll eine Brennstoffzelle ein Standardbordnetz, das einen Generator mit einem Nennstrom von $I_{Gen,nen} = 140\text{A}$ und eine durchschnittliche Bordnetzleistung von

4. Auslegung des Bordnetzes

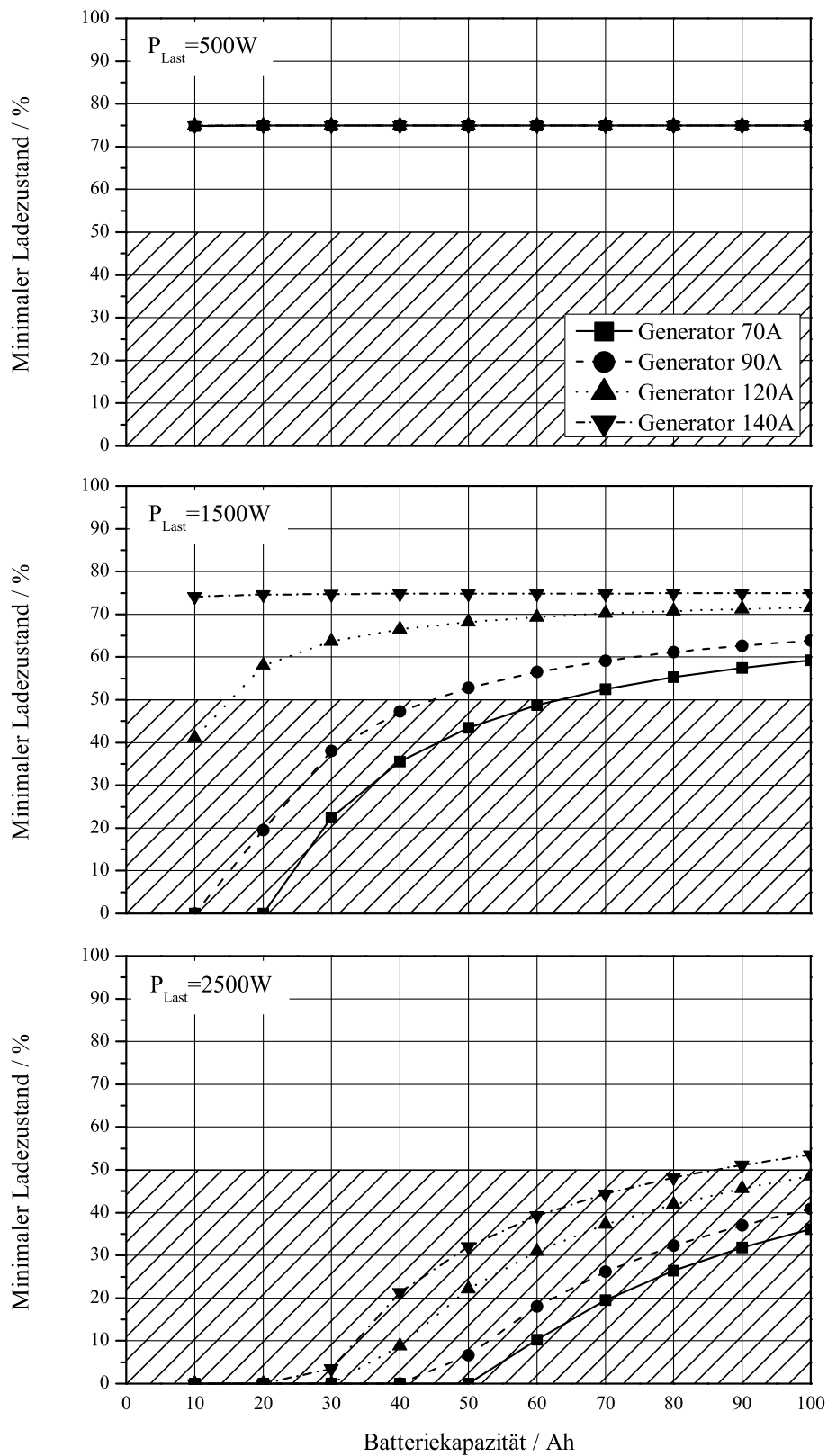


Abbildung 4.5.: Minimaler Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der Batteriekapazität

4. Auslegung des Bordnetzes

$500 < \overline{P_{Last}} < 3500\text{W}$ aufweist, lediglich unterstützen. Aus der Abbildung 4.6 kann die für eine ausgeglichene Energiebilanz ($\Delta\text{Ladezustand} \approx 0$) benötigte Brennstoffzellenleistung abgelesen werden. Zusätzlich zeigt Abbildung 4.7, ob während des Durchfahrens des NEFZ kritische Ladezustände ($SOC \leq 50\%$) der Batterie erreicht werden. Bei der Dimensionierung der Brennstoffzelle müssen im Gegensatz zum Standardbordnetz die Reserven nicht so groß ausfallen, da die Versorgung mit elektrischer Energie durch eine Brennstoffzelle unabhängig von der Drehzahl des Verbrennungsmotors ist und somit ständig elektrische Energie bereit gestellt werden kann.

Für die Dimensionierung ergibt sich bei einem Bordnetz mit $\overline{P_{Last}} = 3500\text{W}$ und einem Generator mit $I_{Gen,nen} = 140\text{A}$, dass eine Brennstoffzelle von $P_{BZ} \geq 2000\text{W}$ benötigt wird, um zu garantieren, dass der Delta-Ladezustand nicht negativ wird.

4.3.1.2. Mit Brennstoffzelle größerer Leistung zur Hauptversorgung des Bordnetzes

Da die konventionelle Wandlungskette (Verbrennungsmotor-Generator) einen geringeren Wirkungsgrad aufweist als die Brennstoffzelle, wäre es alternativ denkbar, dass der Generator einen kleineren Nennstrom besitzt als im vorangegangenen Beispiel, damit weniger Energie von diesem Energiewandler ins Bordnetz eingespeist wird. Dazu wird der Generator gegen einen kleineren ($I_{Gen,nen} = 70\text{A}$) ausgetauscht und die übrigen Parameter beibehalten. Damit der Energiehaushalt wieder ausgeglichen ist bzw. einen Energieüberschuss aufweist, muss die Brennstoffzelle eine höhere Leistung abgeben. Abbildung 4.8 zeigt dazu den Delta-Ladezustand der Batterie, der abermals als Indikator für die Energiebilanz herangezogen wird. Aus den Ergebnissen lässt sich auch in diesem Fall eine mögliche Kombination der Energiewandler und -speicher entnehmen. Somit wird bei gleichen Rahmenbedingungen, wie im vorhergegangenen Beispiel (Bordnetz mit $\overline{P_{Last}} = 3500\text{W}$) — nun mit einem Generator $I_{Gen,nen} = 70\text{A}$ — eine Brennstoffzelle von $P_{BZ} > 3000\text{W}$ benötigt.

Trotz der Brennstoffzelle kann der Fall eintreten, dass die Bordnetzleistung einen Wert aufweist, der größer ist, als die Summe aller eingespeisten elektrischen Leistungen. Dies ist, wie schon im Abschnitt 4.2 dargestellt, dadurch gekennzeichnet, dass der Delta-Ladezustand einen negativen Wert aufweist.

Ein Vorteil bei der Verwendung eines von der Drehzahl des Verbrennungsmotors unabhängigen Energiewandlers ist, dass der minimale Ladezustand (vgl. Abbildung 4.9) der Batterie bei sinnvoller Dimensionierung einen Wert annimmt, der beim Durchfahren eines Fahrzyklusses nur geringfügig vom Start-Ladezustand abweicht.

4.3.2. Energiespeicher

Auch im erweiterten Bordnetz wird mindestens ein Energiespeicher benötigt, um überschüssige Energie aufzunehmen oder Energiedefizite zu decken. Im Folgenden sollen zwei unterschiedliche Fälle betrachtet werden, wobei zum einen lediglich eine Batterie und zum anderen zusätzlich ein Doppelschichtkondensator vorhanden ist.

4. Auslegung des Bordnetzes

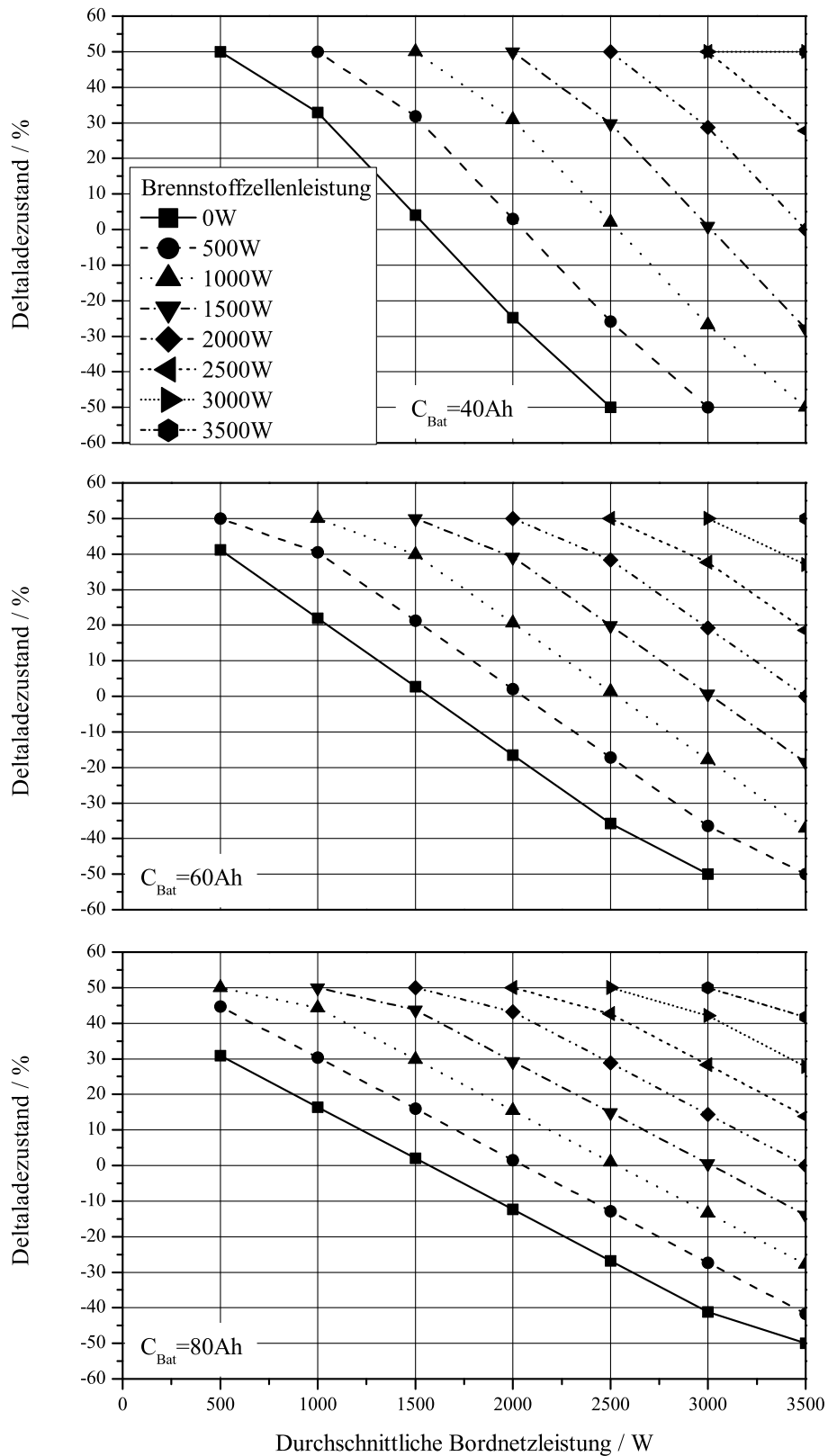


Abbildung 4.6.: Delta-Ladezustand der Batterie nach dem Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 140A$; $SOC_{Bat,Start} = 50\%$)

4. Auslegung des Bordnetzes

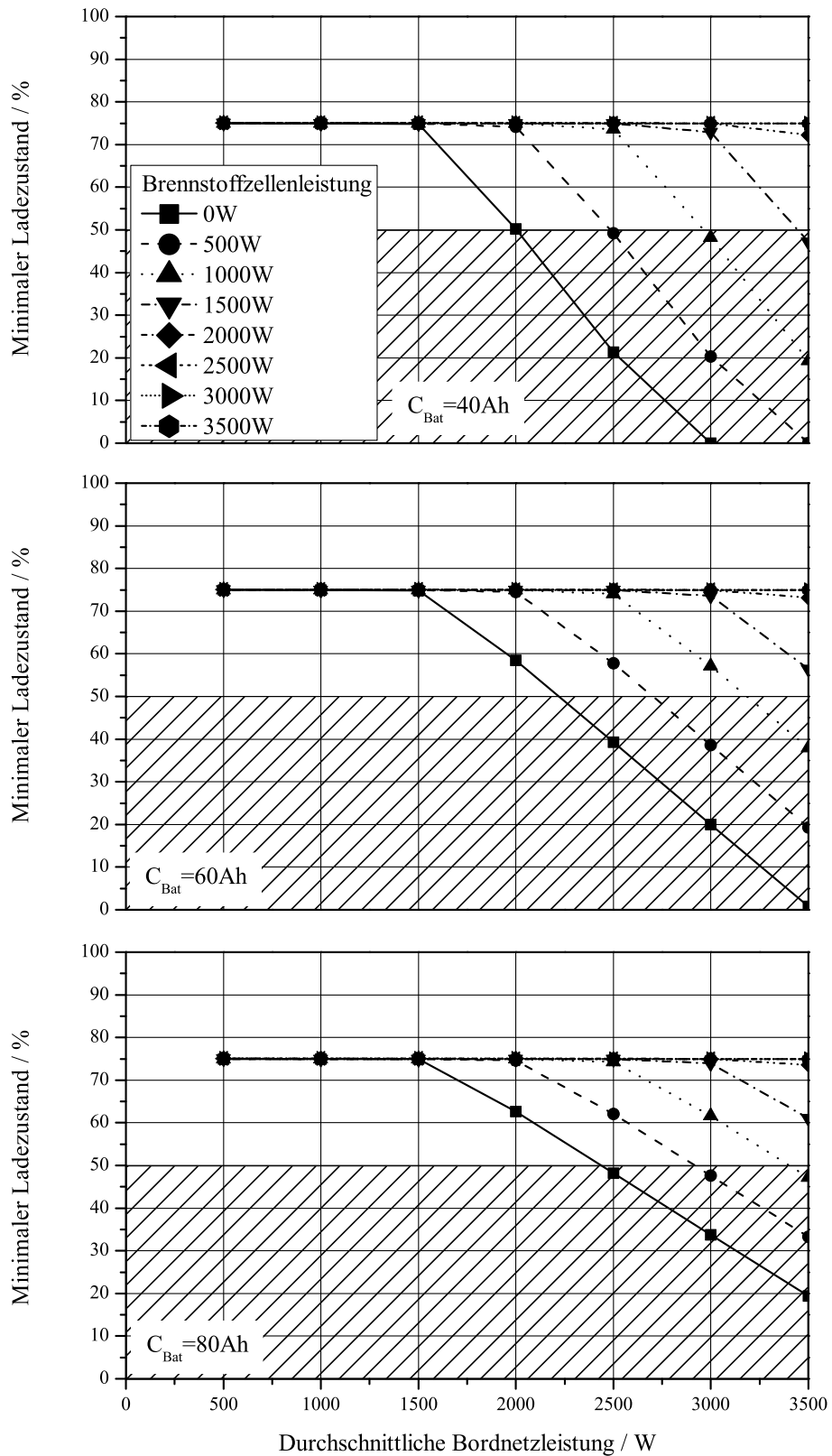


Abbildung 4.7.: Minimaler Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Bordnetzleistung ($I_{Gen,nen} = 140A; SOC_{Bat,Start} = 75\%$)

4. Auslegung des Bordnetzes

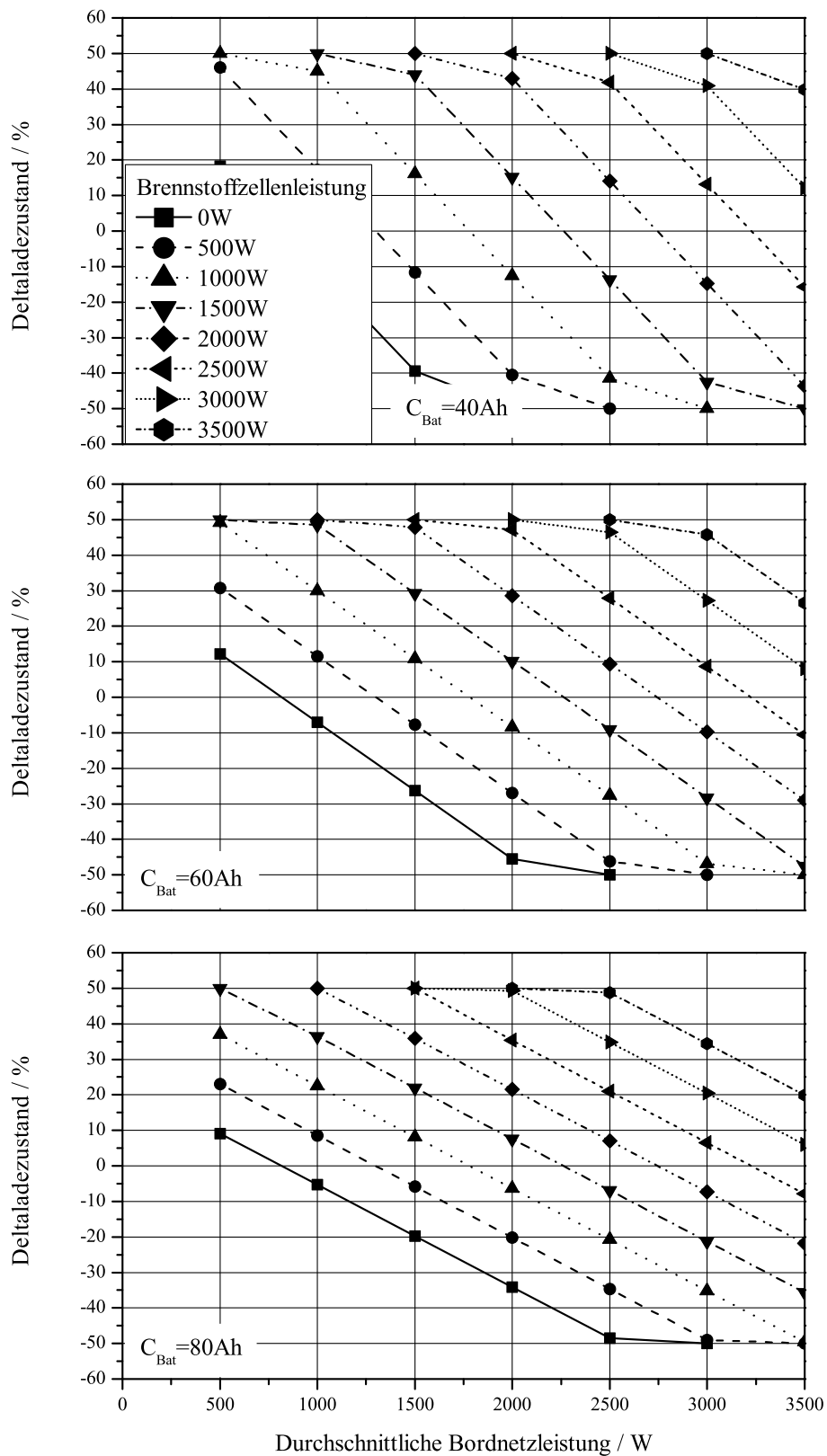


Abbildung 4.8.: Delta-Ladezustand der Batterie nach dem Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $SOC_{Bat,Start} = 50\%$)

4. Auslegung des Bordnetzes

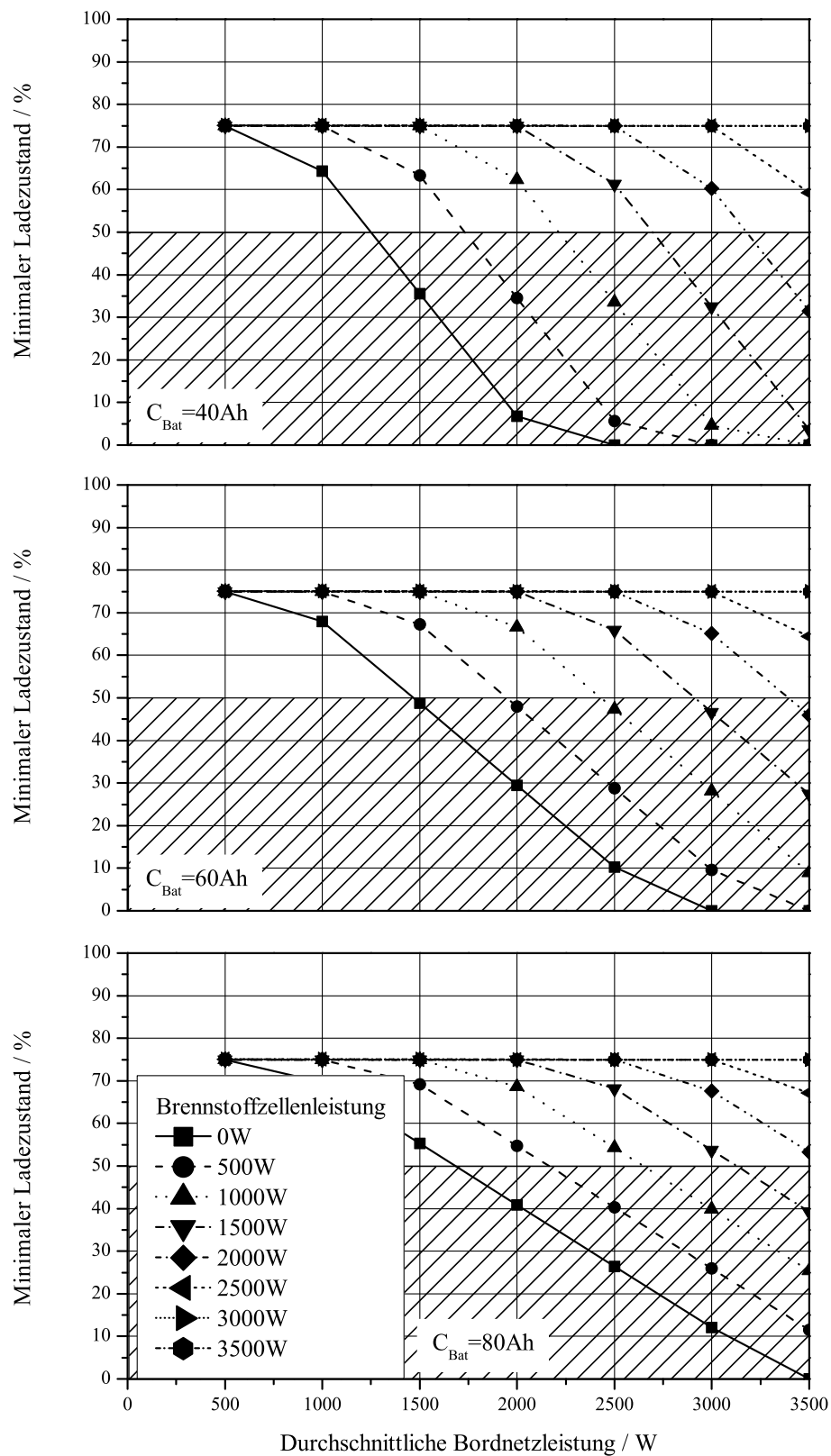


Abbildung 4.9.: Minimaler Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Bordnetzleistung ($I_{Gen,nen} = 70A; SOC_{Bat,Start} = 75\%$)

4.3.2.1. Erweitertes Bordnetz mit Batterie

Da die Energieversorgung mit einer leistungsstarken Brennstoffzelle unabhängig von der Verbrennungsmotordrehzahl ist, muss die Batterie nur bei einer sehr hohen Bordnetzleistung und gleichzeitig vorliegender niedriger Motordrehzahl einen Beitrag zur Versorgung der elektrischen Komponenten leisten. Deshalb ist es möglich, dass der Energiespeicher eine geringere Kapazität aufweist als im Standardbordnetz. Durch eine mögliche Verkleinerung der Batterie wäre mit einem Bauraumgewinn und einer Gewichtsreduzierung in diesem Bereich zu rechnen. Hierzu werden Auswirkungen auf den Ladezustand bei unterschiedlichen Batteriekapazitäten analysiert.

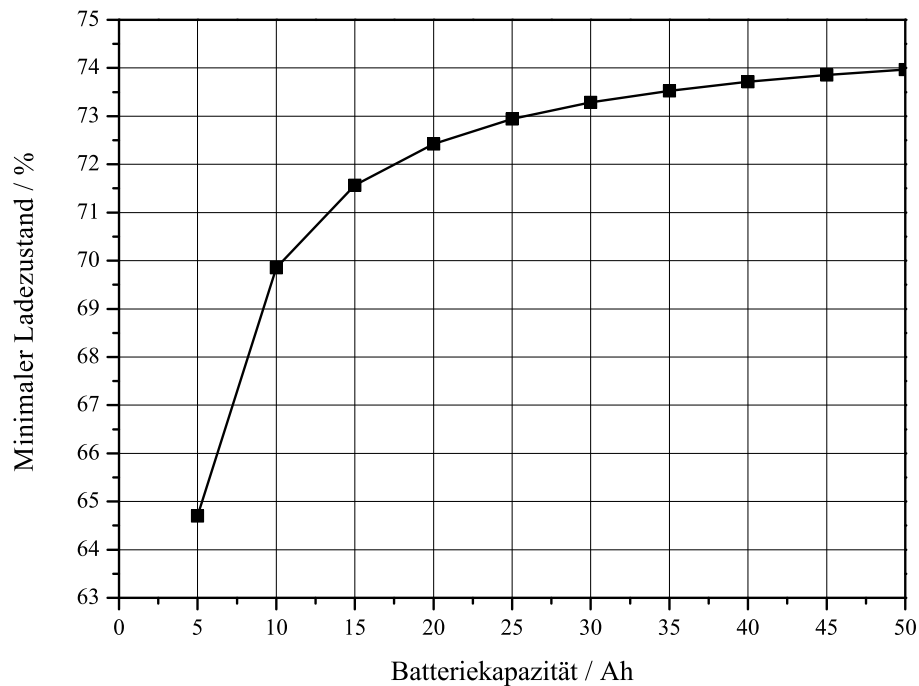


Abbildung 4.10.: Minimaler Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der Batteriekapazität ($P_{BN} = 3500W$; $I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ} = 3000W$)

Abbildung 4.10 zeigt den minimalen Ladezustand der Batterie nach dem Durchfahren des NEFZ. Aus der Abbildung geht hervor, dass nur eine sehr geringe Batteriekapazität benötigt wird, da der Ladezustand auch bei geringen Batteriekapazitäten nur wenig vom Startladezustand abweicht ($SOC_{Start} = 75\%$). Dieses Ergebnis ist aber nur gültig, wenn die Brennstoffzelle während der gesamten Simulation Energie in das Bordnetz liefern kann. Dabei kommt es u. a. aber zum Überladen der Batterie. Aus diesem Grund muss ein Energiemanagement entworfen werden, damit ein Überladen der Batterie verhindert wird. Auf dieses Energiemanagement wird im folgenden Kapitel eingegangen. Da die Brennstoffzelle aufgrund des Energiemanagements möglicherweise nicht die ganze Zeit Energie in das Bordnetz einspeisen kann, und somit die Batterie wieder zur Deckung von auftretenden Energiedefiziten Energie ins Bordnetz einspeist, ist mit einer Vergrößerung der zweckmäßigerweise zu realisierenden Batteriekapazität im Gegensatz zu den idealisierten Annahmen zu rechnen.

4.3.2.2. Erweitertes Bordnetz mit Batterie und Doppelschichtkondensator

Wenn ein weiterer Energiespeicher (Doppelschichtkondensator) im Fahrzeug installiert wird, kann die benötigte Energie im Falle eines Energiedefizites von zwei Speichern geliefert werden. D. h., dass die Batterie im Vergleich zum zuvor betrachteten Fall kleiner dimensioniert werden kann. Abbildung 4.11 bestätigt diese Aussage. Je größer die Kapazität des Doppelschichtkondensators ist, desto geringer kann die Kapazität der Batterie sein, wenn der Doppelschichtkondensator mit Priorität geladen und entladen wird. Ab einem bestimmten Kapazitätswert des Doppelschichtkondensators (hier $C_{Kon} \geq 25F$) sinkt der Ladezustand der Batterie während eines Fahrzyklusses nicht mehr ab. Dies bedeutet, dass die Batterie keine Energie ins Bordnetz liefert, womit sie überflüssig wäre. Diese Situation wird im Abschnitt 4.5 unter der Bezeichnung Extremstudie behandelt.

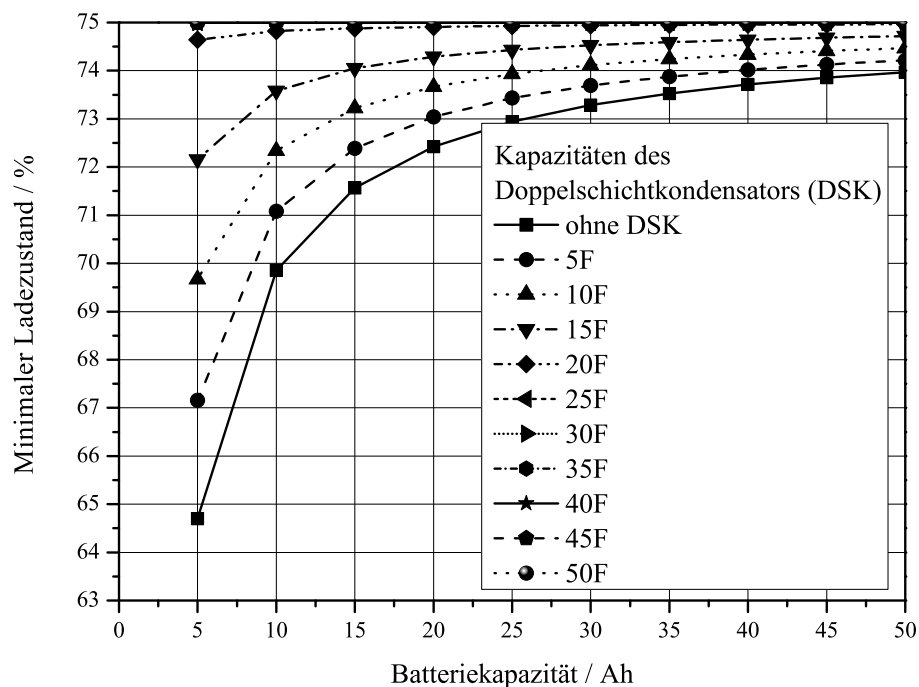


Abbildung 4.11.: Minimaler Ladezustand der Batterie unter Verwendung eines zusätzlichen Doppelschichtkondensators beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der Batteriekapazität ($P_{BN} = 3500W$; $I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ} = 3000W$)

4.4. Auswahl und Auslegung der leistungselektronischen Wandler im erweiterten Bordnetz

In den letzten Kapiteln wurde für unterschiedliche Bewertungen der Ladezustand der Batterie herangezogen. Um den Energiehaushalt des Bordnetzes bestimmen zu können, werden die Ströme der einzelnen Bordnetzkomponenten (z. B. der leistungselektronischen Wandler) verwendet. Mit Hilfe dieser Daten besteht außerdem die Möglichkeit Aussagen über die Dimensionierung der leistungselektronischen Wandler abzuleiten. Diese leistungselektronischen Schaltungen werden benötigt, um unterschiedliche Span-

4. Auslegung des Bordnetzes

nungsebenen, die im erweiterten Bordnetz auftreten, an die Bordnetzspannung anzupassen. Abbildung 4.17 zeigt anhand eines Beispiels die maximal auftretenden Ströme der einzelnen Wandler. Zusammen mit den vorhandenen Eingangs- und den benötigten Ausgangsspannungen der Wandler, können die erforderlichen Kennwerte der Wandlerbauteile abgeschätzt werden. Zuvor sollen aber zuerst unterschiedliche leistungselektronische Wandlertypen diskutiert werden.

Damit die Anzahl der verwendeten Bauteile gering ausfällt und somit auch die Kosten, sollte die gewählte Wandlertopologie möglichst einfach sein. Dadurch sinken auch die Komplexität und die Ausfallwahrscheinlichkeit. Des Weiteren werden dadurch Gewicht und Bauvolumen verringert.

4.4.1. Auswahl der leistungselektronischen Schaltung

Das im Rahmen dieser Arbeit beschriebene erweiterte Bordnetz kann bis zu vier leistungselektronische Wandler besitzen (vgl. Abbildung 2.1). Im folgenden Abschnitt werden für jeden einzelnen Wandler mögliche Topologien aufgezeigt und diskutiert. Anschließend werden Randbedingungen für die Dimensionierung der Wandler aufgezeigt.

4.4.1.1. Leistungselektronischer Wandler für die Brennstoffzelle

Der leistungselektronische Wandler (1. in Abbildung 2.1) dient der Anpassung der Brennstoffzellenspannung an die Bordnetzspannung. Entscheidend für die Art des Wandlers ist die Spannung des Brennstoffzellenstacks, welche von dessen Aufbau abhängig ist. Um eine möglichst einfache Wandlertopologie verwenden zu können, sollte diese Spannung — aufgrund der sich ständig ändernden Bordnetzspannung — unterhalb oder oberhalb der Bordnetzspannung liegen. Dadurch muss die Brennstoffzellenspannung lediglich herauf- oder heruntersetzt werden. Bei der Verwendung einer Brennstoffzelle mit einer höheren Spannung als die Bordnetzspannung ist somit eine spannungsherabsetzende Topologie zu wählen. Im einfachsten Fall kann bei einem Spannungsübersetzungsverhältnis von etwa $2 : 1 \dots 3 : 1$ ein Tiefsetzsteller verwendet werden. Die höhere Brennstoffzellenspannung hat den Vorteil, dass der Brennstoffzellenausgangsstrom — gegenüber einer Brennstoffzellenspannung kleiner als die Bordnetzspannung — reduziert wird. Die Schaltung erlaubt das Einstellen eines Stroms in der Induktivität L in Abhängigkeit von der angeschlossenen Last (vgl. Abbildung 4.12).

4.4.1.2. Leistungselektronischer Wandler für eine optionale höhere Spannungsebene

Die Wahl des leistungselektronischen Wandlers für eine höhere Spannungsebene (2. in Abbildung 2.1) ist abhängig von der gewünschten Spannungshöhe und der benötigten Leistung. Bei einem Spannungsübersetzungsverhältnis von kleiner $3 : 1$ wäre es denkbar eine Hochsetzstellertopologie (vgl. Abbildung 4.13) zu verwenden. Der Hochsetzsteller weist ebenfalls — wie der Tiefsetzsteller — eine geringe Bauteilanzahl auf.

4. Auslegung des Bordnetzes

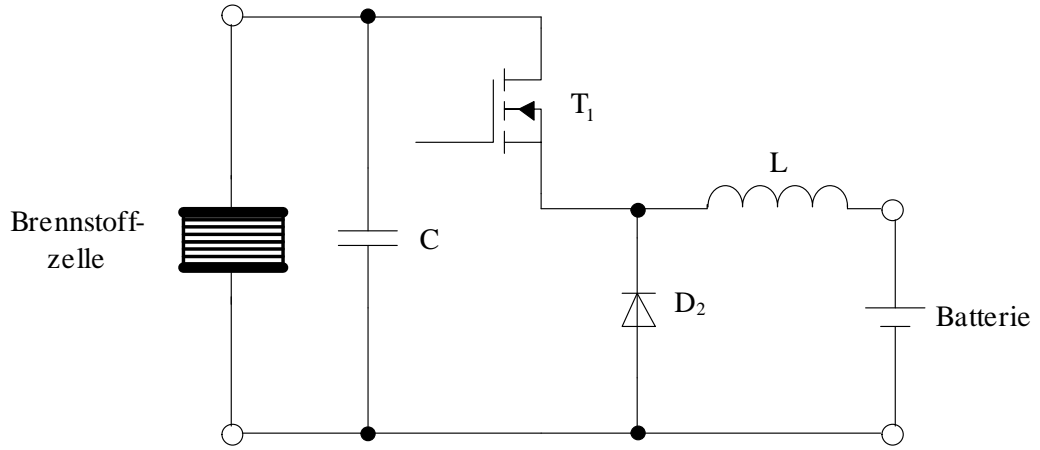


Abbildung 4.12.: Tiefsetzsteller

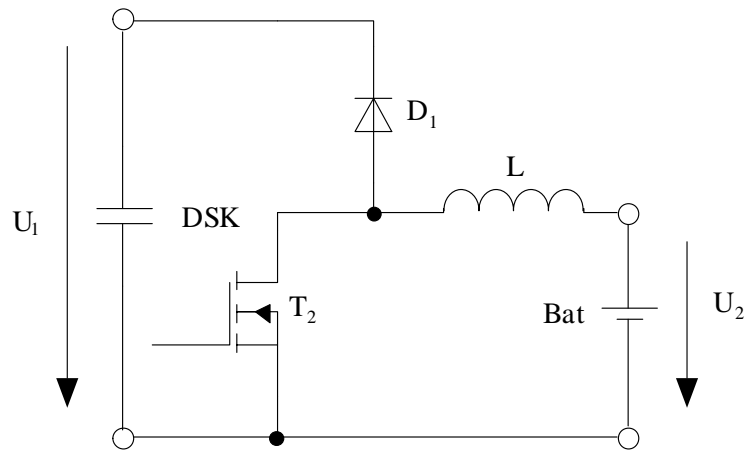


Abbildung 4.13.: Hochsetzsteller

4.4.1.3. Leistungselektronischer Wandler für einen optionalen Doppelschichtkondensator

Auf Grund seiner vom Energieinhalt abhängigen Spannung (vgl. (2.15)) benötigt der Doppelschichtkondensator einen leistungselektronischen Wandler (3. in Abbildung 2.1), damit seine Funktion für das Bordnetz optimal genutzt werden kann. Dieser DC/DC-Wandler muss ein bidirektionales Stellglied (ein Zwei-Quadranten-Steller) sein. Die Aufgabe des Wandlers ist die Ladung und Entladung des Doppelschichtkondensators und somit die Übertragung der Energie zwischen den Spannungsebenen. Ebenfalls wie beim Wandler (1. in Abbildung 2.1) sind die Eingangsströme und Ausgangsströme abhängig vom geforderten Laststrom, von der Bordnetzspannung sowie von der Kondensatorspannung. Die Abbildungen 4.14a - 4.14d zeigen mögliche Topologien, die einen Zwei-Quadranten-Betrieb ermöglichen. Die einfachste Schaltungsausführung eines bidirektionalen Wandlers für die Kopplung zwischen Bordnetz und Doppelschichtkondensator ist der Brückenweig (vgl. Abbildung 4.14a). Dieser Wandler besitzt eine geringe Anzahl von Bauelementen und lässt sich einfach regeln. Diese Schaltung weist einen eingeschränkten Arbeitsbereich ($U_1 \geq U_2$) auf. Im Gegensatz zu den anderen Schaltungstopologien mit Transformator (vgl. Abbildung 4.14c und 4.14d) weist der Brückenweig keine galvanische Trennung auf, wodurch eine Abkopplung eines möglicherweise vorhandenen Hochvolt-Netzes ($U_{HV} > 120V$) vom Niedervolt-Netz sichergestellt wird. Der Transformator ermöglicht ebenfalls ein beliebiges Spannungsübersetzungsverhältnis — auch größer als 1:3. Um eine Leistung im kW-Bereich zu übertragen, sollte eine andere Topologie gewählt werden z. B. ein bidirektionaler Vollbrücken-Gegentaktwandler (s. Abbildung 4.14d). Dieser weist aber eine hohe Anzahl an Bauteilen auf.

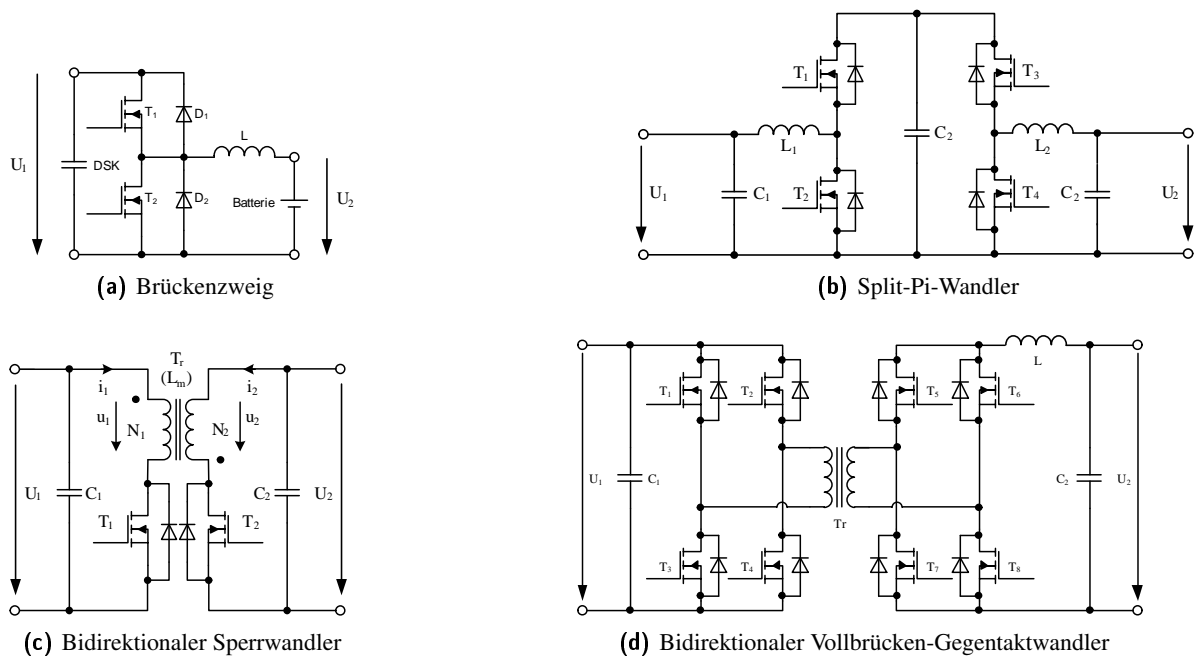


Abbildung 4.14.: Übersicht bidirektionale DC/DC-Wandler

Abbildung 4.14 erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da es noch eine Vielzahl an Wandlertopologien gibt.

4. Auslegung des Bordnetzes

4.4.1.4. Gleichrichter des Generators

Der Gleichrichter (4. in Abbildung 2.1) innerhalb des Generators besteht in einem Kraftfahrzeug ausschließlich aus einem ungesteuerten Brückengleichrichter (B6U). Dieser wandelt die dreiphasige Spannung des Generators in eine pulsierende Gleichspannung um (vgl. Abbildung 4.15). Zur Begrenzung von Spannungsspitzen werden auch Z-Dioden als Gleichrichterdioden ($D_{1,1} \dots D_{6,2}$) verwendet. Bei leistungsstarken Generatoren werden auch jeweils zwei Dioden parallel geschaltet. Zur besseren Ausnutzung der einzelnen Stränge (L_1 , L_2 und L_3), werden bei einem in Stern geschalteten Generator zusätzliche Mittelpunktdioden (D_7 und D_8) am Sternpunkt (M) verwendet. Durch diese Maßnahme erhöht sich die Stromabgabe des Generators und somit die Maximalleistung um 5. . . 15%, ohne dass das Ständerblechpaket vergrößert werden muss [74].

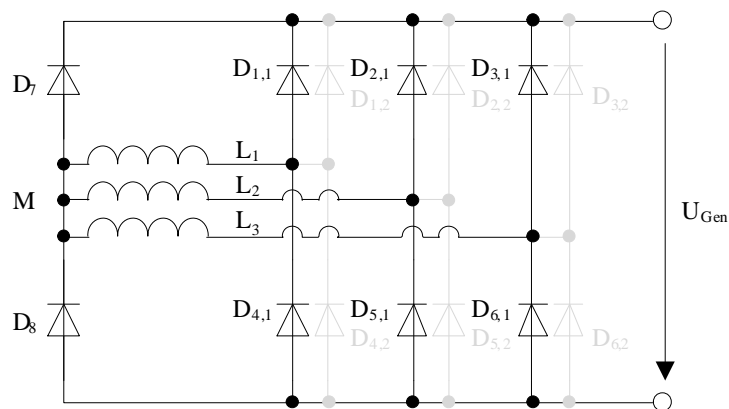


Abbildung 4.15.: Brückengleichrichter des Generators

4.4.2. Auslegung der leistungselektronischen Wandler

Für die Dimensionierung der einzelnen leistungselektronischen Schaltungen werden Randbedingungen benötigt. Dazu zählen u. a. die Bestimmung der Eingangs- und Ausgangsparameter. Mit diesen Werten ist es möglich, eine Schaltung auszulegen. Im Folgenden sollen für die Wandler (1. und 3. in Abbildung 2.1) im erweiterten Bordnetz die Randbedingungen (Spannungen und Ströme) aufgezeigt werden. Da die optionale höhere Spannungsebene nicht Gegenstand dieser Arbeit war, wird nicht näher auf den hierfür benötigten Wandler eingegangen. Ebenfalls wird nicht auf die Auslegung des Gleichrichters des Generators eingegangen.

4.4.2.1. Leistungselektronischer Wandler für die Brennstoffzelle

Auch wenn die Brennstoffzelle aufgrund eines Energiemanagements nicht zu jeder Zeit die maximale Brennstoffzellenleistung an das Bordnetz abgibt, muss der dazugehörige Wandler trotzdem für die maximalen Spannungen und Ströme dimensioniert werden. Tabelle 4.3 zeigt eine mögliche Auslegung des benötigten DC/DC-Wandlers, für den, ausgehend von den Darlegungen in Abschnitt 4.4.1.1, die Ausführung als Tiefsetzsteller angenommen wird, wenn $P_{BZ,max} = 3500W$ angenommen wird.

Tabelle 4.3.: Mögliche Auslegung für den benötigten Tiefsetzsteller

Tiefsetzsteller	
Spannung batterieseitig	$11\text{V} < U_{Bat,s} < 14,5\text{V}$
Spannung brennstoffzellenseitig	$36\text{V} < U_{BZ,s} < 40\text{V}$
Maximaler Strom des Wandlers batterieseitig	$I_{Bat,s,max} = 318\text{A}$
Maximaler Strom des Wandlers brennstoffzellenseitig	$I_{BZ,s,max} = 97\text{A}$

4.4.2.2. Leistungselektronischer Wandler für einen Doppelschichtkondensator

Der leistungselektronische Wandler muss für den größten Strom, der während des Betriebs des Fahrzeugs vom Doppelschichtkondensator geliefert wird, dimensioniert werden. Der größte Strom muss dann vom Kondensator abgegeben werden, wenn die Brennstoffzelle auf Grund eines hohen Ladezustandes der Batterie ausgeschaltet ist, der Verbrennungsmotor aufgrund einer Start-Stopp-Phase nicht arbeitet und somit der Generator keine Energie ins Bordnetz liefern kann und zusätzlich eine große Leistung vom Bordnetz gefordert wird und der Verbrennungsmotor wieder gestartet werden muss. Abbildung 4.16 zeigt die Verläufe der Ein- und Ausgangsströme des Wandlers des Doppelschichtkondensators. Dabei ist zu erkennen, dass, wenn der Doppelschichtkondensator auch zum Starten des Verbrennungsmotors verwendet wird, am Wandler batterieseitig Ströme von bis zu 370A auftreten. Je nach Kondensatorspannung bedeutet dies Kondensatorströme von derselben Größe. Dieser Wert könnte aufgrund steigender Bordnetzleistungen weiter steigen. Die Ladeströme sind batterieseitig nicht so groß wie die Entladeströme, sie sind aber abhängig von der überschüssigen Energie innerhalb des Bordnetzes, welche wiederum von der Brennstoffzellenleistung, Generatorleistung und der Lastleistung abhängig ist.

Dies ist von Bedeutung für die optimale Auslegung des leistungselektronischen Wandlers. Tabelle 4.4 zeigt die aus Abbildung 4.16 abgelesenen Maximalwerte. Abbildung 4.17 fasst die Ergebnisse noch einmal zusammen und gibt einen Überblick über die auftretenden Maximalströme im erweiterten Bordnetz mit Doppelschichtkondensator. Damit diese Abbildung übersichtlich bleibt, wurde auf die Lasten und die höhere Spannungsebene verzichtet. Wenn die Doppelschichtkondensatorspannung genauso groß ist, wie die Bordnetzspannung, sind die jeweiligen Eingangs- und Ausgangsströme — wenn die Verluste nicht berücksichtigt werden — gleich groß.

Bei der Verwendung eines Brückenzeigs (vgl. Abbildung 4.14a) ist außerdem zu beachten, dass bei Stillstand des Verbrennungsmotors, wenn die Bordnetzspannung (in diesem Fall Batteriespannung) gleich der Doppelschichtkondensatorspannung ist ($U_{Bat} = U_{Kon}$), die Verluste des Doppelschichtkondensators — aufgrund der Brückenzeigtopologie — von der Batterie gedeckt werden müssen. Dadurch entlädt sich die Batterie bei längerem Stillstand des Fahrzeugs. Auch muss der Doppelschichtkondensator vor dem Einbau vorgeladen werden, um eine Zerstörung des Wandlers zu verhindern. Eine Alternative zum vorgeladenen Doppelschichtkondensator wäre eine Ladeschaltung, die den Doppelschichtkondensator von einer Spannung $U_{Kon} < U_{Bat}$ auf eine Spannung $U_{Kon} \geq U_{Bat}$ vorladen kann.

4. Auslegung des Bordnetzes

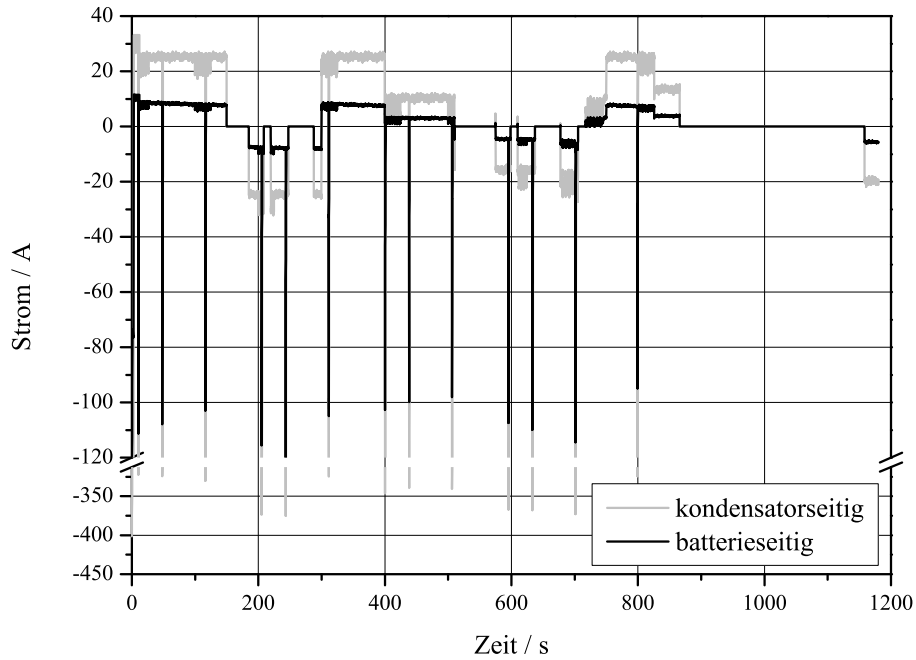


Abbildung 4.16.: Ströme des DCDC-Wandlers — kondensatorseitig und batterieseitig; ($P_{BN} = 3500\text{W}$, $P_{BZ} = 3500\text{W}$; $I_{Gen,nen} = 70\text{A}$; $C_{Bat} = 55\text{Ah}$; $C_{Kon} = 160\text{F}$ mit Start-Stopp-Funktion)

Tabelle 4.4.: Mögliche Auslegung für den benötigten bidirektionalen DC/DC-Wandler

Bidirektionaler DC/DC-Wandler	
Spannung batterieseitig	$11\text{V} < U_{Bat,s} < 14,5\text{V}$
Spannung doppelschichtkondensatorseitig	$14,5\text{V} < U_{Kon,s} < 48\text{V}$
Maximaler Eingangsstrom des Wandlers batterieseitig	$I_{Bat,s,input,max} = 33\text{A}$
Maximaler Ausgangsstrom des Wandlers batterieseitig	$I_{Bat,s,output,max} = 370\text{A}$
Maximaler Eingangsstrom des Wandlers doppelschichtkondensatorseitig	$I_{Kon,s,input,max} = 370\text{A}$
Maximaler Ausgangsstrom des Wandlers doppelschichtkondensatorseitig	$I_{Kon,s,output,max} = 33\text{A}$

4. Auslegung des Bordnetzes

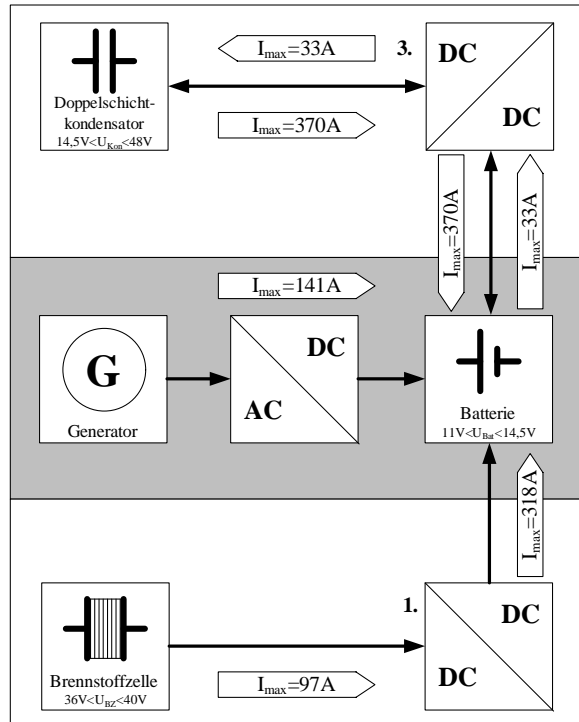


Abbildung 4.17.: Mögliche Maximalströme innerhalb des erweiterten Bordnetzes

4.5. Extremstudie — vom Standardbordnetz zum Bordnetz ohne Generator und Batterie

Im Folgenden soll eine Extremstudie untersucht werden, bei der der Generator durch eine Brennstoffzelle und die Batterie durch einen Doppelschichtkondensator ersetzt werden (vgl. Abbildung 4.18).

Dabei soll als Ausgangssituation das erweiterte Bordnetz mit Brennstoffzelle und Doppelschichtkondensator dienen. Im ersten Schritt wird der Generator aus dem Bordnetz entfernt und im Anschluss die Batterie, die vom Doppelschichtkondensator vollständig ersetzt wird.

4.5.1. Bordnetz mit Brennstoffzelle, Doppelschichtkondensator, Batterie und Generator

In Abbildung 4.19 ist der Strom dargestellt, der im erweiterten Bordnetz mit Brennstoffzelle vom Generator zusätzlich zum Strom der Brennstoffzelle zur Verfügung gestellt werden muss, damit alle Verbraucher ausreichend mit Energie versorgt werden können. Dieser Strom – der ausschließlich zur Deckung der Lastspitzen dient – ist im Gegensatz zum maximalen Strom, den der Generator abgeben könnte, sehr gering. Dies zeigt, dass in diesem Fall der Generator überdimensioniert und diese Kombination unzuweckmäßig ist. Es wäre deshalb möglich, den Generator zu verkleinern oder vollständig auf dieses Bauteil zu verzichten, da solch ein kleiner Generator nicht sinnvoll wäre. Die Energiedifferenz müsste aus den Energiespeichern gedeckt werden, damit die Brennstoffzelle weiterhin einen konstanten Strom abgeben kann. Die Brennstoffzellenleistung wurde hierbei der Bordnetzleistung ($\overline{P}_{Last} = 3500W$) angepasst und

4. Auslegung des Bordnetzes

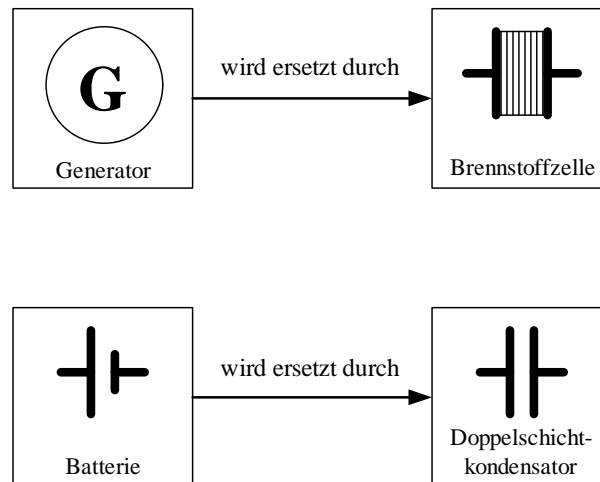


Abbildung 4.18.: Extremstudie — Austausch des Generators und der Batterie durch eine Brennstoffzelle und einen Doppelschichtkondensator

unterstützt das Bordnetz mit maximal $P_{BZ,max} = 3500\text{W}$.

4.5.2. Bordnetz mit Brennstoffzelle, Doppelschichtkondensator und Batterie

Abbildung 4.20 zeigt den Doppelschichtkondensator- und den Batteriestrom, wie sie sich ergeben, wenn der Generator aus dem Fahrzeug entfernt wurde. Die Brennstoffzelle dient als einziger Energiewandler im Fahrzeug. Das Energiemanagement — welches u. a. im folgenden Kapitel 5 beschrieben wird — ist in diesem Fall so programmiert, dass bei einem auftretenden Energiedefizit zuerst der Doppelschichtkondensator entladen wird und erst im Anschluss die Batterie. Gleiches gilt für die Ladung — zuerst wird der Doppelschichtkondensator vollständig geladen und anschließend die Batterie. Bei diesem Szenario bleibt der Ladezustand der Batterie nahezu konstant.

4.5.3. Bordnetz mit Brennstoffzelle und Doppelschichtkondensator

Hierbei soll die Möglichkeit untersucht werden, den Generator und die Bleibatterie durch eine Brennstoffzelle und einen Doppelschichtkondensator vollständig zu ersetzen. In Abbildung 4.21 sind die Ströme des Doppelschichtkondensators und der zunächst noch vorhandenen Batterie dargestellt. Dabei fällt auf, dass elektrische Energie weder in der Batterie zwischengespeichert — was durch positive Ströme angezeigt werden würde — noch Energie aus der Batterie entnommen wird — was negative Ströme bedeuten würde. Hierbei wurde lediglich der Doppelschichtkondensator auf 30F vergrößert. Aus diesem Grund wäre es denkbar, auf die Batterie zu verzichten und ausschließlich den Doppelschichtkondensator mit seiner großen Leistungsdichte zu verwenden. Eine Alternative dazu wäre eine kleinere Batterie — im einstelligen Amperestundenbereich — zusätzlich zum Doppelschichtkondensator, die für den Fall eines längeren Stillstandes des Fahrzeugs, beispielsweise in einer Garage — falls der Doppelschichtkondensator durch Selbstentladung vollständig entleert sein sollte — ein sicheres Starten des Verbrennungsmotors ermöglicht.

4. Auslegung des Bordnetzes

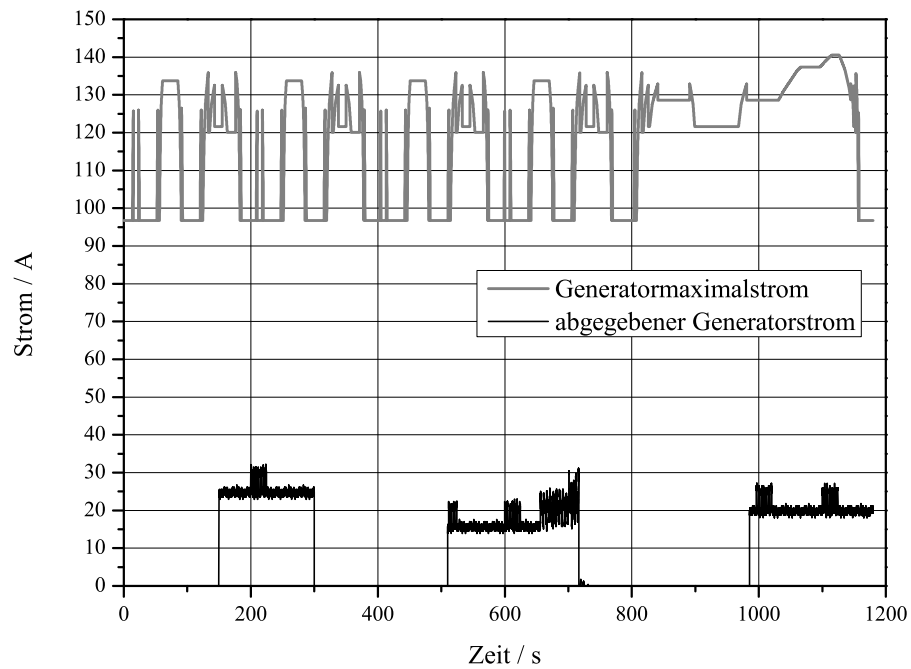


Abbildung 4.19.: Möglicher maximaler Generatorstrom beim Durchfahren des NEFZ und der tatsächlich vom Generator gewandelte und ins Bordnetz gespeiste Strom ($I_{Gen,max} = 140A$, $\overline{P_{Last}} = 3500W$, $C_{Kon} = 10F$, $P_{BZ} = 3500W$, $C_{Bat} = 30Ah$)

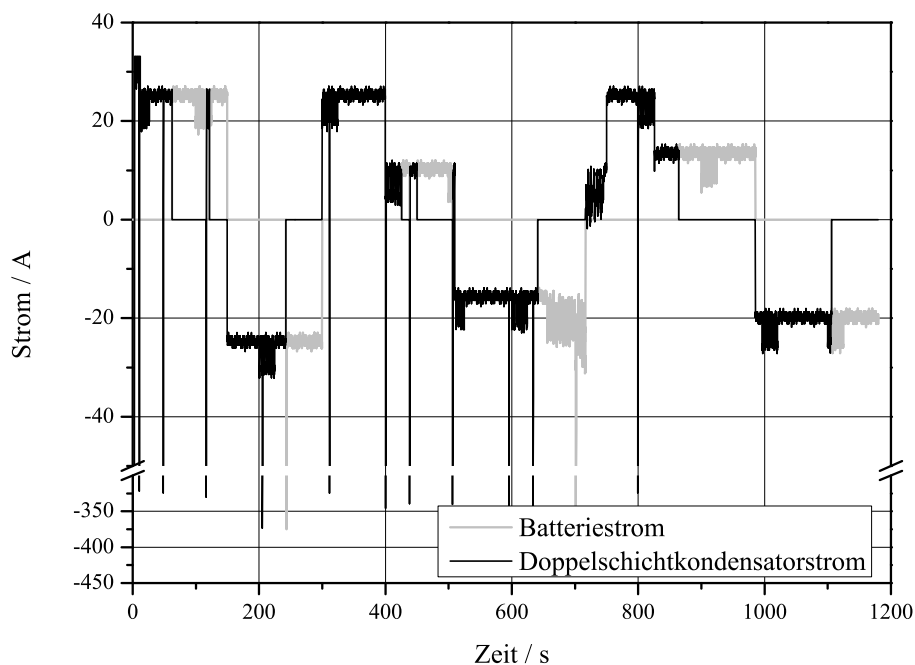


Abbildung 4.20.: Ströme des Doppelschichtkondensators und der Batteriestrom ($\overline{P_{Last}} = 3500W$, $C_{Kon} = 20F$, $P_{BZ,max} = 3500W$, $C_{Bat} = 30Ah$)

4. Auslegung des Bordnetzes

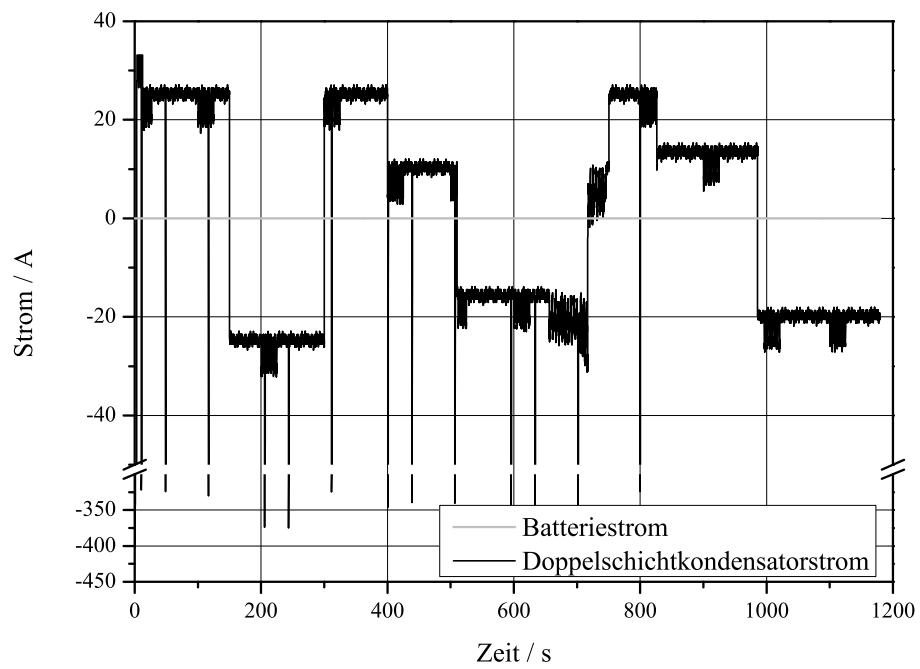


Abbildung 4.21.: Doppelschichtkondensatorstrom ($\overline{P}_{Last} = 3500W$, $C_{Kon} = 30F$, $P_{BZ,max} = 3500W$, $C_{Bat} = 30Ah$)

5. Energiemanagement

5.1. Notwendigkeit und Kriterien eines Energiemanagements

Die vorangegangenen Kapitel haben das erweiterte Bordnetz ausführlich beschrieben. Damit die einzelnen Komponenten — Energiewandler und –speicher — des erweiterten Bordnetzes optimal miteinander arbeiten, ist ein übergeordnetes Energiemanagement, das die Energieflüsse innerhalb des Bordnetzes steuert, unabdingbar. Dieses Energiemanagement muss die Energie im Bordnetz jeweils so verteilen, dass die Energieversorgung der elektrischen Verbraucher sichergestellt ist, so dass keine für den Betrieb des Fahrzeugs wesentliche elektrische Komponente ausgeschaltet werden muss bzw. ausfällt, wie es beispielsweise in [9, 25] beschrieben wird. Dies gilt besonders für sicherheitsrelevante Komponenten. Bei einem Energiedefizit könnte aber auf Komponenten verzichtet werden, sofern dies lediglich den Komfort des Fahrzeugs schmälert. Ferner hat das Energiemanagement die Aufgabe, die Energieflüsse so zu steuern, dass die Lebensdauer der Energiewandler und –speicher maximiert wird. Konkret bedeutet das, dass z. B. die Ladebilanz sichergestellt wird und somit der Ladezustand der Batterie möglichst hoch ist ($SOC > 50\%$, damit es nicht zu irreversiblen Schädigungen der Batterie kommt [19]) und keine Tiefentladungen auftreten. Außerdem sollte die Batterie nicht überladen und eine hohe Anzahl von Zyklen mit einem geringen Ladezustand der Batterie verhindert werden (vgl. Abbildung 2.9). Das Energiemanagement sollte so eingestellt werden, dass bei Verwendung eines Doppelschichtkondensators dessen Nennspannung beim Laden nicht vollständig erreicht wird. Die Spannung je Kondensatorzelle sollte um etwa 0,2V niedriger sein als die Nennspannung. Damit verlängert sich die Lebensdauer des Doppelschichtkondensators [45].

Des Weiteren kann ein Energiemanagement auch helfen, den Bordnetzwirkungsgrad durch eine gezielte Ansteuerung der Energiewandler und –speicher zu vergrößern. So könnte der Generator bei einer hohen Drehzahl und einer geringen Stromabgabe vollständig ausgeschaltet werden, da er in diesem Bereich des Kennlinienfeldes einen äußerst geringen Wirkungsgrad besitzt. In diesem Fall könnte die Brennstoffzelle einen größeren Wirkungsgrad aufweisen. Das Energiemanagement hat außerdem die Aufgabe, die Brennstoffzelle so zu führen, dass keine Platinkorrosion auftritt, die ihre Lebensdauer verkürzen würde. Das heißt, dass der Brennstoffzelle möglichst nur statische Ströme entnommen und ständige Hoch- und Niederfahrprozesse vermieden werden sollten. Weiterhin soll das Energiemanagement dafür sorgen, dass die Bordnetzspannung möglichst konstant ist und nicht unter einen bestimmten Wert fällt.

5.1.1. Analyse von Bordnetztopologien und Energiemanagements

Beim Entwurf eines Energiemanagements gibt es eine Vielzahl an Freiheitsgraden. Deshalb soll im Folgenden eine Analyseverfahren für Bordnetze mit Energiemanagement vorgestellt werden. Im Ergebnis

5. Energiemanagement

der Analyse soll es deutlich werden, ob das Energiemanagement und die Dimensionierung der Energiewandler und –speicher zweckmäßig aufeinander abgestimmt sind oder nicht. Davon ausgehend können Optimierungen am Energiemanagement und am Bordnetz durchgeführt werden. Für die Analyse werden relevante Parameter des Bordnetzes bewertet. Im Folgenden sollen diese Parameter und ihre Berücksichtigung in der abschließenden Analyseformel erläutert werden. Die aufgestellte Analyseformel ist so aufgebaut, dass jede Abweichung vom idealen Verhalten sogenannte Fehlerpunkte zur Folge hat, die aufsummiert werden. Je höher die Anzahl an Fehlerpunkten, die eine Kombination (aus Energiewandlern und -speichern) aufweist, desto weiter ist diese vom idealen Verhalten (z. B. Ladezustand der Batterie immer 100%) entfernt. Da die einzelnen Terme unterschiedliche Wichtigkeiten besitzen, werden sie mit Wichtungsfaktoren multipliziert, welche einen Wert zwischen 0 . . . 10 annehmen können.

5.1.1.1. Aufbau der Analysefunktion

Gleichung (5.1) zeigt den Aufbau der Analysefunktion. Diese ist unterteilt in sieben Terme.

$$\begin{aligned}
 F_E = & \sum_{i=1}^n \frac{1}{\text{Anzahl Simulationsschritte}} \cdot & (5.1) \\
 & \left[\underbrace{\left(\frac{I_{BZ}(t_{i-1}) - I_{BZ}(t_i)}{I_{BZ,nen}} \right)^2 \cdot \text{Gewicht}_1}_{\text{Term 1}} + \underbrace{(1 - SOC(t_i))^2 \cdot \text{Gewicht}_2}_{\text{Term 2}} + \right. \\
 & + \underbrace{(1 - BZ_{faktor}(t_i))^2 \cdot \text{Gewicht}_3}_{\text{Term 3}} + \underbrace{\left(\frac{I_{Gen}(t_i)}{I_{Gen,max}(t_i)} \right)^2 \cdot \text{Gewicht}_4}_{\text{Term 4}} + \\
 & + \underbrace{\left(\frac{m_{BZ}}{m_{BZ,ref}} \right)^2 \cdot \text{Gewicht}_5}_{\text{Term 5}} + \underbrace{\left(\frac{m_{Gen}}{m_{Gen,ref}} \right)^2 \cdot \text{Gewicht}_6}_{\text{Term 6}} + \\
 & \left. + \underbrace{\left(\frac{m_{Bat}}{m_{Bat,ref}} \right)^2 \cdot \text{Gewicht}_7}_{\text{Term 7}} \right] \rightarrow \min
 \end{aligned}$$

Das Ergebnis der Gleichung (5.1) dient der Findung der optimalen Kombination aus Energiespeicher, Energiewandler und Energiemanagement. Es handelt sich dann immer um den geringsten Wert (bzw. minimale Fehlerpunkteanzahl). Der ideale Fall — der aber nicht eintreten kann — wäre eine Lösung $F_E = 0$.

Die zusammengefassten und gewichteten Ergebnisse der Einzelterme werden durch die Anzahl der Simulationsschritte n geteilt, damit bei den Beispielen der Analyse unterschiedliche Fahrzyklen miteinander verglichen werden können.

Die Quadrierung der Terme verhindert negative Ergebnisse und bewertet größere Abweichungen vom idealen Wert mit einer höheren Fehlerzahl [75, 76].

5.1.1.2. Term 1: Brennstoffzellenstrom

Der wichtigste Wert in der Analyse ist der Brennstoffzellenstrom I_{BZ} . Dieser sollte möglichst konstant sein ($\Delta I_{BZ} \stackrel{!}{=} 0$). Durch einen quasi-stationären Betrieb kann die Lebensdauer des Brennstoffzellensystems verbessert werden, da kritische Zustände im System vermieden werden, die das Auftreten von Platinkorrosion im Leerlauf und Unterversorgung mit Reaktanden im Grenzstrombereich minimieren und zur Alterung der Brennstoffzelle führen würden [77]. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass der Brennstoffzelle keine dynamischen Ströme entnommen werden und die Brennstoffzelle nicht im Leerlauf operieren (wird im Term 3 Abschnitt 5.1.1.4 berücksichtigt) sollte. Außerdem wirken sich der Hoch- und Niederfahrprozess negativ auf die Zellenalterung (vgl. Abschnitt 2.3.1.5) aus [36].

Aus diesem Grund berücksichtigt der erste Term der Analysegleichung (5.1) die Änderung des Brennstoffzellenstroms. Dieser Term ist Null, wenn keine Brennstoffzellenstromänderung vorliegt. Je größer dessen Änderung — bezogen auf den Brennstoffzellennennstrom — ist, desto größer wird auch dieser Term.

Da die Schrittweite der Simulation sehr kurz ist ($\Delta t = 0,1\text{ s}$) und sich der Brennstoffzellenstrom in dieser Zeit nur wenig verändert, wird dieser Term zur Anpassung an die anderen zusätzlich mit 1000 multipliziert (Faktor ist im Gewicht 1 berücksichtigt; vgl. Tabelle 5.1), damit er die gleiche Größenordnung aufweist. Abbildung 5.1 zeigt beispielhaft den Beitrag von Term 1 zu F_E , wenn die Brennstoffzellenleistung und die Bordnetzleistung variiert werden. Das Bordnetz besitzt in diesem Fall einen Generator mit einem geringen Nennstrom ($I_{Gen, nen} = 70\text{ A}$) und eine Bleibatterie mit einer geringen Kapazität ($C_{Bat} = 20\text{ Ah}$).

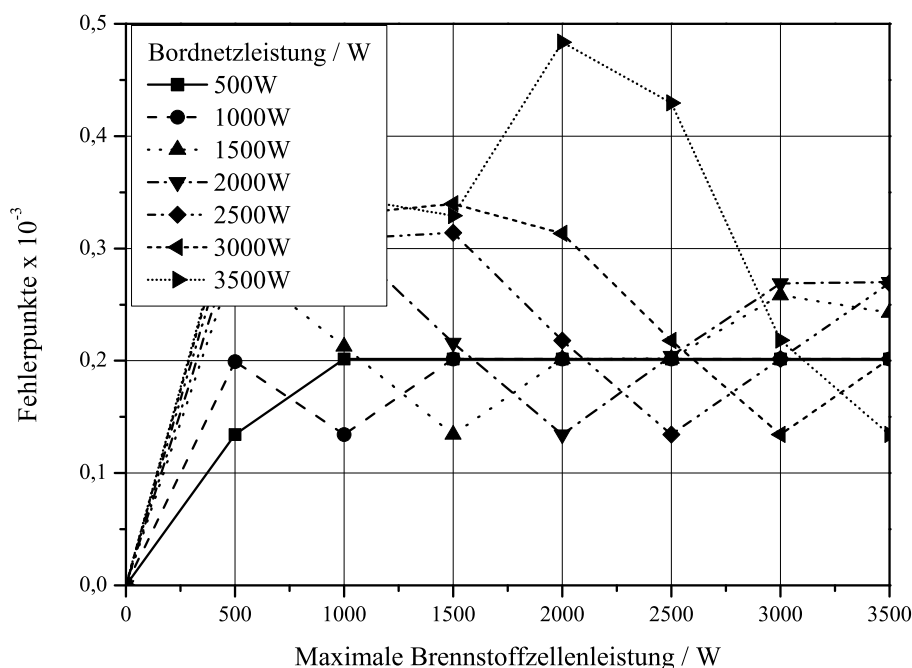


Abbildung 5.1.: Ergebnisbeispiel für den Term 1 beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen, nen} = 70\text{ A}$; $C_{Bat} = 20\text{ Ah}$; Strategie 1; ungewichtet)

5.1.1.3. Term 2: Ladezustand der Batterie (SOC)

Der Ladezustand (SOC) der Batterie kann im Zusammenhang mit dem Energiemanagement ebenfalls als ein wichtiger Parameter angesehen werden. Bei Kenntnis dieses Wertes ist es möglich, das Energiemanagement so anzupassen, dass z. B. die Lebensdauer der Batterie vergrößert wird. Wenn der Ladezustand nahezu 100% erreicht, ist es möglich, ein Überladen der Batterie (Ladeschlussspannung $U_{LS} = 2,3 \dots 2,4V$) zu verhindern, indem beispielsweise die Brennstoffzelle niedergefahren wird und keine Energie mehr in das Bordnetz einspeist. Des Weiteren kann der Ladezustand überwacht werden, um somit eine Tiefentladung der Batterie zu verhindern.

Aus diesem Grund sollte der Ladezustand der Batterie einen möglichst hohen Wert aufweisen. In der Analysegleichung (5.1) wird der Ladezustand (SOC) im zweiten Term berücksichtigt. Dieser wird immer dann Null, wenn der Ladezustand $SOC = 100\%$ annimmt. Jede Abweichung von diesem Wert führt zu einer Vergrößerung des Terms. Abbildung 5.2 zeigt beispielhaft den Beitrag von Term 2 zu F_E , wenn die Brennstoffzellenleistung und die Bordnetzleistung variiert werden.

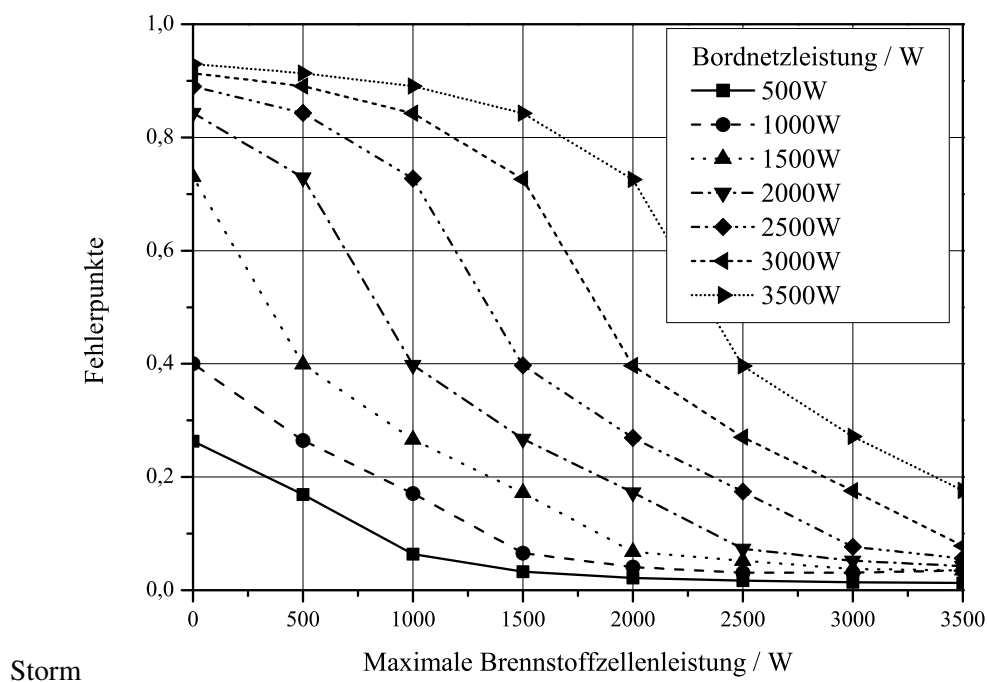


Abbildung 5.2.: Ergebnisbeispiel für den Term 2 beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $C_{Bat} = 20Ah$; Strategie 1; ungewichtet)

5.1.1.4. Term 3: Betriebszustand der Brennstoffzelle

Dieser Term berücksichtigt den Betriebszustand der Brennstoffzelle (0...100%). Aufgrund des zusätzlichen Aufwands, der bei der Verwendung einer Brennstoffzelle in einem Fahrzeug entsteht, sollte diese eine hohe Laufzeit aufweisen und möglichst viel Energie in das Bordnetz einspeisen. Das bedeutet, dass der Betriebszustand möglichst zu jeder Zeit den Wert 1 (entspricht 100% in Betrieb) besitzt. Somit wird das in der Strategie 1 (siehe Abschnitt 5.2.2) beschriebene vollständige Niederfahren bzw. der schädli-

che Betrieb im Leerlauf härter bestraft, als das temporäre Absenken der Brennstoffzellenleistung in den Teillastbereich. Abbildung 5.3 zeigt beispielhaft den Beitrag von Term 3 zu F_E , wenn die Brennstoffzellenleistung und die Bordnetzleistung variiert werden.

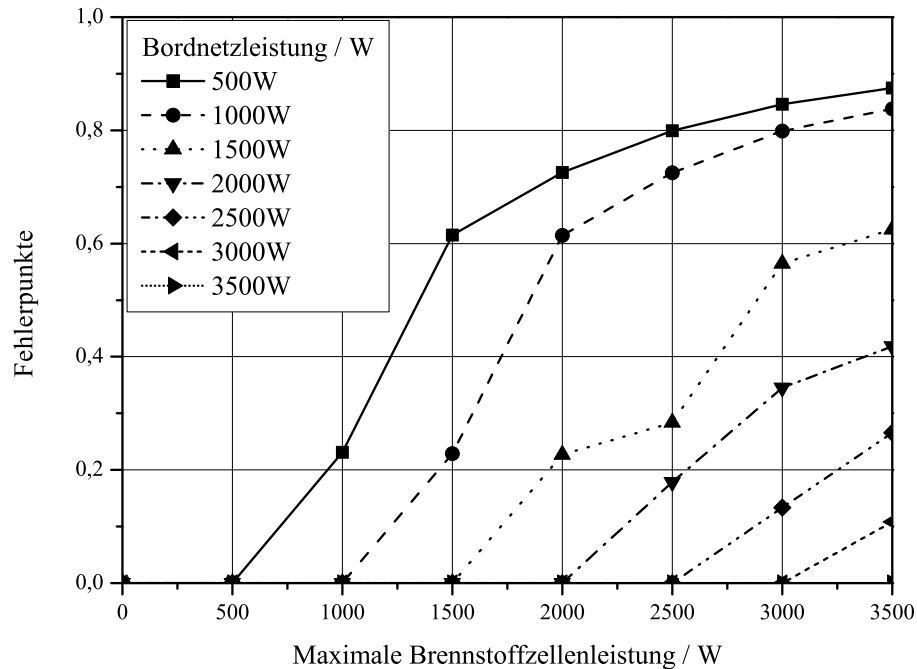


Abbildung 5.3.: Ergebnisbeispiel für den Term 3 beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $C_{Bat} = 20Ah$; Strategie 1; ungewichtet)

5.1.1.5. Term 4: Generatorauslastung

Auf Grund des im Vergleich zur Brennstoffzelle geringeren Wirkungsgrads der Kombination Verbrennungsmotor und Generator sollten das Bordnetz und das dazugehörige Energiemanagement so ausgelegt werden, dass der Generator möglichst wenig Energie in das Bordnetz abgibt. Dies wird im vierten Term der Gleichung (5.1) berücksichtigt. Wenn die Brennstoffzelle aufgrund eines hohen Ladezustands der Batterie niedergefahren wurde, muss der Generator bei dynamischem Leistungsbedarf im Bordnetz mehr Energie in das Bordnetz liefern, wodurch der Generatorstrom ansteigen muss. Je größer dieser Strom wird, desto größer ist die Abweichung vom idealen Wert und um so kleiner wird die Wahrscheinlichkeit, dass der Term 4 einen Wert (nahe) Null aufweist. Da die Stromabgabe des Generators drehzahlabhängig ist, dient der zu jedem Zeitpunkt maximal abgebbare Generatorstrom als Referenz. Hierbei kann ein überdimensionierter Generator ein besseres Ergebnis mit geringeren Fehlerpunkten liefern. Im Term 6 Abschnitt 5.1.1.7 wird dieser Generator aber — aufgrund des erhöhten Gewichts — stärker bestraft. Abbildung 5.4 zeigt beispielhaft den Beitrag von Term 4 zu F_E , wenn die Brennstoffzellenleistung und die Bordnetzleistung variiert werden.

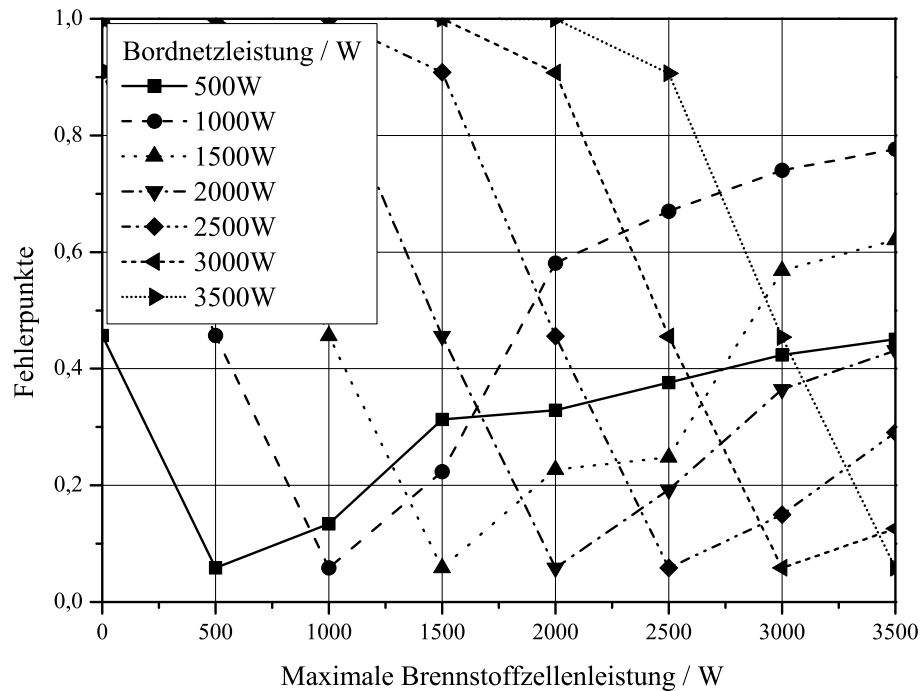


Abbildung 5.4.: Ergebnisbeispiel für den Term 4 beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $C_{Bat} = 20Ah$; Strategie 1; ungewichtet)

5.1.1.6. Term 5: Leistungsdichte der Brennstoffzelle

Der fünfte Term berücksichtigt die Größe der Brennstoffzelle mittels ihrer Masse. Für einen zu jeder Zeit positiven Ladezustand wäre es denkbar, eine überdimensionierte Brennstoffzelle in das Fahrzeug zu integrieren. Diese würde aber ein sehr hohes Volumen und eine hohe Masse aufweisen. Deshalb muss bei der Dimensionierung beachtet werden, dass Volumen und Masse der Brennstoffzelle nicht zu hoch sind, damit das Fahrzeug möglichst leicht ist und wenig Bauraum in Anspruch genommen wird.

Mit Hilfe einer typischen Leistungsdichte von $250W/kg$ der Brennstoffzelle [78] kann bei gegebener Leistung ihre Masse abgeschätzt werden. Als Referenz wurde eine Brennstoffzelle mit einer Leistung von $P_{BZ,ref} = 5000W$ gewählt. Diese Leistung wird als größte sinnvolle Leistung für eine Brennstoffzelle als Hilfsstromversorgung in einem PKW angesehen. Aus der Referenzbrennstoffzellenleistung ergibt sich eine Masse von $m_{BZ,ref} = 20kg$. Abbildung 5.5 zeigt beispielhaft den Beitrag von Term 5 zu F_E , wenn die Brennstoffzellenleistung variiert wird.

5.1.1.7. Term 6: Leistungsdichte des Generators

Das, was für die Brennstoffzelle gilt, ist auch beim Generator zu beachten. Je größer die Nennleistung des Generators, desto größer ist auch sein Volumen und sein Gewicht. Berücksichtigung finden diese Eigenschaften im sechsten Term. Bei der Beurteilung einer bestimmten Kombination von Energiewandlern, -speichern und Energiemanagement ist ein kleiner Generator von Vorteil, da dieser lediglich eine geringe Masse und ein geringes Gewicht aufweist. Die Leistungsdichte wurde aus Datenblättern von Generatoren ermittelt und mit einer Gleichung angenähert (vgl. Abbildung 5.6). Aus diesen Werten kann

5. Energiemanagement

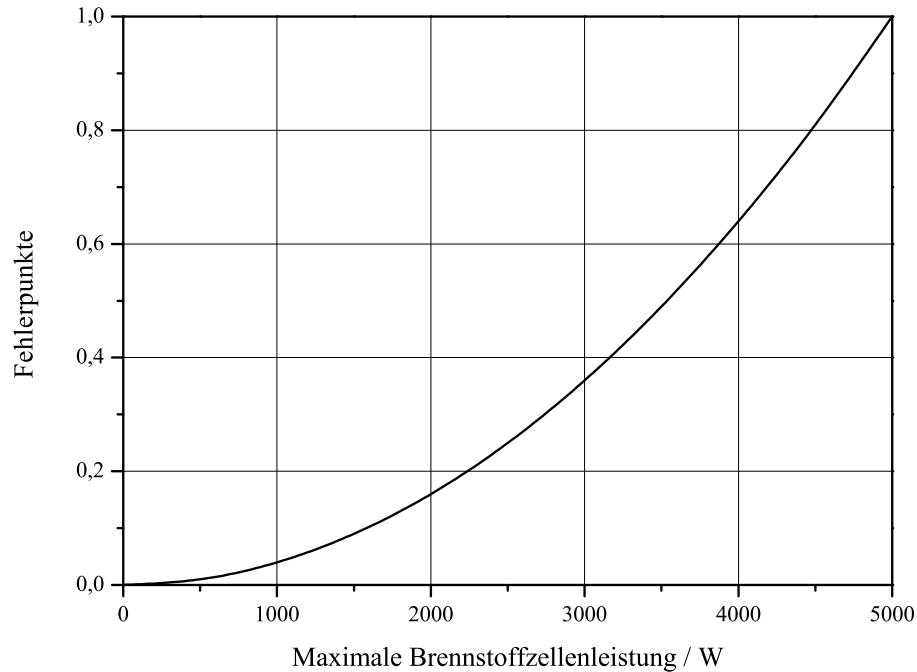


Abbildung 5.5.: Ergebnisbeispiel für den Term 5; ungewichtet

die Leistungsdichte und somit die Masse bestimmter Generatoren mit bekanntem Nennstrom näherungsweise ermittelt werden. Als Referenz wurde ein Generator mit einem Nennstrom von $I_{Gen,nen,ref} = 350A$ gewählt. Abbildung 5.7 zeigt beispielhaft den Beitrag von Term 6 zu F_E bei Verwendung unterschiedlicher Generatortypen.

5.1.1.8. Term 7: Energiedichte der Batterie

Um einen möglichst hohen und konstanten Ladezustand der Batterie zu erreichen, ist es möglich, eine Batterie zu wählen, die eine hohe Amperestundenzahl besitzt. Dieser Vorteil hat leider einen gravierenden Nachteil. Eine Batterie mit einer hohen Amperestundenzahl weist ein großes Volumen und ein hohes Gewicht auf, was den Bauraum im Fahrzeug verringert und das Gewicht des Fahrzeugs vergrößert. Deshalb werden Batterien mit großer Amperestundenzahl im Rahmen der Analyse härter bestraft, als kleine Batterien. Für Batterien wurde ein Wert der Energiedichte von $25^{Wh/kg}$ gewählt (vgl. Abbildung 2.23). Als Referenz wurde eine Batterie mit einer Kapazität von $C_{Bat,ref} = 100Ah$ gewählt. Größere Batterien werden im Automobilbereich in der Regel nicht eingesetzt [85]. Aus diesem Wert und der Kapazität C der Batterie wird die Fehlerzahl für jeden Simulationsschritt berechnet.

Abbildung 5.8 zeigt beispielhaft den Beitrag von Term 7 zu F_E bei Verwendung unterschiedlicher Batteriekapazitäten.

5.1.1.9. Gewichte

Tabelle 5.1 zeigt ein Beispiel für die Wichtung der einzelnen Terme der Gleichung (5.1). Die Terme für den Brennstoffzellenstrom, den Ladezustand der Batterie und die Leistungsdichte der Brennstoffzelle

5. Energiemanagement

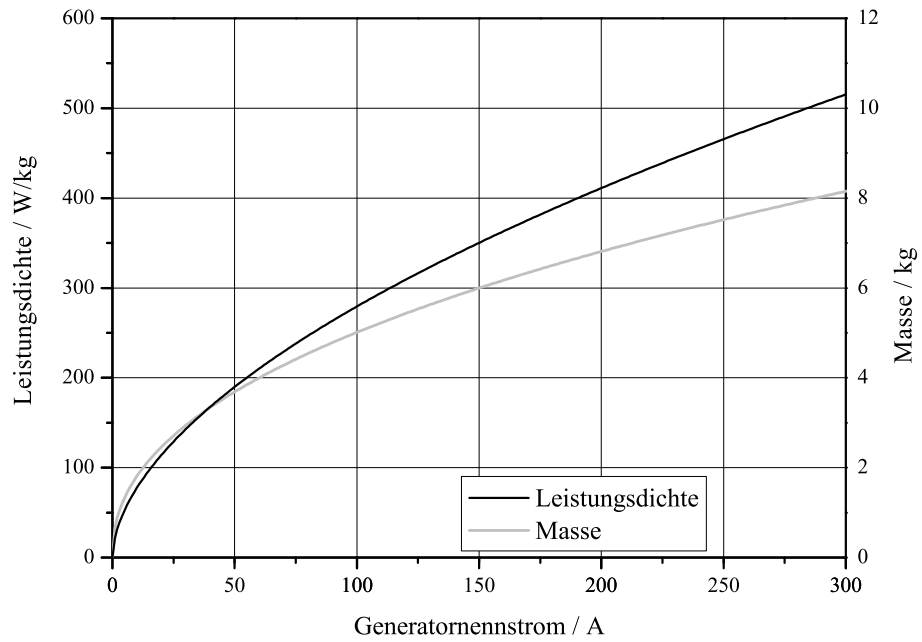


Abbildung 5.6.: Abhängigkeit der Leistungsdichte und Masse von Generatoren von ihrem Nennstrom

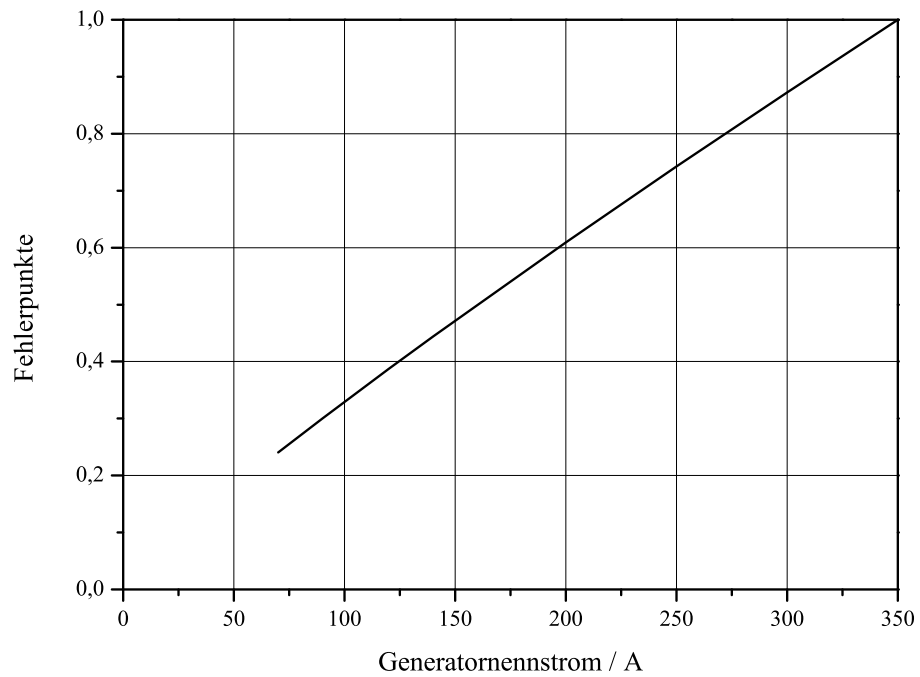


Abbildung 5.7.: Ergebnisbeispiel für den Term 6; ungewichtet

5. Energiemanagement

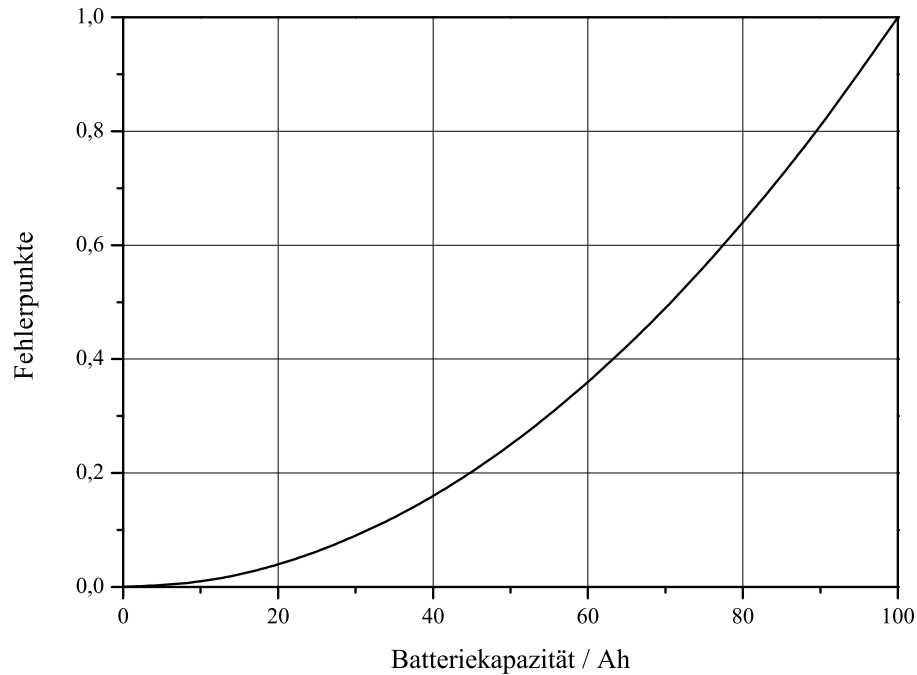


Abbildung 5.8.: Ergebnisbeispiel für den Term 7; ungewichtet

wurden aus den genannten Gründen als „wichtig $\triangleq 5$ “ eingestuft. Es wäre auch denkbar, die Gewichte noch etwas zu variieren und anzupassen, je nachdem, welcher Term für einen bestimmten Fall dominieren soll. Die restlichen Wichtungswerte wurden auf 1 gesetzt, um ihre Wertigkeit zu verringern. Für die nachfolgenden Ergebnisse wurden die Gewichtswerte der Tabelle 5.1 angenommen.

Tabelle 5.1.: Beispiel der Zuweisung der Gewichte

Gewicht Nr.	Beschreibung der Zugehörigkeit	Wert
1	Brennstoffzellenstrom	$5 \cdot 10^3$
2	Ladezustand der Batterie	5
3	Betriebszustand der Brennstoffzelle	1
4	Generatorauslastung	1
5	Leistungsdichte der Brennstoffzelle	5
6	Leistungsdichte des Generators	1
7	Energiedichte der Batterie	1

5.2. Energiemanagementstrategien

Bei den einzelnen Strategien steht die sichere Energieversorgung aller elektrischen Verbraucher im Vordergrund. Im Folgenden werden Energiemanagementstrategien vorgestellt und beschrieben. Ausgangspunkt ist das Standardbordnetz ohne Energiemanagement mit der Problematik, dass sich möglicherweise die Batterie unkontrolliert entlädt, gefolgt von einer rudimentären Strategie für das erweiterte Bordnetz, die die Brennstoffzelle hoch- und niederfährt. Außerdem wird eine erweiterte Strategie, die die Brenn-

5. Energiemanagement

stoffzellenleistung abhängig vom Ladezustand der Batterie steuert, diskutiert. Abschließend wird eine Extremstudie gezeigt, bei der ein Energiemanagement für den Fall, dass der Generator und die Bleibatterie durch die Brennstoffzelle und einen Doppelschichtkondensator ersetzt werden, implementiert wurde.

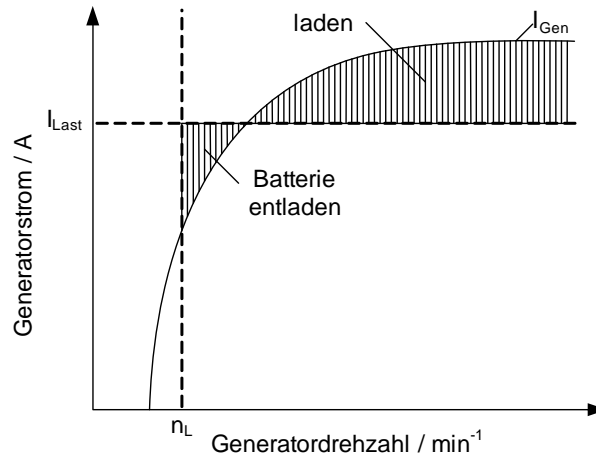


Abbildung 5.9.: Energiehaushalt des Bordnetzes beim Laden und Entladen der Batterie [67]

5.2.1. Standardbordnetze ohne Energiemanagement

Herkömmliche Bordnetze sind so ausgelegt, dass sie alle elektrischen Verbraucher mit elektrischer Energie versorgen können, ohne dass ein Energiemanagement oder eine Hilfsstromversorgung vorhanden sind. Dies ist gekennzeichnet durch einen ausgeglichenen Energiehaushalt. Das bedeutet, dass die Batterie während des Betriebs des Fahrzeugs einen nahezu konstanten oder (besser) steigenden Ladezustand aufweist (vgl. Abbildung 3.17 und 5.9). Die Auslegung erfolgt durch eine Vorabschätzung des Energiebedarfs. Dabei kann sich die Batterie unkontrolliert – z. B. bei Überlast – entladen, ohne dass Gegenmaßnahmen eingeleitet werden [9, 79]. Mit steigender Anzahl an Verbrauchern können Probleme bei der Energieversorgung auftreten. Das Abschalten einzelner Komponenten — als Energiemanagementstrategie — löst hierbei das eigentliche Problem nicht in befriedigender Weise, denn durch das Abschalten wird zwar weniger Energie benötigt, aber gleichzeitig der Komfort des Fahrzeugs geschmälert. Außerdem können keine sicherheitsrelevanten leistungsstarken Komponenten ausgeschaltet werden, deren Funktion sichergestellt werden muss! Da zukünftige Bordnetze mit einer größeren Leistung nicht mehr ausschließlich von einem konventionellen Klauenpolgenerator versorgt werden können (vgl. Abschnitt 1), sollen Energiemanagementstrategien für ein um eine Hilfsstromversorgung erweitertes Bordnetz vorgestellt und diskutiert werden, die ein Energiedefizit im Bordnetz verhindern.

5.2.2. Strategie 1: Erweitertes Bordnetz mit konstanter Brennstoffzellenleistung — Hoch- und Niederfahren in Abhängigkeit vom Ladezustand

Bei dieser Strategie soll eine Brennstoffzelle kleinerer Leistung das Bordnetz während der gesamten Fahrt konstant mit Energie beliefern. Dabei sollte die Brennstoffzelle so ausgelegt sein, dass eine bestimmte Leistung im optimalen Arbeitspunkt abgegeben werden kann. Der Generator deckt hierbei auftretende Lastspitzen bis zu seinem Leistungsmaximum. Wenn dennoch ein Energiedefizit vorhanden ist, kann die Batterie dieses decken, indem sie Energie in das Bordnetz liefert und sich dabei entlädt. Die Brennstoffzelle wird lediglich vollständig niedergefahren, sobald ein bestimmter im Vorfeld gewählter Ladezustand der Batterie erreicht ist und wieder hochgefahren, wenn ein definierter gewählter Ladezustand unterschritten wird. Diese Hystereseregulation stellt die einfachste und aufwandsminimale Variante eines Energiemanagements dar.

Die Brennstoffzelle sollte hierbei eine Leistung aufweisen, die im Bereich der durchschnittlichen zu erwartenden Bordnetzleistung liegt. Zusätzlich sollte die Batterie eine nicht zu geringe Kapazität besitzen, da eine Batterie mit einer kleinen Amperestundenzahl dazu führt, dass die Batterie im ausgeschalteten Zustand der Brennstoffzelle sich möglicherweise schnell entlädt und somit die Brennstoffzelle nach kurzer Zeit wieder hochgefahren werden muss. Entsprechendes gilt auch für die Ladung der Batterie. Eine Batterie mit einer geringen Kapazität wird demnach schnell aufgeladen und die Brennstoffzelle muss infolge dessen wieder niedergefahren werden. Abbildung 5.10 zeigt einen Programmablaufplan eines einfachen Energiemanagements zur Steuerung der Brennstoffzelle in Abhängigkeit vom Ladezustand.

Die Schwellwerte für die Hysteresesteuerung der Brennstoffzelle sollten so gesetzt werden, dass die Batterie weder überladen, noch soweit entladen wird, dass ein wiederholtes Starten des Verbrennungsmotors nicht mehr möglich ist. Das bedeutet, dass der Ladezustand der Batterie zu keinem Zeitpunkt unter 50% sinken darf.

Abbildung 5.11 zeigt den Betriebszustand der Brennstoffzelle und den Ladezustand der Batterie, wenn die Energiemanagementstrategie 1 verwendet wird. In diesem Fall ist ein Nachteil dieser einfachen Strategie zu erkennen. Bei einem leistungsstarken Bordnetz ($\overline{P_{Last}} = 3000\text{W}$) in Kombination mit einer kleinen Batterie ($C_{Bat} = 55\text{Ah}$), einem leistungsschwachen Generator ($I_{Gen,nen} = 70\text{A}$) und einer leistungsstarken Brennstoffzelle ($P_{BZ,max} = 4000\text{W}$) besteht die Wahrscheinlichkeit, dass die Batterie häufigen Zyklen unterliegt, wodurch die Brennstoffzelle ebenfalls zyklisch hoch- und niedergefahren werden muss. Dies verkürzt die Lebenserwartung beider Komponenten. Durch eine Verringerung der Batteriekapazität wird diese Situation weiter verschärft, sodass weitere Hoch- und Niederfahrzyklen auftreten werden.

Abbildung 5.12 zeigt das gleiche Simulationsergebnis, wie in Abbildung 5.11. Der Unterschied hierbei ist die veränderte Brennstoffzellenleistung, die in diesem Fall um 1000W gesenkt wurde. Aus diesem Ergebnis ist erkennbar, dass die Brennstoffzelle aufgrund ihrer kleineren Leistung die Batterie nicht so zügig laden kann, wie eine leistungsstärkere Brennstoffzelle und infolgedessen nicht ausgeschaltet werden muss. Dadurch kann die Komplexität des Energiemanagements verringert werden. Trotzdem sollte stets der Ladezustand der Batterie überwacht werden, um die Brennstoffzelle im Falle einer möglichen

5. Energiemanagement

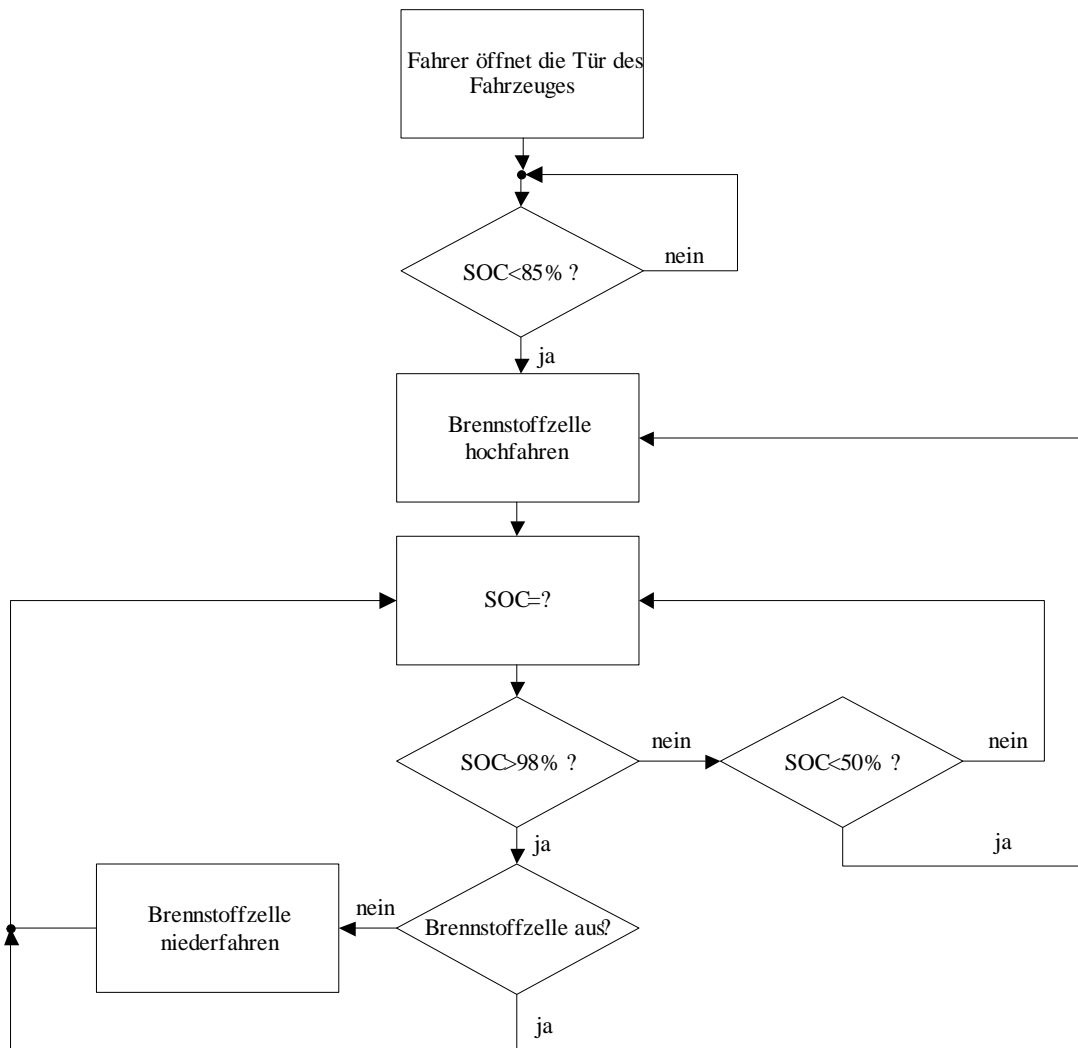


Abbildung 5.10.: Programmablaufplan eines einfachen Energiemanagements zur Steuerung der Brennstoffzelle

5. Energiemanagement

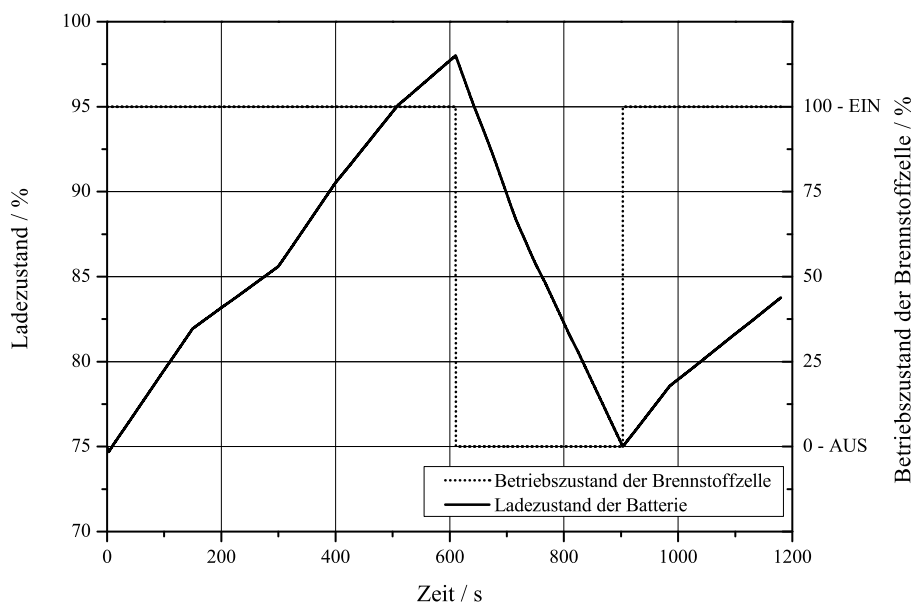


Abbildung 5.11.: Strategie 1: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 4000W$; $P_{Last} = 3000W$; $C_{Bat} = 55Ah$)

Überladung der Batterie niederzufahren.

In Abbildung 5.13 ist die Bewertung der Energiemanagementstrategie 1 dargestellt. Das Diagramm zeigt die Summe der Fehlerpunkte bei Variation der Bordnetz- und maximalen Brennstoffzellenleistung (gleiche Parameter — bis auf die maximale Brennstoffzellenleistung — wie in Abbildung 5.11). Aus dem Diagramm ist bei vorgegebener Bordnetzleistung die maximale Brennstoffzellenleistung ablesbar, die bei Verwendung der Energiemanagementstrategie 1 eine minimale Fehlerpunktzahl ergibt. Dies ist gleichbedeutend mit einer optimalen Kombination aus Hardware (Energiewandler, -speicher und Lasten) und Software (Energiemanagement). Konkret heißt dies, dass z. B. bei einer Bordnetzleistung $\overline{P_{Last}} = 1500W$ eine Brennstoffzelle mit einer Leistung von $P_{BZ,max} = 1500W$ zu verwenden ist. Abweichungen von diesem Wert führen immer zu einer höheren Fehlerpunktzahl.

Im Folgenden soll ein erweitertes Energiemanagement vorgestellt werden, das die Nachteile (z. B. vollständiges Hoch- und Niederfahren der Brennstoffzelle) der rudimentären Strategie 1 beseitigt.

5.2.3. Strategie 2: Erweitertes Bordnetz mit veränderlicher Brennstoffzellenleistung in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie

Diese Strategie sieht vor, die Brennstoffzelle nicht wie oben beschrieben nur hoch- und wieder niederzufahren — vielmehr soll diese Erweiterung dem Schutz und der Lebensdauererweiterung der Brennstoffzelle und der Batterie dienen. Hierbei wird die Brennstoffzellenleistung in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie gedrosselt, um ein Überladen der Batterie zu verhindern, ohne die Brennstoffzelle vollständig niederzufahren. Dadurch soll die Lebensdauer der Brennstoffzelle verlängert werden, da vollständige Zyklen (hoch- und niederfahren) größtenteils verhindert werden kann. Des Weiteren wird durch die Verringerung des Brennstoffzellenstroms der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle nochmals vergrößert.

5. Energiemanagement

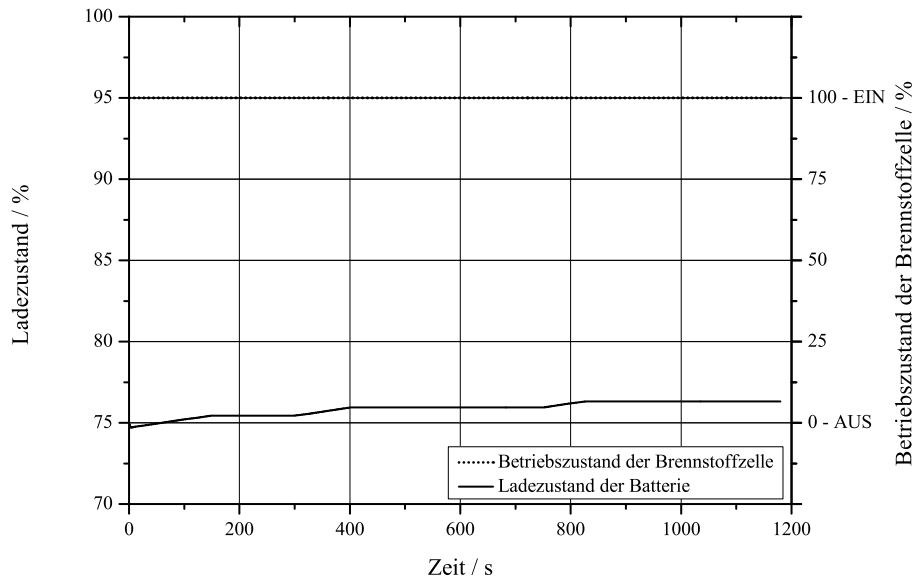


Abbildung 5.12.: Strategie 1: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 3000W$; $\overline{P}_{Last} = 3000W$; $C_{Bat} = 55Ah$)

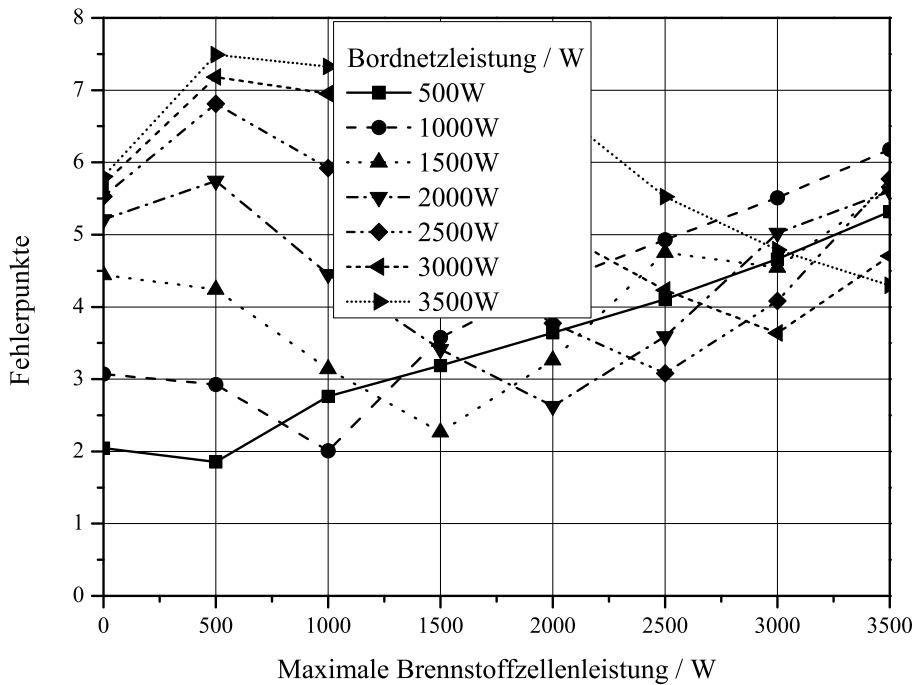


Abbildung 5.13.: Summe aller Fehlerpunkte; Strategie 1; $SOC_{Bat,Start} = 75\%$ (Gewichte gemäß Tabelle 5.1)

5. Energiemanagement

Abbildung 5.14 zeigt die Abhängigkeit des Wirkungsgrads vom abgegebenen Brennstoffzellenstrom, der an einem autonomen Labor-Brennstoffzellensystem aufgenommen wurde. Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle steigt mit abnehmendem Brennstoffzellenstrom an. Dabei sollte die Brennstoffzellenleistung nur soweit verringert werden, dass ein Leerlaufen der Brennstoffzelle vermieden wird, um irreversible Beschädigungen an den Elektroden auszuschließen.

Die Brennstoffzelle wird hierbei z. B. beim Öffnen der Fahrertür durch den Fahrer gestartet, sofern der Ladezustand der Batterie einen definierten Wert (z. B. $SOC_{Bat} < 85\%$) unterschritten haben sollte. Ein Hochfahren der Brennstoffzelle bei einem sehr hohen Ladezustand der Batterie könnte bei einer geringen Bordnetzlast schnell zu einer Überladung oder zu einem frühen Niederfahren der Brennstoffzelle führen. Dies würde wiederum die Lebensdauer verkürzen.

Sollte während des Betriebs des Fahrzeugs der Ladezustand der Batterie den gewählten Wert von (hier) 80% überschreiten und weiterhin ansteigen, wird die Leistung der Brennstoffzelle (Betriebszustand der Brennstoffzelle) von anfangs 100% antiproportional zum Ladezustand heruntergefahren, bis der Ladezustand 90% erreicht. Anschließend bleibt die Brennstoffzellenleistung konstant, auch wenn der Ladezustand weiter ansteigt, um nicht in den Leerlaufbereich der Brennstoffzelle zu geraten. Wenn der Ladezustand der Batterie weiter ansteigt und den Wert 98% erreicht hat, wird die Brennstoffzelle mit einer Rampenfunktion vollständig niedergefahren. Nach dem Niederfahren muss der Generator die Verbraucher mit elektrischer Energie versorgen. Bei einer zu geringen Generatorleistung wird dieser von der Batterie unterstützt, die sich infolgedessen wieder entlädt. Unterschreitet der Ladezustand den Wert von 75%, wird die Brennstoffzelle abermals mit einer Rampenfunktion hochgefahren und kann somit das Bordnetz wieder unterstützen und den/die Energiespeicher laden. Des Weiteren ist es denkbar, dass die Brennstoffzelle nach dem Abstellen des Fahrzeugs die Batterie vollständig lädt, was die Lebensdauer der Batterie vergrößert.

Aus Abbildung 5.15 geht hervor, dass die Brennstoffzelle bei der Strategie 2, im Gegensatz zur Strategie 1 (vgl. Abbildung 5.11), unter diesen Bedingungen (Durchfahren des NEFZ) nicht heruntergefahren werden muss. Wie oben beschrieben, wird die Brennstoffzellenleistung bei Überschreiten des Ladezustands der Batterie von 80% in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie verringert, die Brennstoffzelle aber nicht vollständig niedergefahren. Außerdem ist festzustellen, dass während der gesamten Simulation ein positiver Energiehaushalt vorhanden ist, wodurch die Batterie nicht entladen wird — keinen Lade-Entlade-Zyklus durchläuft. Dadurch kann die Batteriekapazität verkleinert werden (vgl. Abschnitt 4.3).

Wenn sich die Bordnetzleistung durch das Ausschalten elektrischer Komponenten verringert und der Ladezustand der Batterie steigt, ist in der Abbildung 5.16 zu erkennen, dass die Brennstoffzelle bei $SOC_{Bat} > 90\%$ einen konstanten Betriebszustand von 75% der Brennstoffzellennennleistung aufweist, weiter das Bordnetz versorgt und die Batterie lädt. Wenn der Batterieladezustand 98% überschreitet, wird die Brennstoffzelle mit einer Rampenfunktion niedergefahren. Dadurch kann zu jeder Zeit ein ausgeglichener oder sogar positiver Energiehaushalt garantiert werden. Das Ausschalten der Brennstoffzelle sollte nur in Ausnahmesituationen geschehen, da in dieser Zeit die Batterie zum Teil das Bordnetz mit Energie versorgen muss und somit Lade-Entlade-Zyklen unterliegt.

5. Energiemanagement

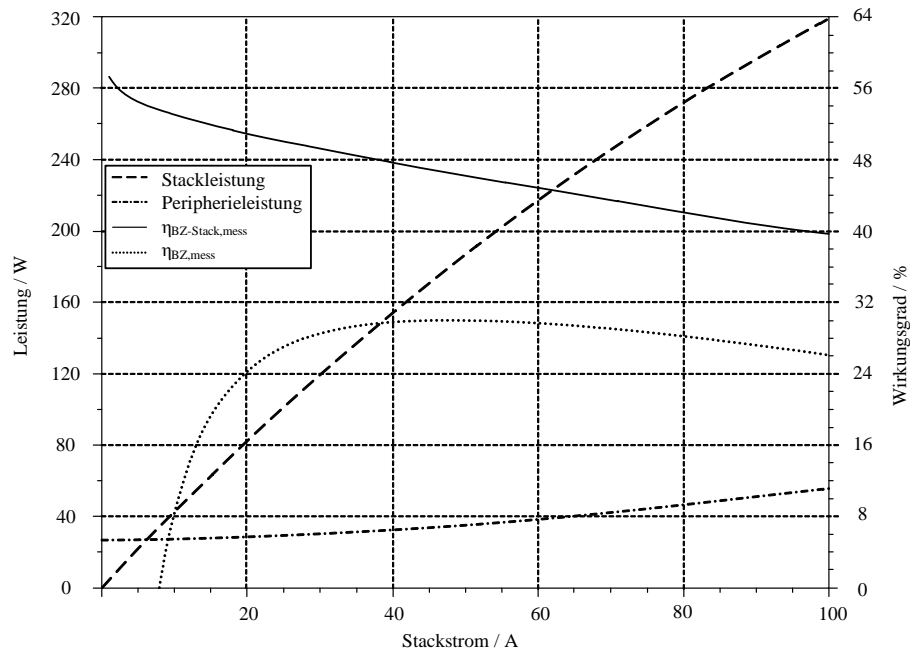


Abbildung 5.14.: Wirkungsgradkennlinie in Abhängigkeit des Brennstoffzellenstroms [92]

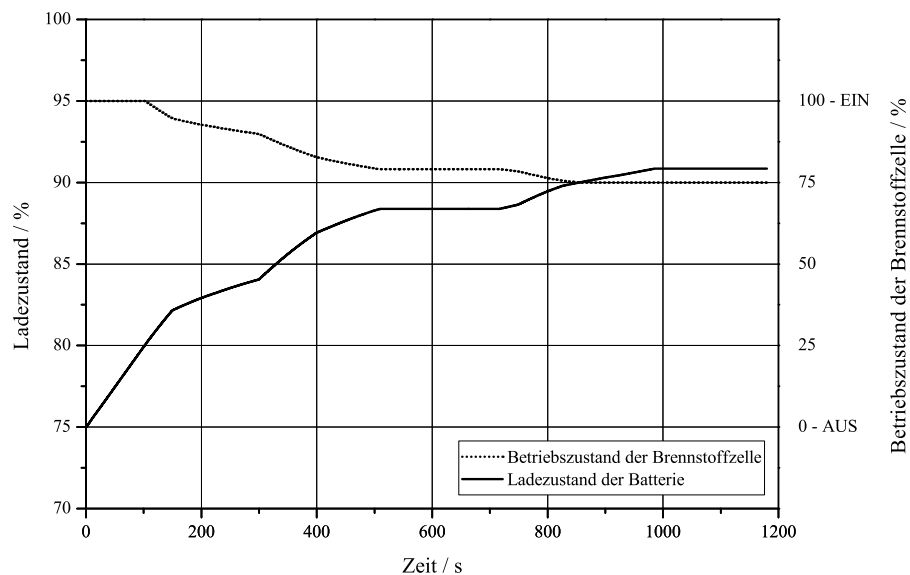


Abbildung 5.15.: Strategie 2: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 4000W$; $\overline{P_{Last}} = 3000W$; $C_{Bat} = 55Ah$)

5. Energiemanagement

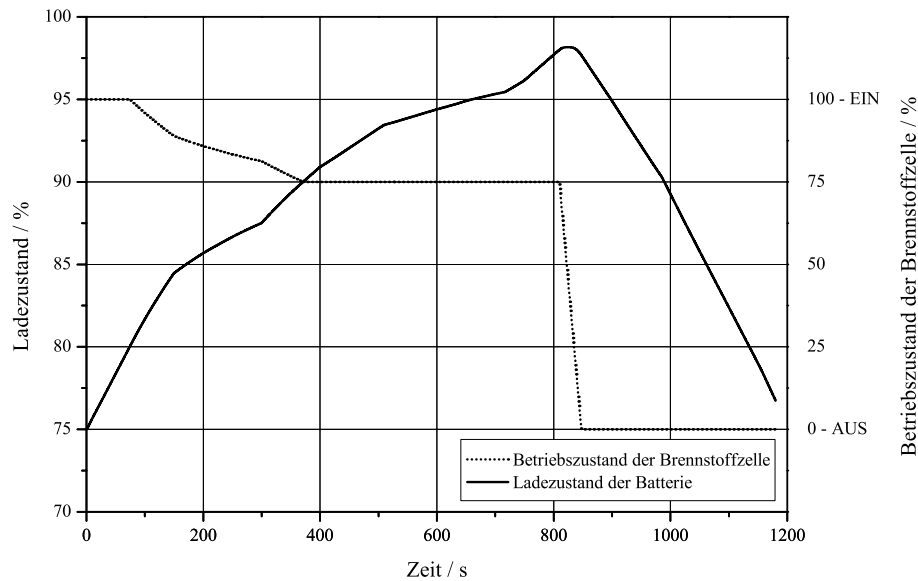


Abbildung 5.16.: Strategie 2: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 4000W$; $\overline{P}_{Last} = 2500W$; $C_{Bat} = 55Ah$)

Das Diagramm in Abbildung 5.17 zeigt die Summe der Fehlerpunkte, wenn die Energiemanagementstrategie 2 zum Einsatz kommt. Aus dem Diagramm geht hervor, dass bei Verwendung dieser Strategie, ausgehend von einem Vergleich der Fehlerpunkte, für dieselben Parameter wie bei der Strategie 1 eine etwas leistungsstärkere Brennstoffzelle bessere Ergebnisse liefert. Konkret bedeutet dies, dass bei einer Bordnetzleistung von $\overline{P}_{Last} = 1500W$ eine Brennstoffzellenleistung von $P_{BZ} = 2000W$ benötigt wird, um eine minimale Fehlerpunkteanzahl zu erreichen. Diese Brennstoffzellenleistung ist auch beim Vergleich der Diagramme 4.8 und 4.9 völlig ausreichend und sorgt dafür, dass zu jedem Zeitpunkt ein positiver Delta-Ladezustand der Batterie vorhanden ist und der minimale Ladezustand nie unter den Startladezustand fällt.

Dass die Anzahl an Fehlerpunkten gesenkt werden konnte, ist u. a. dem höheren Ladezustand der Batterie während des Fahrzyklusses geschuldet und ist somit abhängig von der Anfangsbedingung des Ladezustands der Batterie.

5.2.4. Strategie 3: Veränderliche Brennstoffzellenleistung in Abhängigkeit vom Ladezustand mit Doppelschichtkondensator

Im folgenden Abschnitt soll das Bordnetz um einen Doppelschichtkondensator erweitert werden, um die Auswirkungen auf die Brennstoffzelle und das Energiemanagement zu untersuchen. Dafür muss das Energiemanagement bzw. Speichermanagement angepasst werden. Diese dritte Strategie besitzt die gleichen Eigenschaften (Hoch- und Niederfahren der Brennstoffzelle in Abhängigkeit des Ladezustands der Speicher) wie die zuvor beschriebene zweite Strategie, nur dass in diesem Fall mit dem Doppelschichtkondensator ein zweites Speicherelement im Bordnetz berücksichtigt werden muss. Das Speicherenergiemanagement sorgt dafür, dass im Falle eines Energiedefizits innerhalb des Bordnetzes zuerst

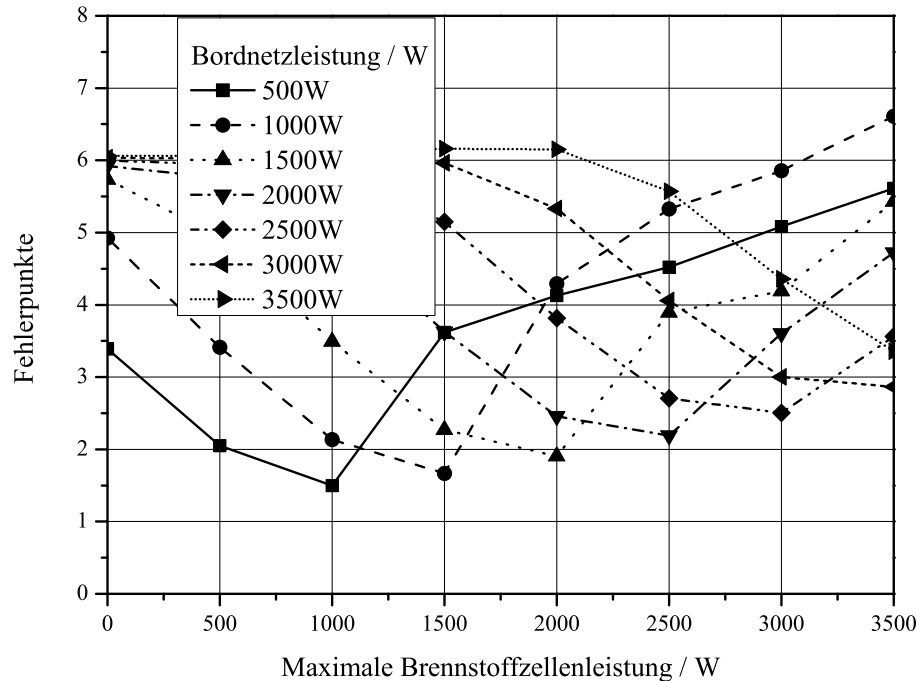


Abbildung 5.17.: Summe aller Fehlerpunkte; Strategie 2; (Gewichte nach Tabelle 5.1)

der Doppelschichtkondensator dieses unterstützt und sich dabei bis zu einer Spannung, die minimal der Bordnetzspannung entspricht, entlädt und anschließend die Batterie das möglicherweise weiter vorhandene Energiedefizit deckt. Die minimale Spannung des Doppelschichtkondensators ist damit begründet, dass für den leistungselektronischen Wandler ein Brückenweig (vgl. Abbildung 4.14a) angenommen wurde, der zwar bidirektional arbeitet und somit den Doppelschichtkondensator sowohl laden als auch entladen kann, jedoch nicht eine kleine Doppelschichtkondensatorspannung ($U_{Kon} < U_{BN}$) an die höhere Bordnetzspannung anpassen. Um dies zu ermöglichen, wäre eine aufwendigere Topologie des Wandlers nötig. Aufgrund der geringen Restenergie des Doppelschichtkondensators nach (2.15)-(2.17) ist dieser Aufwand jedoch nicht sinnvoll.

Bei einem Energieüberschuss wird wiederum zuerst der Doppelschichtkondensator bis zu 80% seiner Nennspannung aufgeladen und anschließend die Batterie. Wenn der Ladezustand der Batterie, wie in diesem Fall, 80% überschreitet, wird wie bei Strategie 2 die Leistung der Brennstoffzelle in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie gedrosselt.

Sollten beide Speicher vollständig geladen sein, wird die Brennstoffzelle rampenförmig niedergefahren. Die Brennstoffzelle wird erst dann wieder hochgefahren, wenn die Nennspannung des Doppelschichtkondensators einen definierten Wert (z. B. 75%) unterschritten hat.

Der Ladezustand des Doppelschichtkondensators lässt sich auf Grund des spannungsabhängigen Energiegehalts einfacher und exakter bestimmen als bei einer Batterie, da lediglich die Spannung des Doppelschichtkondensators gemessen werden muss.

Die beschriebene Speichermanagementstrategie sorgt dafür, dass die Batterie eine möglichst lange Zeit einen hohen Ladezustand aufweist und trägt somit dazu bei, dass die Batterie eine lange Lebensdauer erreicht.

5. Energiemanagement

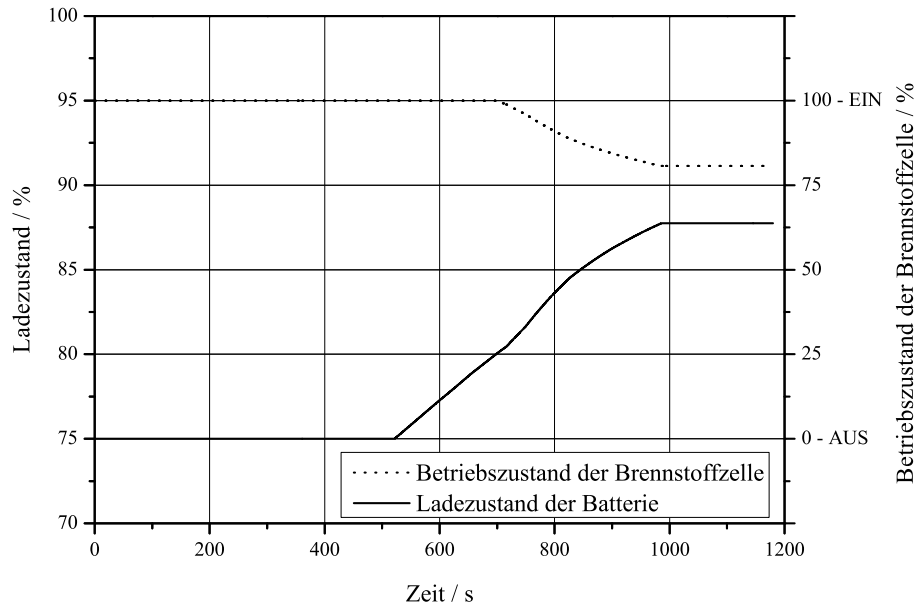


Abbildung 5.18.: Strategie 3: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 4000W$; $\overline{P}_{Last} = 3000W$; $C_{Bat} = 55Ah$; $C_{DSK} = 160F$; $U_{DSK,max} = 48V$)

Die Abbildungen 5.18 und 5.19 zeigen den Betriebszustand der Brennstoffzelle und den Ladezustand der Batterie, wenn zusätzlich ein Doppelschichtkondensator in das Bordnetz integriert worden ist. Dabei wurden die gleichen Parameter verwendet, wie in der Strategie 2. Abbildung 5.18 zeigt, dass im Gegensatz zur Abbildung 5.15 die Brennstoffzellenleistung ebenfalls gedrosselt wird, aber in diesem Fall schwächer und zeitlich nicht so früh. Bei Absenkung der Bordnetzleistung um 500W zeigt Abbildung 5.19, dass im Gegensatz zur Abbildung 5.16 während des Fahrzyklusses die Brennstoffzelle gar nicht niedergefahren werden muss, sondern bei einem Betriebszustand von 75% konstant Energie ins Bordnetz einspeist. Dies ist nicht sonderlich verwunderlich, da der Doppelschichtkondensator die elektrische Speicherkapazität vergrößert, und dadurch für eine weitere Verlängerung der Batterie- und Brennstoffzellenlebensdauer sorgt.

Sollte der Ladezustand trotz der reduzierten Brennstoffzellenleistung auf $SOC_{Bat} = 98\%$ ansteigen, würde auch in diesem Fall das Energiemanagement dafür sorgen, dass die Brennstoffzelle rampenförmig heruntergefahren wird, um ein Überladen der Batterie zu verhindern. Alternativ wäre es auch denkbar, dass die Brennstoffzelle weiter gedrosselt (Betriebszustand $< 75\%$) wird, damit weniger Energie in das Bordnetz eingetragen und die Batterie somit weniger stark geladen wird.

Abbildung 5.20 zeigt abschließend die Summe der Fehlerpunkte bei Verwendung der Energiemanagementstrategie 3. Durch das Hinzufügen eines Doppelschichtkondensators ist erkennbar, dass — im Gegensatz zur Strategie 2 — wieder eine geringere Brennstoffzellenleistung für eine bestimmte Bordnetzleistung benötigt wird und die Summe aller Fehlerpunkte nochmals gesenkt wurde.

Im Detail bedeutet dies beispielsweise, dass bei einer Bordnetzleistung von $\overline{P}_{Last} = 1500W$ eine Brennstoffzelle mit einer Leistung von $P_{BZ,max} = 1500W$ eine minimale Fehlerpunktzahl erreicht.

Vorteil bei einem Betrieb mit Doppelschichtkondensator ist der kaum oder gar nicht absinkende Batterie-

5. Energiemanagement

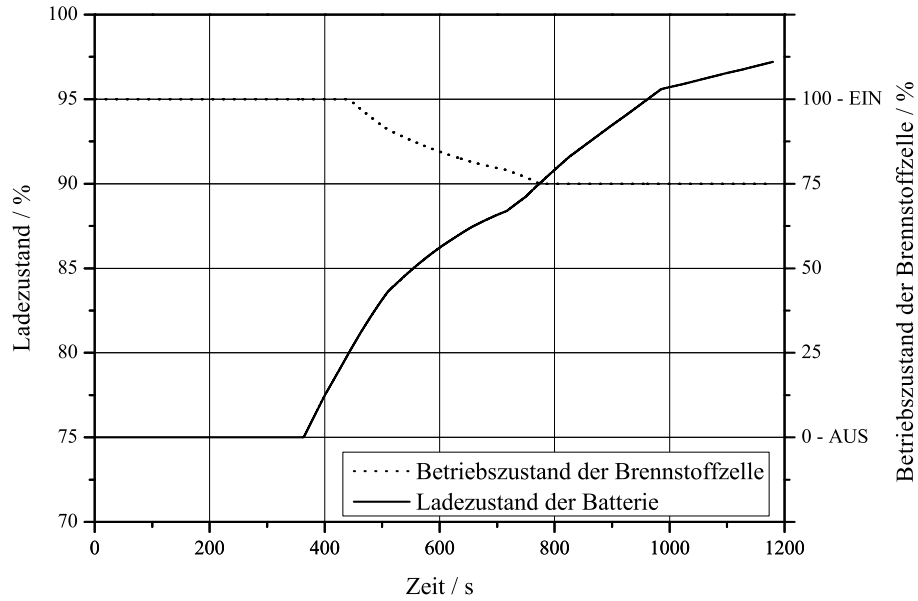


Abbildung 5.19.: Strategie 3: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 4000W$; $\overline{P}_{Last} = 2500W$; $C_{Bat} = 55Ah$; $C_{DSK} = 160F$)

ladezustand und der für längere Zeit konstante Betriebszustand der Brennstoffzelle.

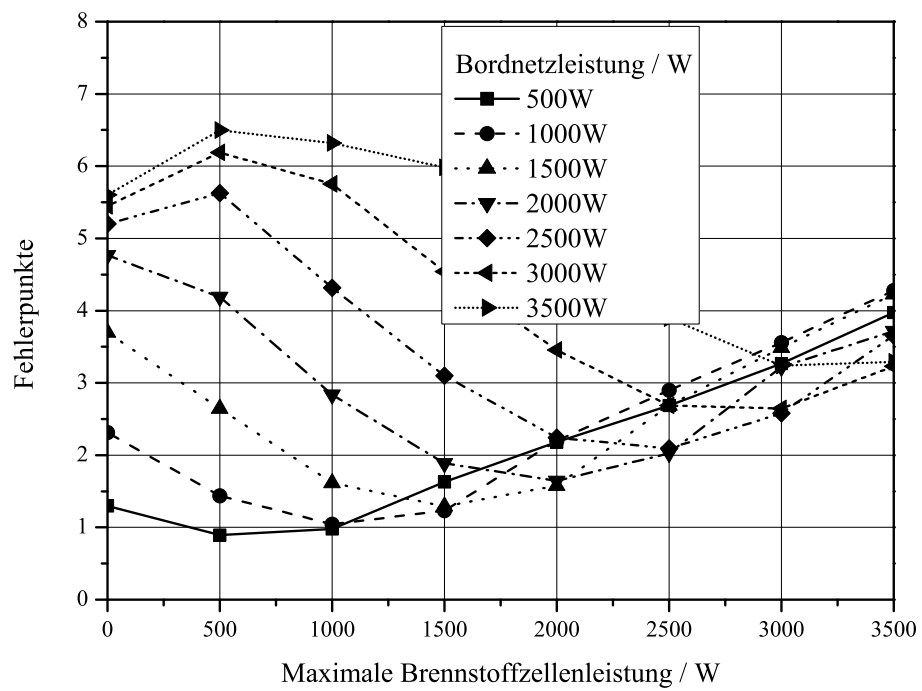


Abbildung 5.20.: Summe aller Fehlerpunkte; Strategie 3; (Gewichte nach Tabelle 5.1)

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

6.1. Versuchsstand

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Versuchsstand entstanden, der ein elektrisches Kraftfahrzeugbordnetz mit Brennstoffzelle nachbildet. Mit diesem Versuchsstand können beispielsweise Modelle des entwickelten Simulationsprogrammes und die Simulationsergebnisse verifiziert werden. Hauptaufgabe des Versuchsstands sind experimentelle Untersuchungen elektrischer Bordnetze und von Energiemanagementstrategien. Auf Grund unterschiedlicher einsetzbarer Generatoren, Brennstoffzellenleistungen, Lastprofile, Fahrzyklen, Fahrzeuge und Energiemanagementstrategien, sind Untersuchungen unterschiedlichster Kraftfahrzeuge und ihrer Bordnetze möglich. Im Anschluss soll der Versuchsstand erläutert werden. Zusätzlich sollen die experimentell erworbenen Ergebnisse aufgezeigt und diskutiert werden.

6.1.1. Aufbau

Der Versuchsstand besteht aus folgenden Komponenten (vgl. Abbildung 6.1):

1. Bleibatterie
2. Elektronische Last — zur Nachbildung der elektrischen Verbraucher
3. Stromquelle 1 — Generatornachbildung
4. Stromquelle 2 — Brennstoffzellennachbildung
5. Mess- und Steuertechnik
6. Optionaler Doppelschichtkondensator.

Die Bleibatterie als elektrischer Energiespeicher bildet die zentrale Komponente des Versuchstandes. Alle weiteren Komponenten sind parallel mit ihr verbunden. Die Verbraucher werden durch eine elektronische Last nachgebildet. Dadurch ist eine Variation der Verbraucher möglich und somit die Änderung der Bordnetzleistung schnell und einfach durchführbar. Der in einem Kraftfahrzeug generatorisch erzeugte Strom wird im Versuchsstand durch eine spannungsgesteuerte Stromquelle zur Verfügung gestellt. Diese bildet das Verhalten eines Kfz-Generators anhand einer Strom-Drehzahl-Kennlinie nach. Der Vorteil bei der Nachbildung des Generators durch eine gesteuerte Stromquelle unter Verwendung einer Kennliniencharakteristik ist, dass die Möglichkeit besteht, nahezu jeden Generatortyp nachzubilden, solange der

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

Maximalstrom der Stromquelle nicht überschritten wird. In Verbindung mit der elektronischen Last kann somit eine Vielzahl an Bordnetzen unterschiedlicher Kraftfahrzeugtypen untersucht werden.

Die Nachbildung der Brennstoffzelle zusammen mit dem diese an das Bordnetz koppelnden Gleichspannungswandler besteht ebenfalls aus einer spannungsgesteuerten Stromquelle, in der eine Brennstoffzellencharakteristik hinterlegt ist. Abbildung 6.2 zeigt den schematischen Aufbau des Versuchsstands. Der gesamte Versuchsstand wird durch eine Ansteuerplattform bedient, die im folgenden Abschnitt erläutert wird.



Abbildung 6.1.: Aufbau des Versuchsstands

6.1.2. Ansteuerplattform und Ausgabefenster

Die Ansteuerung des Versuchsstands wurde in LabView® (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) realisiert. Diese Programmierumgebung ist gleichzeitig eine Entwicklungsumgebung und eine Programmiersprache. Mit ihr lassen sich anspruchsvolle Mess-, Prüf-, Steuer- und Regelungssysteme realisieren. Die graphische Oberfläche ermöglicht das Programmieren durch graphische Symbole, die miteinander verbunden werden. Unter anderem ist LabView® in der Lage, Messwerte von vielen (>100) Messgeräten einzulesen, zu verarbeiten und Steuersignale auszugeben [80–82].

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

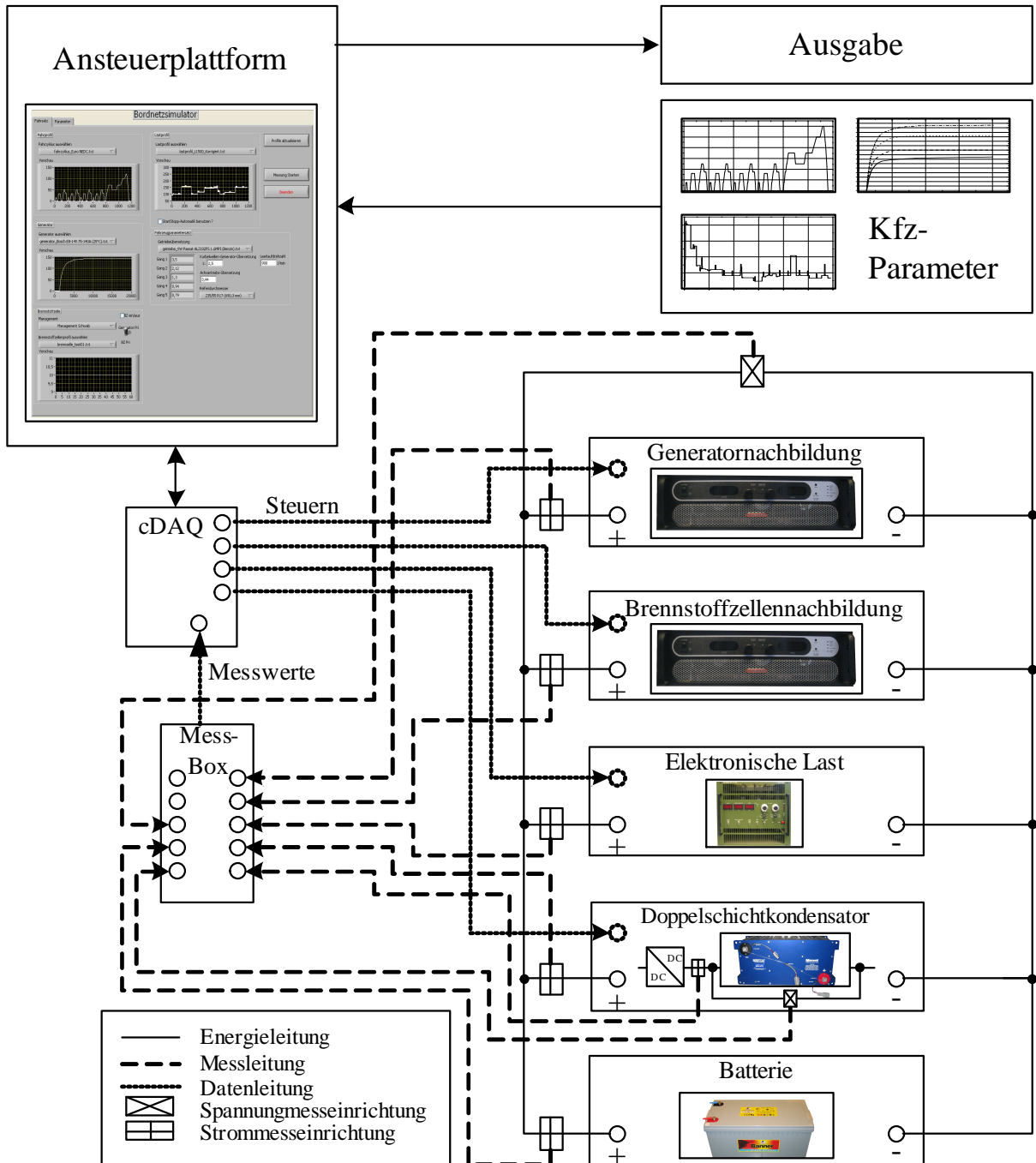


Abbildung 6.2.: Schematischer Aufbau des Versuchsstands

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

The screenshot shows a software interface for configuring an experimental setup. It consists of several main sections:

- Fahrprofil (Driving Profile):** Includes a dropdown for 'Fahrzyklus auswählen' (selected: 'fahrzyklus_Euro NEDC.txt') and a 'Vorschau' (Preview) graph showing power over 1200 seconds.
- Lastprofil (Load Profile):** Includes a dropdown for 'Lastprofil auswählen' (selected: 'lastprofil_L2000_Korrigiert.txt') and a 'Vorschau' graph showing torque over 1200 seconds.
- Generator:** Includes a dropdown for 'Generator auswählen' (selected: 'generator_Bosch E8-14V 75-140A (25°C).txt') and a 'Vorschau' graph showing power over 20000 seconds.
- Brennstoffzelle (Fuel Cell):** Includes a 'Management' dropdown (selected: 'Management Schwab'), a 'Brennstoffzellenprofil auswählen' dropdown (selected: 'brennzelle_test01.txt'), and a 'Vorschau' graph showing power over 60 seconds.
- Fahrzeugparametersatz (Vehicle Parameters):** Includes a dropdown for 'Getriebeübersetzung' (selected: 'getriebe_VW Passat ALZ102PS 1.6MPI (Benzin).txt') and input fields for gear ratios (Gang 1-5), axle ratios, and tire diameter.

Control buttons on the right include 'Profile aktualisieren', 'Messung Starten', and 'Beenden'. A checkbox 'StartStopp-Automatik benutzen?' is also present.

Abbildung 6.3.: Eingabefenster des Versuchsstands

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

Die Ansteuerplattform ist in drei separate Fenster (ein Eingabe- und zwei Ausgabefenster) aufgeteilt (vgl. Abbildung 6.3, 6.4 und 6.5). Das Eingabefenster ermöglicht dem Anwender die Steuerung des Versuchsstands und bietet die Möglichkeit, bestimmte Parameter des elektrischen Bordnetzes zu variieren. Dazu zählt die Auswahl von Fahrzyklus, Lastprofil, Generatortyp und Brennstoffzellenleistung sowie des Energiemanagements, die über Aufklapp-Menüs bestimmt werden. Zusätzlich können einzelne Parameter des Fahrzeugs separat geändert oder andere gespeicherte komplette Fahrzeugdatensätze ausgewählt werden. Während der Messung werden die aufgenommenen Daten direkt auf dem Monitor angezeigt (s. Abbildung 6.4). Im Anschluss an eine Messung können die in einer Datei automatisch gespeicherten Messwerte einzeln ausgewählt und in einem Anzeigefenster zusammenfassend ausgegeben werden (vgl. Abbildung 6.5).

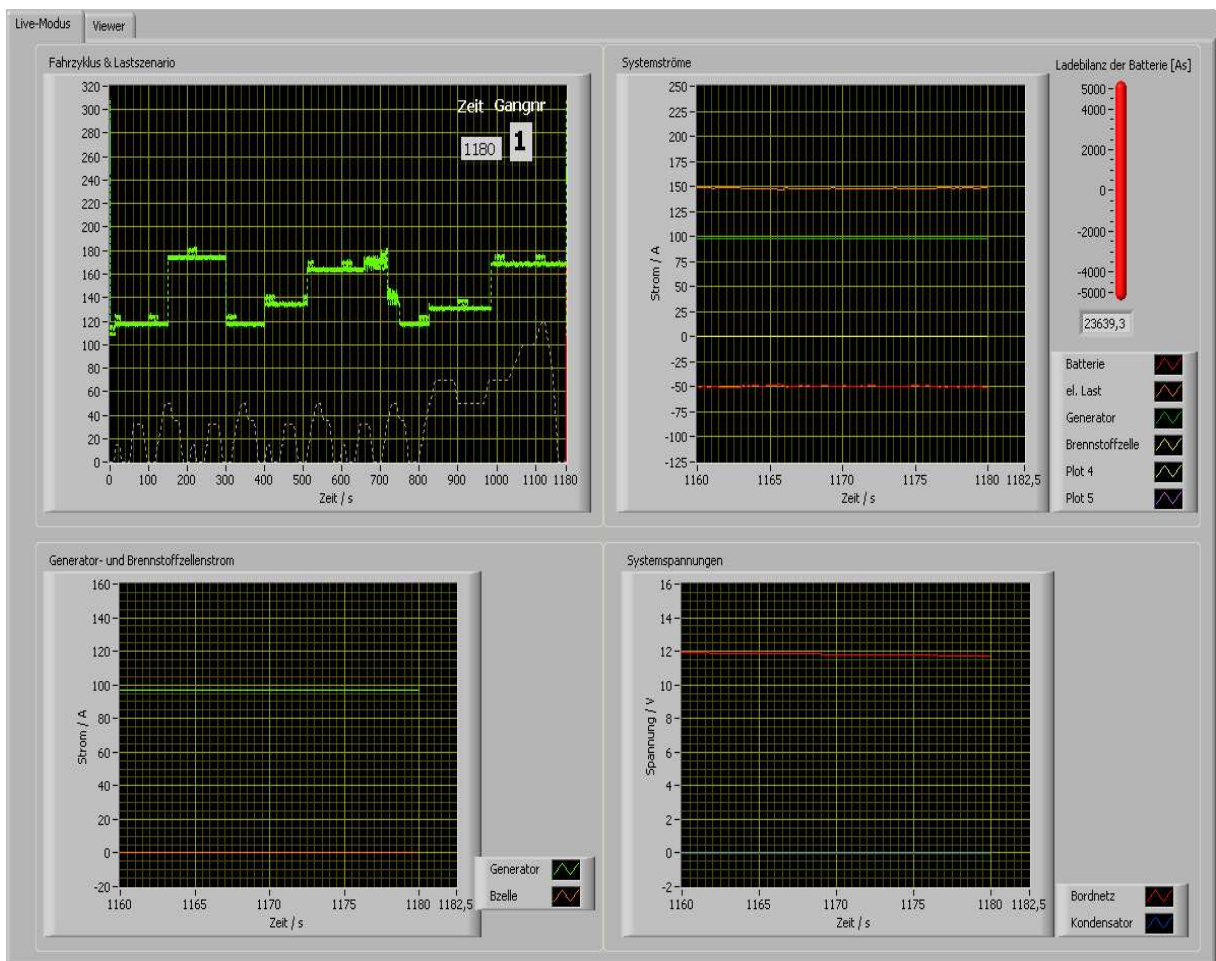


Abbildung 6.4.: Ausgabefenster I — Direkte Ausgabe aller relevanten Daten auf dem Monitor

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

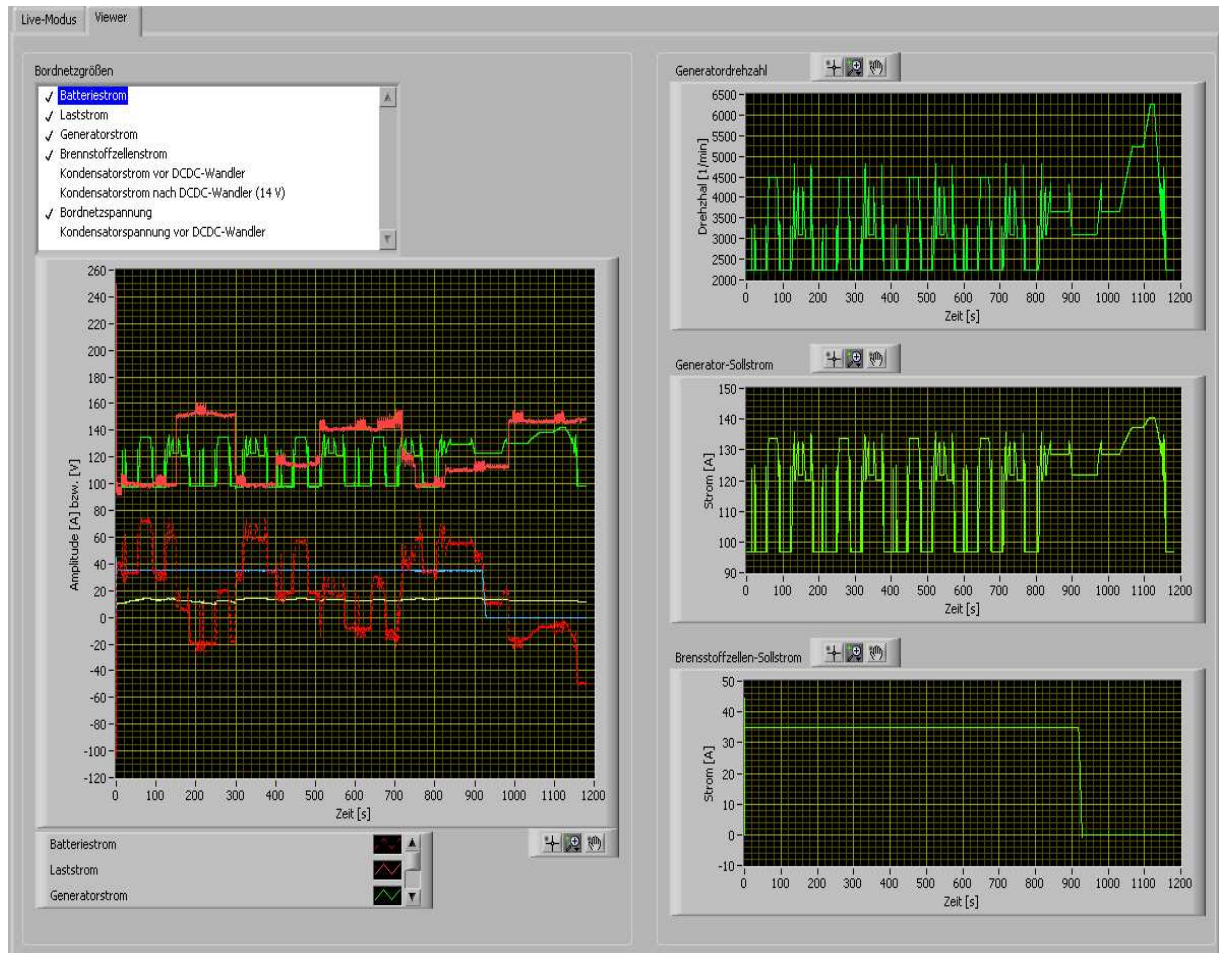


Abbildung 6.5.: Ausgabefenster II — Ausgabe aller gewünschten Daten im Anschluss an die Messung

6.2. Ergebnisse

6.2.1. Beispielmessung und Vergleich mit Simulationsergebnissen

Die Abbildungen 6.6 bis 6.10 zeigen die Ergebnisse einer Beispielmessung (Durchfahren des NEFZ) am Versuchsstand. Ein Vergleich mit den entsprechenden Simulationsergebnissen (vgl. Kapitel 3) dient der Verifizierung der verwendeten Simulationsmodelle.

Abbildung 6.6 zeigt den Verlauf des Batteriestroms. Die Verläufe aus Simulation und Messung stimmen, bis auf geringe Abweichungen, die auf Messfehler zurückzuführen sind, überein. Dies belegt, dass das in der Simulationsschaltung eingesetzte einfache Batteriemodell eine gute Nachbildung realer Verhältnisse ermöglicht.

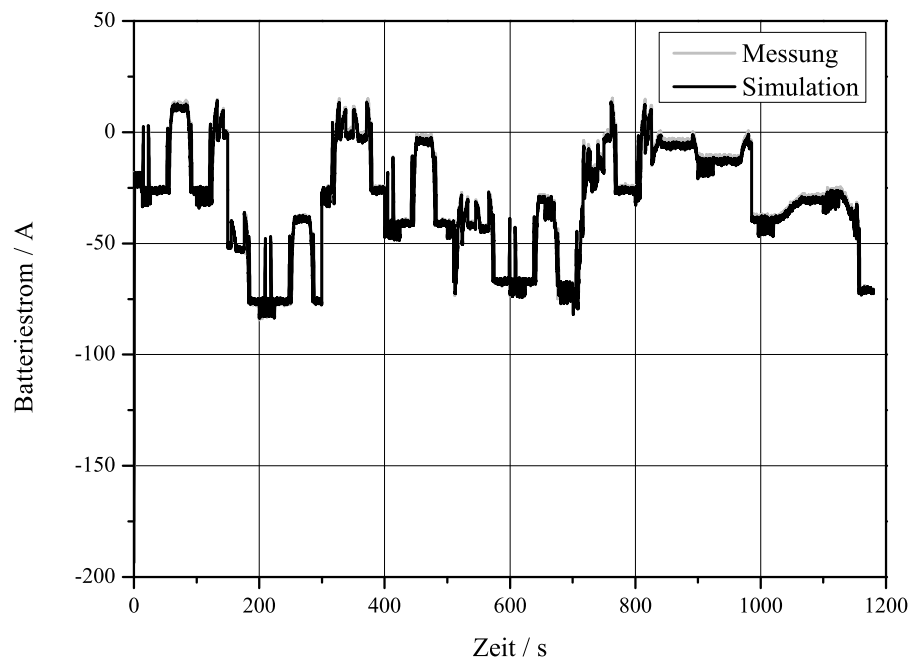


Abbildung 6.6.: Vergleich der Verläufe des Batteriestroms aus Simulation und Messung ($\overline{P_{Last}} = 2000\text{W}$; $I_{Gen,nen} = 140\text{A}$; $C_{Bat} = 200\text{Ah}$)

Der Ladezustand der Batterie in Abbildung 6.7 wurde durch das Integrieren des Batteriestroms ermittelt (vgl. (3.3)). Dabei wurde sowohl für die Messung als auch für die Simulation ein Startladezustand $SOC_{Start} = 75\%$ angenommen. Dafür wurde die Batterie vorkonditioniert, sodass sie den geforderten Startladezustand aufwies. Abweichungen zwischen Messung und Simulation sind auf die Messfehler des Batteriestroms zurückzuführen. Der abfallende Ladezustand zeigt, dass, aufgrund einer erhöhten Bordnetzleistung, die größer gewählt wurde als die Generatorleistung, ein Energiedefizit im Bordnetz vorhanden ist, die Batterie dieses deckt und sich dadurch entlädt.

Der Verlauf des Generatorstroms in Abbildung 6.8 gleicht dem in Abbildung 3.6, die den maximalen Generatorstrom zeigt. Dies ist ebenfalls auf die gewählte erhöhte Bordnetzleistung zurückzuführen, die nicht vom Generator und der Brennstoffzelle gedeckt werden kann. Deshalb muss der Generator seinen Maximalstrom zu jedem Zeitpunkt des Fahrzyklus abgeben.

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

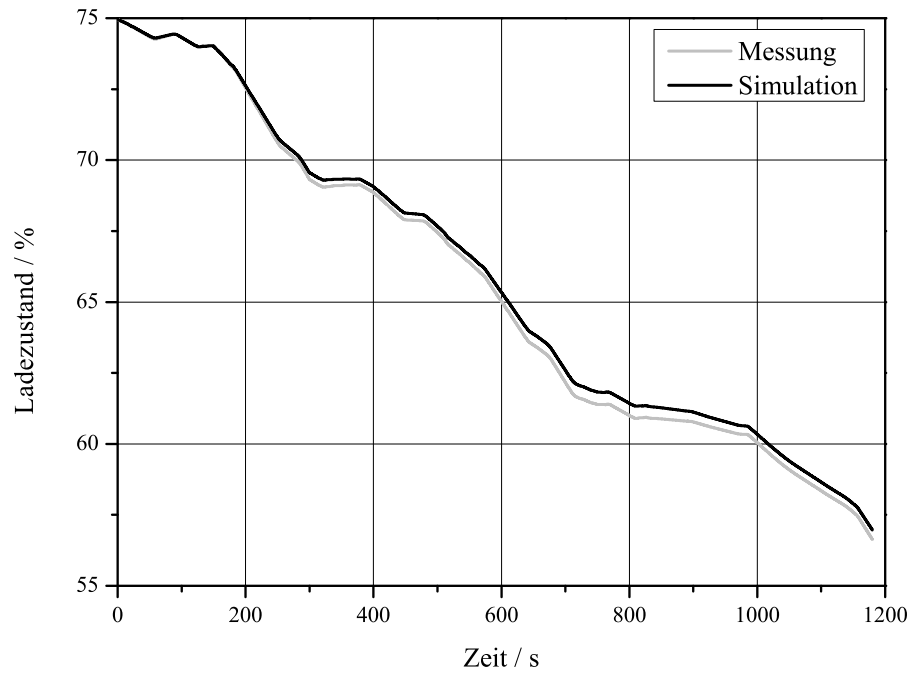


Abbildung 6.7.: Vergleich der Verläufe des Ladezustands aus Simulation und Messung ($\overline{P_{Last}} = 2000\text{W}$; $I_{Gen,nen} = 140\text{A}$; $C_{Bat} = 200\text{Ah}$)

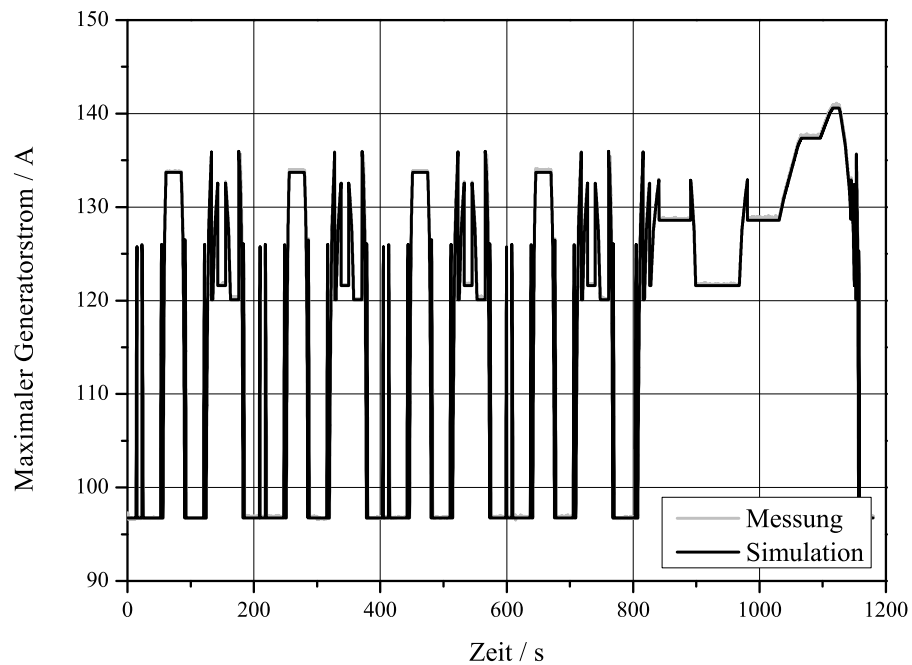


Abbildung 6.8.: Vergleich der Verläufe des Generatorstroms aus Simulation und Messung ($\overline{P_{Last}} = 2000\text{W}$; $I_{Gen,nen} = 140\text{A}$; $C_{Bat} = 200\text{Ah}$)

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

Der gemessene Laststrom aus Abbildung 6.9 wird in der elektronischen Last des Versuchsstands in Wärme umgewandelt.

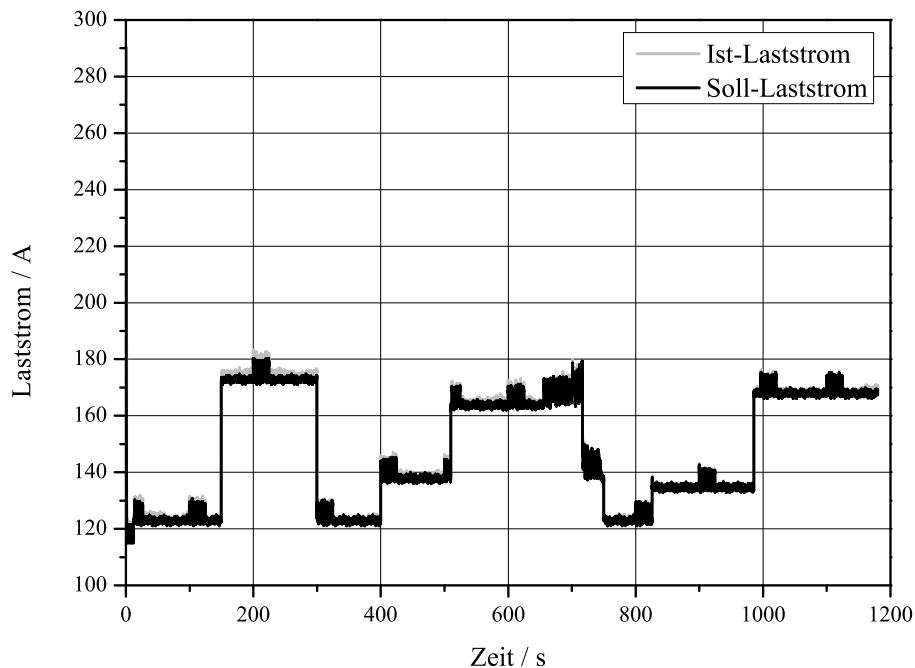


Abbildung 6.9.: Vergleich der Verläufe des Laststroms aus Simulation und Messung ($\overline{P}_{Last} = 2000W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)

Die erhöhte Bordnetzleistung ist auch an der Bordnetz-/Batteriespannung erkennbar. Dies ist gekennzeichnet durch das Absinken dieser Spannung in Abbildung 6.10.

Die Abbildungen 6.6 - 6.8 zeigen eine gute Übereinstimmung von Simulations- und Messergebnissen. Zusätzlich zeigt Abbildung 6.9 bei der Einstellung des Arbeitspunkts (Soll- und Ist-Laststrom) eine geringe Abweichung.

6.2.2. Spannungstabilisierung

In diesem Abschnitt soll betrachtet werden, wie sich das Vorhandensein einer Brennstoffzelle auf die Bordnetzspannung auswirkt. Abbildung 6.11 zeigt deutlich den Unterschied der Verläufe der Bordnetzspannung in den Fällen mit und ohne Brennstoffzelle im Fahrzeug. Der Verlauf ohne Brennstoffzelle ist durch das Absinken der Bordnetzspannung gekennzeichnet. Hingegen zeigt der Verlauf mit Brennstoffzelle bei Belastung ein geringeres Absinken der Bordnetzspannung. Die Wirkung der Brennstoffzelle als zusätzliche Energiequelle im Bordnetz ist gleichermaßen am Verlauf des Ladezustands der Batterie erkennbar (vgl. Abbildung 6.12). Dabei ist ersichtlich, dass der Ladezustand der Batterie im Fall des Bordnetzes mit Brennstoffzelle ansteigt und somit ein positiver Deltaladezustand resultiert, während der Ladezustand im Fall ohne Brennstoffzelle deutlich abfällt, was der großen Bordnetzlast geschuldet ist. Je größer der entnommene Batteriestrom, desto kleiner wird bekannterweise aufgrund des Innenwiderstands der Batterie die Batterieklemmenspannung. Damit die Bordnetzspannung möglichst nicht einbricht, sobald größere Lasten eingeschaltet werden, ist es vorteilhaft, dass die Energiewandler eine

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

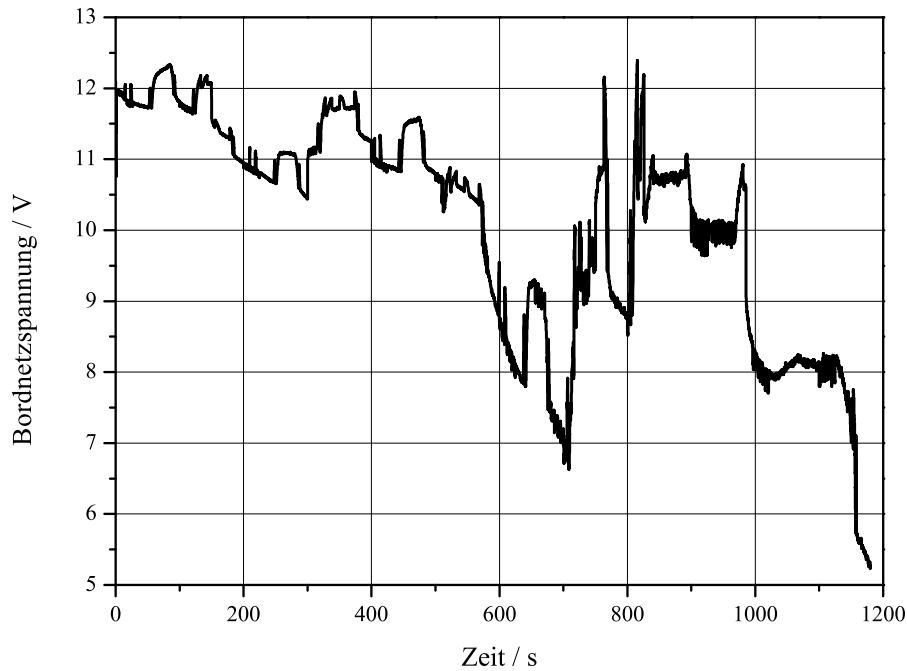


Abbildung 6.10.: Gemessene Bordnetzspannung ($\overline{P_{Last}} = 2000\text{W}$; $I_{Gen,nen} = 140\text{A}$; $C_{Bat} = 200\text{Ah}$)

größere Leistung in das Bordnetz einspeisen, damit der Batteriestrom klein bleibt. Somit kann die Hilfsstromversorgung dazu beitragen die Spannungsstabilität zu verbessern. Dazu könnte die Brennstoffzelle auch kurzzeitig eine höhere Leistung abgeben, was aber den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle wieder verringern würde. Aus diesem Grund wurde diese Möglichkeit nicht näher betrachtet. Um die Stabilität weiter zu verbessern, können alternativ Doppelschichtkondensatoren verwendet werden, die über einen — im Vergleich zur Batterie — sehr geringen Innenwiderstand verfügen.

6.2.3. Experimentelle Überprüfung einer Energiemanagementstrategie

Die Abbildungen 6.13 und 6.14 zeigen Ergebnisse experimenteller Untersuchungen der Energiemanagementstrategie 1. In diesem Fall wurde eine Bordnetzleistung von $\overline{P_{Last}} = 1800\text{W}$ gewählt. Das Bordnetz besitzt zudem einen Generator mit einem Nennstrom von $I_{Gen,nen} = 140\text{A}$. Zusätzlich wird das Bordnetz durch eine Brennstoffzelle zum einen mit $P_{BZ,max} = 630\text{W}$ und zum anderen mit $P_{BZ,max} = 350\text{W}$ unterstützt. Aus Abbildung 6.14 geht hervor, dass die Brennstoffzelle mit der größeren Leistung aufgrund eines hohen Ladezustands der Batterie frühzeitig niedergefahren werden muss, damit die Batterie nicht überladen wird. Zu diesem Zeitpunkt reicht die vom Generator gelieferte Energie nicht aus, um alle Komponenten mit elektrischer Energie zu versorgen. Das auftretende Energiedefizit muss von der Batterie gedeckt werden, wodurch sich die Batterie entlädt, was in Abbildung 6.13 durch einen negativen Strom gekennzeichnet ist. Im Gegensatz dazu läuft die kleinere Brennstoffzelle während der gesamten Fahrtzeit durch und der Ladezustand der Batterie steigt kontinuierlich an. Am Fahrtende weisen beide Szenarien nahezu den gleichen Ladezustand auf. Dabei musste jedoch die kleinere Brennstoffzelle nicht niedergefahren werden, was sich in der Lebensdauer der Brennstoffzelle zeigen wird. Dies bestätigt die

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

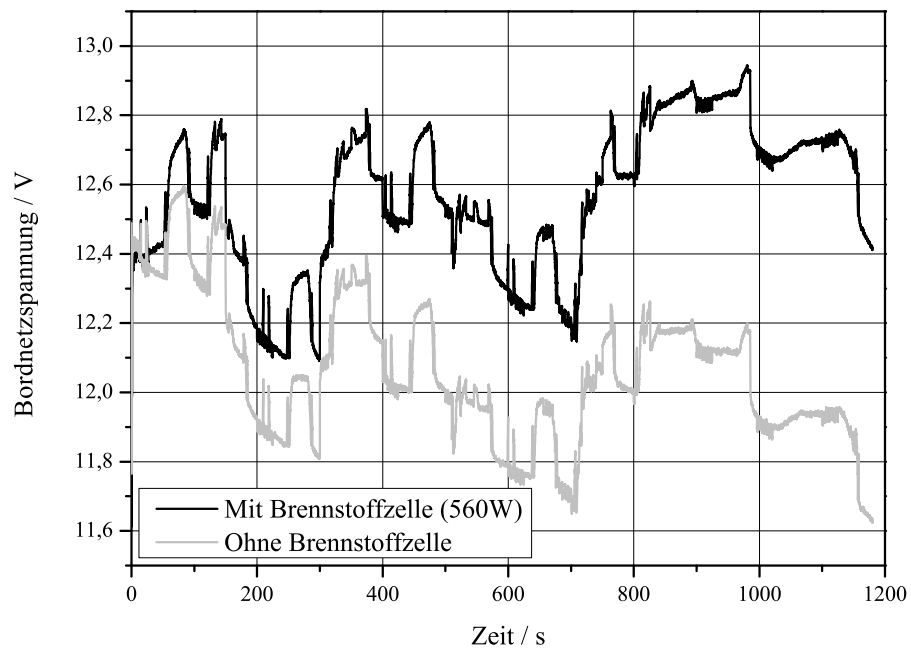


Abbildung 6.11.: Messergebnisse der Verringerung der Spannungseinbrüche der Bordnetzspannung mit Brennstoffzelle im Vergleich zum Fall ohne Brennstoffzelle ($\overline{P}_{Last} = 2000W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)

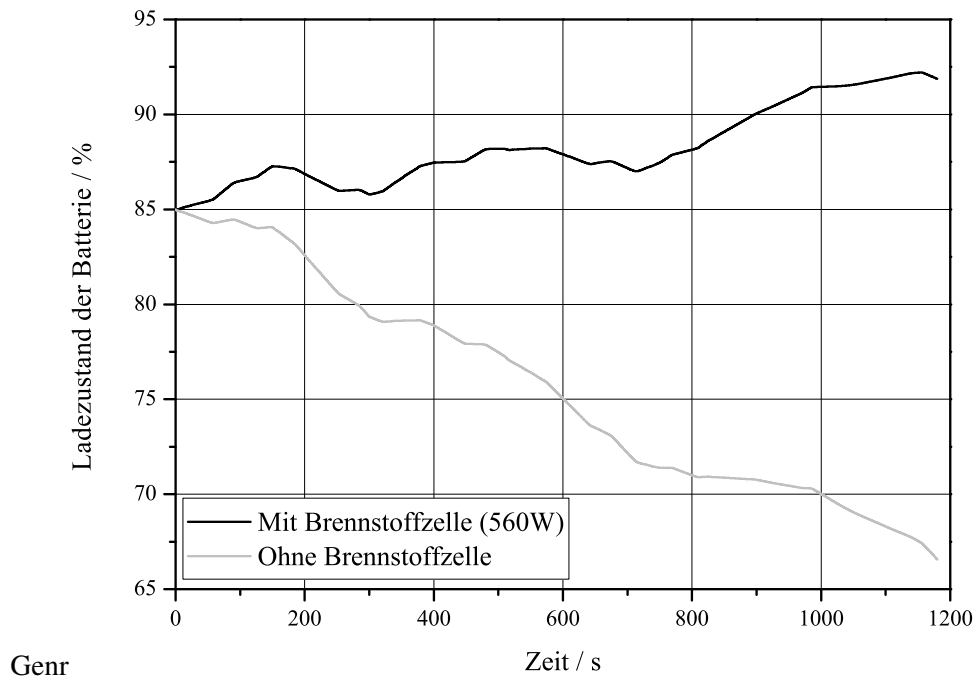


Abbildung 6.12.: Ladezustand der Batterie im Vergleich mit und ohne Brennstoffzelle errechnet aus den gemessenen Batterieströmen ($\overline{P}_{Last} = 2000W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

Ergebnisse aus Abschnitt 5.2.2, in dem festgestellt wurde, dass durch Reduzieren der Brennstoffzellenmaximalleistung die Zeit, in der die Brennstoffzelle in Betrieb ist, verlängert werden kann, so dass sie weniger zyklert wird.

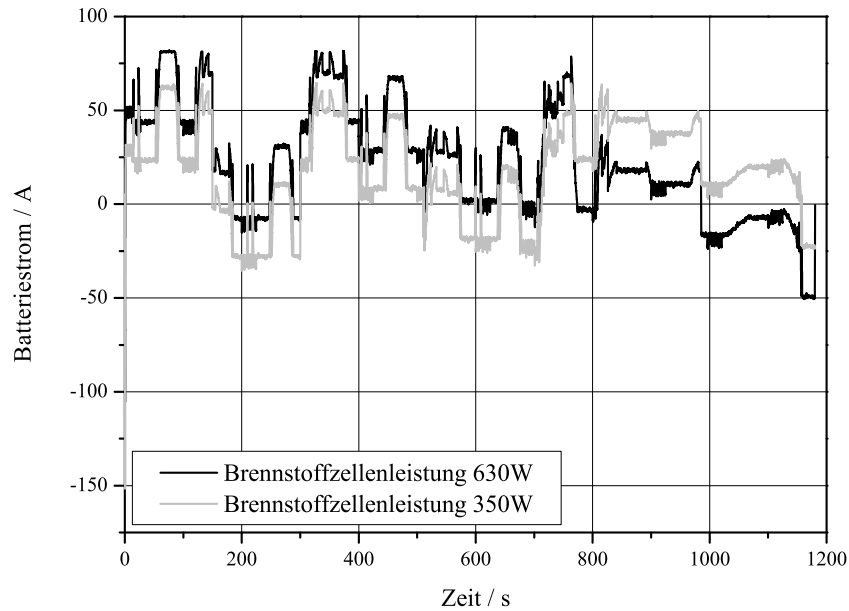


Abbildung 6.13.: Batterieströme bei der Verwendung zweier unterschiedlicher Brennstoffzellenleistungen ($\overline{P}_{Last} = 1800W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)

6. Experimentelle Untersuchungen am erweiterten elektrischen Bordnetz

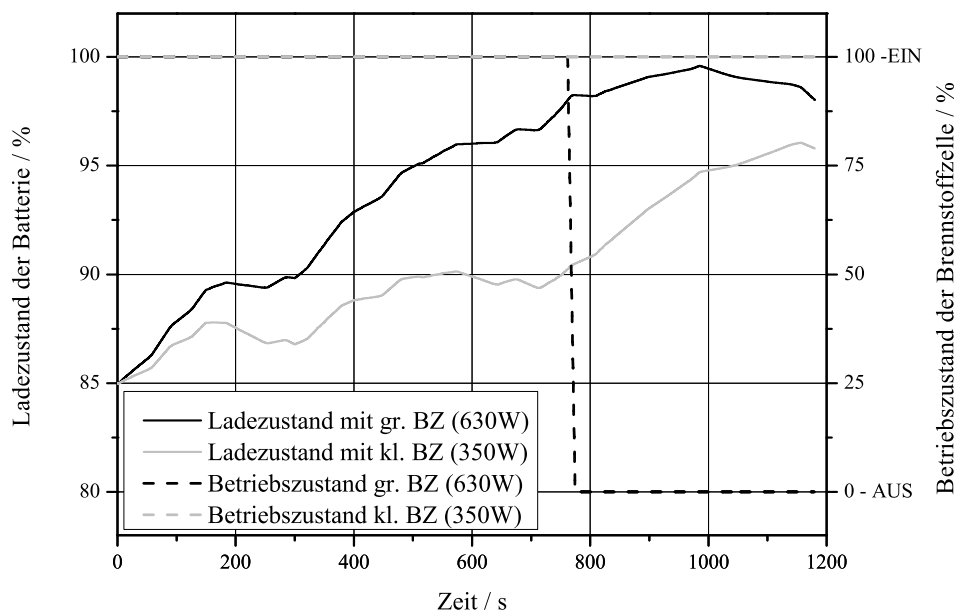


Abbildung 6.14.: Ladezustand der Batterie und Betriebszustand der Brennstoffzellen bei der Verwendung zweier unterschiedlicher Brennstoffzellenleistungen ($\overline{P}_{Last} = 1800W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)

7. Zusammenfassung und Ausblick

Durch die stetig steigende Anzahl an Sicherheits- und Komfortkomponenten innerhalb eines Fahrzeugs steigt ebenfalls die benötigte elektrische Energie, die von einem Klauenpolgenerator zur Verfügung gestellt werden muss. Zudem wird für die Verbesserung des Wirkungsgrads des Fahrzeugs durch die Elektrifizierung zuvor mechanisch vom Verbrennungsmotor angetriebener Komponenten zusätzlich elektrische Energie benötigt. Die Kombination aus Generator und Verbrennungsmotor ist ausgereizt, da die Leistung des Generators begrenzt ist.

Aus diesem Grund besteht die Möglichkeit, das konventionelle Bordnetz mit einer Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellenbasis zu unterstützen, damit zusätzlich elektrische Energie eingespeist wird. Dabei soll die Grundstruktur des (Standard-)Bordnetzes und seine Verbraucher beibehalten werden. Ein Vorteil bei der Verwendung einer Brennstoffzelle als zusätzlicher elektrischer Energiewandler ist die Verringerung des CO_2 -Ausstoßes des Fahrzeugs, wenn die Brennstoffzelle mit Wasserstoff betrieben wird. Wenn die Brennstoffzelle anstatt des Generators Energie in das Bordnetz liefert, wird der Verbrennungsmotor weniger belastet und weniger fossiler Kraftstoff wird benötigt, wodurch der CO_2 -Ausstoß sinkt.

Diese Arbeit setzt an diesem Punkt an. Ausgehend von Energieversorgungsproblemen in zukünftigen, leistungsstarken Bordnetzen werden denkbare Topologien des Bordnetzes beschrieben, die eine Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellenbasis beinhalten. Dabei wird beispielsweise auch eine Extremstudie untersucht, die als Energiewandler lediglich eine Brennstoffzelle beinhaltet und als Energiespeicher einen Doppelschichtkondensator.

Da das Bordnetz mit Hilfsstromversorgung einen weiteren elektrischen Energiewandler und eventuell einen zusätzlichen elektrischen Energiespeicher aufweist, werden Dimensionierungsmöglichkeiten für die Wandler- und Speicherkomponenten aufgezeigt, die aus der Dimensionierung des Standardbordnetzes abgeleitet wurden.

Durch die Integration eines zusätzlichen Energiewandlers (Brennstoffzelle) und –speichers (optionaler Doppelschichtkondensator) ist ein Energiemanagement unabdingbar. Dieses Energiemanagement steuert die Energieflüsse der Wandler und Speicher innerhalb des Bordnetzes. Hierfür gibt die Arbeit Beispiele für sinnvolle Energiemanagementstrategien, bei denen die sichere Energieversorgung aller elektrischen Komponenten im Vordergrund steht, ohne dass Komponenten ausgeschaltet werden müssen, was die Sicherheit beeinträchtigen oder den Komfort schmälern würde. Außerdem hat ein Energiemanagement die Aufgabe, die Lebenserwartung der Energiewandler und –speicher zu maximieren.

Zur Untersuchung der Bordnetztopologien mit und ohne Hilfsstromversorgung wurde ein Simulationsprogramm entworfen, das in der Lage ist, Energieflüsse innerhalb des Bordnetzes nachzubilden. Dafür werden weitere Größen des Bordnetzes — wie Spannungen und Ströme der einzelnen Komponenten — errechnet. Zusätzlich können die Ladezustände (SOC) der Speicher ausgegeben werden. Bei Kennt-

7. Zusammenfassung und Ausblick

nis dieser Größen ist es anschließend ebenfalls denkbar, benötigte leistungselektronische Stellglieder zu dimensionieren, da die Maximalwerte von Spannungen und Strömen bekannt sind. Das Simulationsprogramm beinhaltet zusätzlich eine Analysefunktion, mit der es möglich ist, unterschiedliche Bordnetztopologien und ihre Energiemanagements miteinander zu vergleichen und außerdem zu überprüfen, ob die Kombination Energiewandler, -speicher und Energiemanagement zueinander passt. Aus diesen Erkenntnissen können die einzelnen Komponenten und das Energiemanagement optimiert werden.

Simulationsergebnisse dienen der Untersuchung und Bewertung unterschiedlicher Bordnetztopologien und Energiemanagementstrategien, die in dieser Arbeit miteinander verglichen wurden. Dadurch konnten Aussagen über die Größe von Energiespeichern und –wandlern zur Dimensionierung der Bordnetzkomponenten getätigt werden. Des Weiteren konnten auch ungewöhnliche Topologien auf ihre Einsatzfähigkeit untersucht werden, die beispielsweise ohne konventionelle Batterie und Generator ausgestattet waren.

Im Rahmen dieser Arbeit ist außerdem ein Versuchsstand entstanden, der alle Komponenten des erweiterten Bordnetzes aufweist. An diesem Aufbau können unterschiedliche Bordnetzparameter verändert werden, sodass eine Vielzahl an unterschiedlichen Bordnetzen untersucht werden kann. Des Weiteren können Energiemanagementstrategien in der Praxis erprobt werden.

Die Arbeit hat gezeigt, dass die Verwendung einer Hilfsstromversorgung auf Brennstoffzellenbasis zur Unterstützung des Bordnetzes eine Möglichkeit wäre, um zukünftigen Energieversorgungsproblemen im Kfz-Bordnetz entgegenzuwirken. Wenn es in Zukunft gelingt, die Lebenserwartung der Brennstoffzelle zu verlängern, ihre Herstellungskosten zu verringern, den hohen Wirkungsgrad möglichst vollständig auszuschöpfen und Probleme bei der Wasserstoffspeicherung zu lösen, dann ist sie ein optimaler Energiewandler für eine Hilfsstromversorgung. Durch die Verwendung eines intelligenten Energiemanagements und die optimale Kombination der Energiespeicher und –wandler ist es aber schon heute möglich, die Lebensdauer dieser Komponenten zu verlängern.

8. Literaturquellen

- [1] Ansgar MEROTH und Boris TOLG. *Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug: Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen; mit 15 Tabellen*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008.
- [2] Hans-Jürgen GEVATTER und Ulrich GRÜNHAUPT. *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil: Fahrzeugelektronik, Fahrzeugmechatronik*. 2. vollständig bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [3] Volker SCHINDLER und Immo SIEVERS. *Forschung für das Auto von Morgen: Aus Tradition entsteht Zukunft; mit 6 Tabellen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [4] Ernst FIALA. *Mensch und Fahrzeug: Fahrzeugführung und sanfte Technik*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2006.
- [5] Jürgen WEIMER. “Ein Kurbelwellen-Starter-Generator auf Basis einer permanenterregten Synchronmaschine”. In: *HDT-Tagung, Alfred Krappel, Kurbelwellenstartgenerator (KSG)*. 1999, S. 46–64.
- [6] J. TACHTLER, T. ZWEIMÜLLER und R. HÖPPLER. “Potenziale der Brennstoffzellen-APU für zukünftige Bordnetze”. In: *Automobil-Elektronik 3* (2007), S. 38–41.
- [7] Konstantin LEDJEFF. *Brennstoffzellen: Entwicklung, Technologie, Anwendung*. 1. Aufl. Heidelberg: C. F. Müller, 1995.
- [8] Horst BAUER und F. DREWITZ. *Autoelektrik, Autoelektronik*. 3. aktualisierte Aufl. Braunschweig: Vieweg, 1998.
- [9] Radomir Michal FABIS. “Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen”. Diss. Technische Universität Berlin, 2006.
- [10] Bernd HEINTEL. “Energiemanagement und Bordnetzsimulation zur Erhöhung der Zuverlässigkeit von Kfz-Bordnetzen”. Diss. Universität Bremen, 2005.
- [11] Konrad REIF. *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007.
- [12] Gerhard HENNEBERGER. *Elektrische Motorausrüstung*. Vieweg Verlag, Braunschweig, 1990.

8. Literaturquellen

- [13] Reinhard MAYER. *Generatoren und Starter: Energieerzeugung und Bordnetz, Physikalische Grundlagen, Geräteausführungen für PKW und Nkw, Qualitätsmanagement, Werkstatt-Technik; Gelbe Reihe - Fachwissen Kfz-TechnikElektrik und Elektronik für Kraftfahrzeuge*. 1. Ausg., Oktober 2002. Stuttgart: Bosch, 2002.
- [14] Hans-Hermann BRAESS und Ulrich SEIFFERT. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik; ATZ-MTZ-Fachbuch*. 3. vollständig neu bearb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2003.
- [15] Jens CIERULLIES. “Auslegungs- und Bewertungsmetrik für die elektrische Energieversorgung von Kraftfahrzeugen”. Diss. Technische Universität München, 2006.
- [16] Alfred WARNER und K.-L. ORTH. *Lexikon der Elektrotechnik*. VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1984.
- [17] Jürgen Otto BESENHARD. *Handbook of battery materials*. Weinheim: Wiley-VCH, 1999.
- [18] Kurt JÄGER. *Gespeicherte Energie: Geschichte der elektrochemischen Energiespeicher*. Bd. 13. Geschichte der Elektrotechnik. Berlin: VDE-Verl., 1994.
- [19] Dirk Uwe SAUER. “Optimierung des Einsatzes von Blei-Säure-Akkumulatoren in Photovoltaik-Hybrid-Systemen unter Berücksichtigung der Batterialterung”. Diss. Universität Ulm, 2003.
- [20] Erwin BÖHMER, Dietmar EHRHARDT und Wolfgang OBERSCHELP. *Elemente der angewandten Elektronik: Kompendium für Ausbildung und Beruf*. Wiesbaden, 2007.
- [21] Kai BORGEEST. *Elektronik in der Fahrzeugtechnik - Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2008.
- [22] Henning WALLENTOWITZ und Konrad REIF. *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Wiesbaden: Friedr.Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2006.
- [23] Detlef HEINEMANN. “Strukturen von Batterie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und Ultracaps”. Diss. Technische Universität Berlin, 2006.
- [24] Carsten HOFF, Peter OPGEN-RHEIN und Matthias SCHÖLLMANN. “Energiemanagement mit smarten Komponenten”. In: *AUTOMOBIL-ELEKTRONIK* (Dezember 2007), S. 42–44.
- [25] B. BÄKER. *Energie- und Informationsmanagement für zukünftige Kfz-Bordnetze*. Verlag Mainz Wissenschaftsverlag, Aachen, 1998.
- [26] Bernhard GERL. *Brennstoffzellenfahrzeuge: Die nachhaltige Innovation im Automobilantrieb*. Bd. 235. Die Bibliothek der Technik. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, 2002.
- [27] Konstantin LEDJEFF-HEY. *Brennstoffzellen: Entwicklung, Technologie, Anwendung*. 2. neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg: C. F. Müller, 2001.
- [28] Olivier GARCIA. “DC/DC-Wandler für die Leistungsverteilung in einem Elektrofahrzeug mit Brennstoffzellen und Superkondensatoren”. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2002.

8. Literaturquellen

- [29] Helmut EICHLSEDER. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. Hrsg. von Manfred KLELL. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008.
- [30] Sven GEITMANN. *Wasserstoff & Brennstoffzellen: Die Technik von morgen!* 1. Aufl. Konstanz: Christiani Technisches Institut für Aus- und Weiterbildung, 2003.
- [31] Sven GEITMANN. *Wasserstoff & Brennstoffzellen: Die Technik von morgen*. Kremmen: Hydrogeit, 2004.
- [32] André WEBER. "Entwicklung von Kathodenstrukturen für die Hochtemperatur-Brennstoffzelle SOFC". Diss. Universität Fridericiana Karlsruhe, 2002.
- [33] Gregor HOOGERS. *Fuel Cell Technology Handbook*. CRC-Press, Boca Raton London, 2003.
- [34] Jens HAUBROCK. "Parametrierung elektrischer Äquivalentschaltbilder von PEM Brennstoffzellen". Diss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2007.
- [35] Karl KORDESCH und Günter SIMADER. *Fuel cells and their applications*. 4. Reprint. Weinheim: VCH, 2001.
- [36] Wolfgang R. BAUMGARTNER, Eva WALLNÖFER und Viktor HACKER. "Entwicklung von optimierten Betriebsstrategien zur Erhöhung der Lebensdauer von Brennstoffzellen". In: *Chemie Ingenieur Technik* 9 (2007), S. 1345.
- [37] Peter KURZWEIL. *Brennstoffzellentechnik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen ; mit 178 Tabellen; Studium und Praxis*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2003.
- [38] Cornel STAN. *Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger*. 2. erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [39] Arthur KURZ. "Ultra Caps - die etwas anderen Starterbatterien". In: *Automobil-Elektronik* 4 (2007), S. 28–29.
- [40] H. MEHLICH u. a. "Investigation of Reliability of Supercaps". In: *PCIM Conference Nuremberg, Germany*. 2006.
- [41] Jörg LOTT. *Einsatz des Doppelschichtkondensators als Zusatzspeicher im Elektrofahrzeug*. Als Ms. gedr. Bd. 307. Fortschritt-Berichte VDIReihe 21, Elektrotechnik. Düsseldorf: VDI-Verl., 2001.
- [42] Heinrich FROHNE u. a. *Grundlagen der Elektrotechnik, Leitfaden der Elektrotechnik*. 18. neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1996.
- [43] Rüdiger KÖTZ. "Doppelschichtkondensatoren - Technik, Kosten, Perspektiven". In: *Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*. 2002.
- [44] Martin SCHMID. "Doppelschichtkondensatoren als Kurzzeitspeicher im Hybridfahrzeug". Diss. München: Technische Universität München, 2004.
- [45] Manfred WAIDHAS. "Grundlegende Technologie von Doppelschichtkondensatoren". In: *ZVEI-Workshop, Frankfurt*. 2004.

8. Literaturquellen

- [46] Klemens HEUMANN. *Grundlagen der Leistungselektronik; Teubner-Studienbücher Elektrotechnik*. 6. überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1996.
- [47] Josef LUTZ. *Halbleiter-Leistungsbaulemente: Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [48] Dieter ANKE. *Leistungselektronik, Elektronik in der Praxis: Mit 4 Tabellen*. München: Oldenbourg, 1986.
- [49] Joachim SPECOVIVUS. *Grundkurs Leistungselektronik: Bauelemente, Schaltungen und Systeme; Studium Technik*. 2. aktual. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2008.
- [50] Ulrich SCHLIENZ. *Schaltnetzteile und ihre Peripherie: Dimensionierung, Einsatz, EMV*. 3. aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007.
- [51] B. M. BIRD, K. G. KING und D. A. G. PEDDER. *An introduction to power electronics*. 2. ed. Chichester: Wiley, 1993.
- [52] Manfred MICHEL, Hrsg. *Leistungselektronik: Eine Einführung ; mit 32 Übungsaufgaben*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1996.
- [53] Dierk SCHRÖDER. *Leistungselektronische Bauelemente*. Zweite Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [54] Dierk SCHRÖDER. *Leistungselektronische Schaltungen*. Bd. Dierk Schröder ; 4. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer, 1998.
- [55] Wolfgang STEPHAN. *Leistungselektronik interaktiv: Aufgaben unter Simplorer und Mathcad*. München u. a.: Hanser (Fachbuchverlag Leipzig), 2001.
- [56] Gert HAGMANN. *Leistungselektronik: Systematische Darstellung und Anwendungen in der elektrischen Antriebstechnik ; Aufgaben mit Lösungen und Lösungswegen; Studententext Technik, Elektrotechnik*. 2. überarb. Aufl. Wiesbaden: Aula-Verl., 1998.
- [57] Dieter POLENOV. "DC/DC-Wandler zur Einbindung von Doppelschichtkondensatoren in das Fahrzeugenergiebordnetz". Diss. Technische Universität Chemnitz, 2009.
- [58] N.N. *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Bd. 25. vollst. überarb. u. erw. Aufl. Robert Bosch GmbH, 2004.
- [59] *Richtlinie 91/441/EWG des Rates zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emission von Kraftfahrzeugen vom 26.06.1991, Nr. L 242 vom 30.08.1991*.
- [60] Karl-Heinz DIETSCHKE. *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch: [Kfz-Fachwissen kompakt], Studium und Praxis*. 26. überarb. und erg. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2007.
- [61] Robert Bosch GMBH. *Automotive handbook*. 7. ed. Plochingen: Bosch, 2007.
- [62] Paul DEGOBERT. *Automobiles and pollution; Institut français du pétrole publications*. Paris: Ed. Technip, 1995. ISBN: 2710806762.

8. Literaturquellen

- [63] Constantine D. RAKOPOULOS und Evangelos G. GIAKOUMIS. *Diesel Engine Transient Operation: Principles of Operation and Simulation Analysis*. London: Springer London, 2009.
- [64] Ronald M. HECK, Robert J. FARRAUTO und Suresh T. GULATI. *Catalytic air pollution control: Commercial technology*. 3. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2009.
- [65] Wolf-Heinrich HUCHO. *Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort ; mit 49 Tabellen*. 5. völlig neu bearb. und erw. Aufl., Nachdr. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [66] Matthias KRUST. "Tauziehen um neuen Fahrzyklus - Auslaufmodell NEFZ-Zyklus". In: *Automobilwoche* Vol. 9 (2010), 1 und 13.
- [67] Horst BAUER. *Batterien und Bordnetze [für Kraftfahrzeuge]: Starterbatterien, Ladegeräte, herkömmliche und künftige Bordnetze, Schaltzeichen und Schaltpläne, Leitungsberechnung, Steckverbindungen, elektrische Antriebe, Antriebsbatterien; Gelbe Reihe - Fachwissen Kfz-Technik Elektrik und Elektronik für Kraftfahrzeuge*. 4. Ausg., Juli 2002. Stuttgart: Bosch, 2002.
- [68] Thomas CHRIST. *Rekuperation in elektrischen Energiebordnetzen von Kraftfahrzeugen*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2006.
- [69] Guido KICKELBICK. *Chemie für Ingenieure*. München: Pearson Studium, 2008.
- [70] Günther HACHTEL und Ulrich HOLZBAUR. *Management für Ingenieure: Technisches Management für Ingenieure in Produktion und Logistik ; mit 73 Tabellen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [71] Marco LUNANOVA. *Optimierung von Nebenaggregaten: Maßnahmen zur Senkung der CO₂-Emission von Kraftfahrzeugen*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2009.
- [72] Jürgen ROES u. a. "Problemstellung, Chancen und Risiken von Brennstoffzellen APUs". In: *Fachforum Brennstoffzelle - Entwickler und Anwender berichten, 07.-08. Oktober 2003, Berlin*. 2003.
- [73] Marc WEIDER, André METZNER und Stephan RAMMLER. *Das Brennstoffzellen-Rennen - Aktivitäten und Strategien bezüglich Wasserstoff und Brennstoffzelle in der Automobilindustrie*. Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH (WZB). 2004.
- [74] Konrad REIF. *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007.
- [75] Can ABAY. *Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik*. Hrsg. von IWB FORSCHUNGSBERICHTE. Utz Verlag, München, 2000.
- [76] Volker BLOBEL und Erich LOHRMANN. *Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse*. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 1998.

8. Literaturquellen

- [77] Detlef STOLTEN und Thomas GRUBE. “Die potentielle Rolle von Wasserstoff in der Energiewirtschaft”. In: *Der 4. Deutsche Wasserstoff-Congress 2008 - Tagungsband*. Bd. 12. Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt. Jülich: Forschungszentrum Zentralbibliothek, 2008.
- [78] Gerhard BABIEL. *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik: Lehr- und Arbeitsbuch*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2007.
- [79] M. SCHÖLLMANN, M. ROSENMAYR und J. OLK. “Modulare Energiemanagementlösungen mit dem intelligenten Batteriesensor IBS”. In: *25 Jahre Elektronik-Systeme im Kraftfahrzeug*. Brill, U., 2006.
- [80] Wolfgang GEORGI und Ergun METIN. *Einführung in LabVIEW: [Studentenversion 8.0 inklusive]*. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2006.
- [81] Rahman JAMAL und Andre HAGESTEDT. *LabVIEW: Das Grundlagenbuch ; [bis Version LabVIEW 7.1]; Scientific Computing*. 4. Aufl., [Nachdr.] München: Addison-Wesley, 2005.
- [82] Bernward MÜTTERLEIN. *Handbuch für die Programmierung mit LabVIEW: Mit Studentenversion LabVIEW 8*. 2. Aufl. Heidelberg, Neckar: Spektrum Akademischer Verlag in Springer-Verlag GmbH, 2009.

Sonstige Quellen

- [83] Shell Deutschland Oil GmbH HAMBURG. *Shell PKW-Szenarien bis 2030 Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität*. 2009. URL: www.shell.de/pkwszenarien.
- [84] Volkswagen AG. 2010. URL: <http://volkswagen.de>.
- [85] Robert Bosch GmbH Presseforum. 2010. URL: <http://www.bosch-presse.de>.
- [86] Exide TECHNOLOGIES. 2011. URL: <http://www.exide-automotive.de/>.
- [87] ASUE. *Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. - Stationäre Brennstoffzellen, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern*. 2009. URL: <http://www.asue.de>.
- [88] Udomi - *Ultracap-Basics*. 2009. URL: <http://www.udomi.de/fuelcell/ultracap-basics.html>.
- [89] MAXWELL. *White Paper - Design considerations for ultracapacitors*. 2009. URL: <http://www.maxwell.com/>.
- [90] Banner GmbH: *Stand by Bull Vlies-Technologie, Firmenschrift*, 2007.
- [91] N. N. *Truck Idling Regulations*. American Trucking Associations. 2010. URL: <http://www.truckline.com>.
- [92] Philipp RATHKE. “Diplomarbeit: Auslegung der Verfahrenstechnik für ein autonomes Brennstoffzellensystem”. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. 2010.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Verbraucher in einem Kraftfahrzeug	1
1.2. Zu erwartender elektrischer Leistungsbedarf im Kraftfahrzeug [6]	2
1.3. PKW-Neuzulassungen nach Antriebsarten im Trend-Szenario [83]	3
1.4. Vergleich der Energiewandlung bei der Erzeugung elektrischer Energie mit Hilfe von Wärme­kraft­ma­schine und Brennstoffzelle	4
1.5. Vergleich von Wirkungsgraden [7]	4
1.6. Verkabelung in Volkswagen Passat [84]	5
2.1. Elektrisches Bordnetz erweitert durch Brennstoffzelle, Doppelschichtkondensator und optionaler höherer Spannungsebene	7
2.2. Generator [85]	8
2.3. Generatorschaltbild mit elektronischem Regler [14] S. 644	9
2.4. Wirkungsgradkennlinienfeld zweier Generatoren im Vergleich [13]	10
2.5. Verluste in einem Drehstromgenerator [13]	10
2.6. Kennlinien eines Klauenpolgenerators bei unterschiedlichen Temperaturen [85]	11
2.7. Bleibatterie [85]	12
2.8. Aufbau einer Bleibatterie­zelle	13
2.9. Vergleich der Lebensdauer von Bleibatterien (Starter- und Gelbatterie) bei Zyklen mit unterschiedlichem Ladezuständen [86]	14
2.10. Batteriesensor Quelle: BOSCH [85]	17
2.11. Aufbau eines Batteriesensors [14]	18
2.12. Elektrischer Verbraucher	18
2.13. Leistungen und Einschaltdauern heutiger und zukünftiger (fett gedruckt) Verbraucher in einem Kraftfahrzeug, aus [25] (aktualisiert/erweitert)	20
2.14. Vergleich von Carnot'schem und Brennstoffzellenwirkungsgrad	23
2.15. Aufbau einer Brennstoffzelle [87, 32]	24
2.16. Prinzipdarstellung einer Brennstoffzelle	25
2.17. Ausgangskennlinie mit Illustration eines Beispiels für I_{BZ} und U_{BZ}	26
2.18. Überspannungen innerhalb der Brennstoffzelle	27
2.19. Prinzipdarstellung unterschiedlicher Brennstoffzellentypen [7, 27, 35]	28
2.20. Doppelschichtkondensator der Firma Maxwell	31
2.21. Aufbau des Doppelschichtkondensators und einfaches Ersatzschaltbild [41]	32
2.22. Funktionsprinzip eines Doppelschichtkondensators [44]	33

Abbildungsverzeichnis

2.23. Ragonediagramm [45]	34
2.24. Arten der Energieumformung [46]	36
2.25. Schaltzeichen des N-Kanal MOSFET	37
2.26. Aufbauschema des MOSFET [51]	38
2.27. Schaltzeichen des IGBT	39
2.28. Aufbauschema des IGBT [47]	39
2.29. Ersatzschaltbild des IGBT	40
2.30. DC/DC-Wandler	40
2.31. Zusammensetzung des Brückenzeigs aus Tief- und Hochsetzsteller	41
2.32. Wechselrichter	42
2.33. Sperrwandler	43
2.34. Fahrzyklus: EU NEFZ	44
2.35. Fahrzyklus: USA FTP 72	44
2.36. Fahrzyklus: USA FTP 75	45
2.37. Fahrzyklus: USA SC03	46
2.38. Fahrzyklus: USA US06	46
2.39. Fahrzyklus: USA HWFET	47
2.40. Fahrzyklus: USA NYCC	48
2.41. Fahrzyklus: USA UC	48
2.42. Fahrzyklus: JAPAN 10 15 Mode	49
2.43. Fahrzyklus: JAPAN JC08	49
3.1. Komponenten des Simulationsprogrammes	51
3.2. Simulationsablauf	52
3.3. Verlauf der Drehzahl des Generators beim Durchfahren des Neuen Europäischen Fahrzyklusses	53
3.4. Generatormodell	54
3.5. Maximale Generatorströme in Abhängigkeit von der Drehzahl [85]	55
3.6. Maximaler Generatorstrom (E8-14V 75-140A; Generatornennstrom $I_{Gen,nen} = 140A$) beim Durchfahren des Neuen Europäischen Fahrzyklusses	55
3.7. Batteriemodell für Ladebilanz- und Verbrauchssimulationen [68]	56
3.8. Leerlaufspannung einer Bleibatterie in Abhängigkeit vom Ladezustand [90]	57
3.9. Batterieinnenwiderstand als Funktion des SOC [90]	57
3.10. Starterstrom und Bordnetzspannung beim Startvorgang des Verbrennungsmotors eines Volkswagen Caddy 1,4l Ottomotor	58
3.11. Lastszenarien mit Durchschnittsleistungen von 500W ...3500W	59
3.12. u-j-Kennlinie einer einzelnen Brennstoffzelle	60
3.13. Simulationsmodell des Doppelschichtkondensators	60
3.14. Selbstentladung eines Doppelschichtkondensators (Messung am Maxwell Doppelschichtkondensator 160F/48V bei Raumtemperatur)	61

Abbildungsverzeichnis

3.15. Langzeitmessung der Selbstentladung eines Doppelschichtkondensators (Maxwell 160F/48V)	61
3.16. Grafische Bedienoberfläche des Simulationsprogrammes	62
3.17. Ladezustand (SOC) der Batterie beim Durchfahren des NEFZ mit unterschiedlichen Bordnetzleistungen ($I_{Gen,max} = 140A$; $C_{Bat} = 44Ah$)	63
3.18. Ladezustand (SOC) der Batterie beim Durchfahren des NEFZ mit konstanter Bordnetzleistung ($P_{BN} = 3000W$) und Hilfsstromversorgung mit unterschiedlichen Leistungen ($I_{Gen,max} = 140A$; $C_{Bat} = 44Ah$)	64
3.19. Kraftstoffmehrverbrauch für die Erzeugung elektrischer Energie beim Durchfahren des jeweiligen Fahrzyklusses bei unterschiedlichen Bordnetzleistungen	66
3.20. Kraftstoffeinsparung in Bordnetzen unterschiedlicher Leistungen durch den Einsatz von Hilfsstromversorgungen auf Brennstoffzellenbasis (Betrieb mit Wasserstoff) mit unterschiedlichen Leistungen beim Durchfahren des NEFZ; Generator 140A	67
4.1. Definition Delta-Ladezustand und minimaler Ladezustand	73
4.2. Delta-Ladezustand der Batterie nach dem Durchfahren des NEFZ ($SOC_{Bat,Start} = 50\%$)	74
4.3. Minimaler Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Bordnetzleistung ($SOC_{Bat,Start} = 75\%$)	75
4.4. Maximal benötigte bzw. maximal speicherbare Ladung beim Durchfahren des NEFZ	76
4.5. Minimaler Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der Batteriekapazität	78
4.6. Delta-Ladezustand der Batterie nach dem Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 140A$; $SOC_{Bat,Start} = 50\%$)	80
4.7. Minimaler Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Bordnetzleistung ($I_{Gen,nen} = 140A$; $SOC_{Bat,Start} = 75\%$)	81
4.8. Delta-Ladezustand der Batterie nach dem Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $SOC_{Bat,Start} = 50\%$)	82
4.9. Minimaler Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Bordnetzleistung ($I_{Gen,nen} = 70A$; $SOC_{Bat,Start} = 75\%$)	83
4.10. Minimaler Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der Batteriekapazität ($P_{BN} = 3500W$; $I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ} = 3000W$)	84
4.11. Minimaler Ladezustand der Batterie unter Verwendung eines zusätzlichen Doppelschichtkondensators beim Durchfahren des NEFZ in Abhängigkeit von der Batteriekapazität ($P_{BN} = 3500W$; $I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ} = 3000W$)	85
4.12. Tiefsetzsteller	87
4.13. Hochsetzsteller	87
4.14. Übersicht bidirektionale DC/DC-Wandler	88
4.15. Brückengleichrichter des Generators	89
4.16. Ströme des DCDC-Wandlers — kondensatorseitig und batterieseitig; ($P_{BN} = 3500W$, $P_{BZ} = 3500W$; $I_{Gen,nen} = 70A$; $C_{Bat} = 55Ah$; $C_{Kon} = 160F$ mit Start-Stopp-Funktion)	91

Abbildungsverzeichnis

4.17. Mögliche Maximalströme innerhalb des erweiterten Bordnetzes	92
4.18. Extremstudie — Austausch des Generators und der Batterie durch eine Brennstoffzelle und einen Doppelschichtkondensator	93
4.19. Möglicher maximaler Generatorstrom beim Durchfahren des NEFZ und der tatsächlich vom Generator gewandelte und ins Bordnetz gespeiste Strom ($I_{Gen,max} = 140A$, $\overline{P_{Last}} =$ $3500W$, $C_{Kon} = 10F$, $P_{BZ} = 3500W$, $C_{Bat} = 30Ah$)	94
4.20. Ströme des Doppelschichtkondensators und der Batteriestrom ($\overline{P_{Last}} = 3500W$, $C_{Kon} =$ $20F$, $P_{BZ,max} = 3500W$, $C_{Bat} = 30Ah$)	94
4.21. Doppelschichtkondensatorstrom ($\overline{P_{Last}} = 3500W$, $C_{Kon} = 30F$, $P_{BZ,max} = 3500W$, $C_{Bat} =$ $30Ah$)	95
5.1. Ergebnisbeispiel für den Term 1 beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $C_{Bat} =$ $20Ah$; Strategie 1; ungewichtet)	98
5.2. Ergebnisbeispiel für den Term 2 beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $C_{Bat} =$ $20Ah$; Strategie 1; ungewichtet)	99
5.3. Ergebnisbeispiel für den Term 3 beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $C_{Bat} =$ $20Ah$; Strategie 1; ungewichtet)	100
5.4. Ergebnisbeispiel für den Term 4 beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $C_{Bat} =$ $20Ah$; Strategie 1; ungewichtet)	101
5.5. Ergebnisbeispiel für den Term 5; ungewichtet	102
5.6. Abhängigkeit der Leistungsdichte und Masse von Generatoren von ihrem Nennstrom . .	103
5.7. Ergebnisbeispiel für den Term 6; ungewichtet	103
5.8. Ergebnisbeispiel für den Term 7; ungewichtet	104
5.9. Energiehaushalt des Bordnetzes beim Laden und Entladen der Batterie [67]	105
5.10. Programmablaufplan eines einfachen Energiemanagements zur Steuerung der Brenn- stoffzelle	107
5.11. Strategie 1: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durch- fahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 4000W$; $P_{Last} = 3000W$; $C_{Bat} = 55Ah$) . . .	108
5.12. Strategie 1: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durch- fahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 3000W$; $\overline{P_{Last}} = 3000W$; $C_{Bat} = 55Ah$) . . .	109
5.13. Summe aller Fehlerpunkte; Strategie 1; $SOC_{Bat,Start} = 75\%$ (Gewichte gemäß Tabelle 5.1)	109
5.14. Wirkungsgradkennlinie in Abhängigkeit des Brennstoffzellenstroms [92]	111
5.15. Strategie 2: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durch- fahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 4000W$; $\overline{P_{Last}} = 3000W$; $C_{Bat} = 55Ah$) . . .	111
5.16. Strategie 2: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durch- fahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 4000W$; $\overline{P_{Last}} = 2500W$; $C_{Bat} = 55Ah$) . . .	112
5.17. Summe aller Fehlerpunkte; Strategie 2; (Gewichte nach Tabelle 5.1)	113
5.18. Strategie 3: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durch- fahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 4000W$; $\overline{P_{Last}} = 3000W$; $C_{Bat} = 55Ah$; $C_{DSK} = 160F$; $U_{DSK,max} = 48V$)	114

Abbildungsverzeichnis

5.19. Strategie 3: Betriebszustand der Brennstoffzelle und Ladezustand der Batterie beim Durchfahren des NEFZ ($I_{Gen,nen} = 70A$; $P_{BZ,max} = 4000W$; $\overline{P_{Last}} = 2500W$; $C_{Bat} = 55Ah$; $C_{DSK} = 160F$)	115
5.20. Summe aller Fehlerpunkte; Strategie 3; (Gewichte nach Tabelle 5.1)	116
6.1. Aufbau des Versuchsstands	118
6.2. Schematischer Aufbau des Versuchsstands	119
6.3. Eingabefenster des Versuchsstands	120
6.4. Ausgabefenster I — Direkte Ausgabe aller relevanten Daten auf dem Monitor	121
6.5. Ausgabefenster II — Ausgabe aller gewünschten Daten im Anschluss an die Messung	122
6.6. Vergleich der Verläufe des Batteriestroms aus Simulation und Messung ($\overline{P_{Last}} = 2000W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)	123
6.7. Vergleich der Verläufe des Ladezustands aus Simulation und Messung ($\overline{P_{Last}} = 2000W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)	124
6.8. Vergleich der Verläufe des Generatorstroms aus Simulation und Messung ($\overline{P_{Last}} = 2000W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)	124
6.9. Vergleich der Verläufe des Laststroms aus Simulation und Messung ($\overline{P_{Last}} = 2000W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)	125
6.10. Gemessene Bordnetzspannung ($\overline{P_{Last}} = 2000W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)	126
6.11. Messergebnisse der Verringerung der Spannungseinbrüche der Bordnetzspannung mit Brennstoffzelle im Vergleich zum Fall ohne Brennstoffzelle ($\overline{P_{Last}} = 2000W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)	127
6.12. Ladezustand der Batterie im Vergleich mit und ohne Brennstoffzelle errechnet aus den gemessenen Batterieströmen ($\overline{P_{Last}} = 2000W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)	127
6.13. Batterieströme bei der Verwendung zweier unterschiedlicher Brennstoffzellenleistungen ($\overline{P_{Last}} = 1800W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)	128
6.14. Ladezustand der Batterie und Betriebszustand der Brennstoffzellen bei der Verwendung zweier unterschiedlicher Brennstoffzellenleistungen ($\overline{P_{Last}} = 1800W$; $I_{Gen,nen} = 140A$; $C_{Bat} = 200Ah$)	129
A.1. NEFZ	146
A.2. Japan JP10	146
A.3. Japan JC08	146
A.4. Japan 10-15 Mode	146
A.5. USA CUC LA72	146
A.6. USA NYCC	146
A.7. USA FTP 72	147
A.8. USA FTP 75	147
A.9. USA HWFET	147
A.10. USA SFTP US06	147
A.11. USA SFTP SC03	147

Abbildungsverzeichnis

A.12. Dauer der Fahrzyklen	148
A.13. Distanzen	148
A.14. Leerlaufanteile	148
A.15. Höchst- und Durchschnittsgeschwindigkeiten	148
A.16. Maximal einspeisbare Energie	148
A.17. SN_Stadt	149
A.18. ST_Autobahn	149
A.19. ST_Stadt	149
A.20. WN_Stadt	149
A.21. WT_Autobahn	149
A.22. WT_Stadt	149

Tabellenverzeichnis

2.1. Galvanische Sekundärelemente [11, 16]	15
2.2. Leistungsbedarf von Verbrauchern in Kfz-Bordnetzen [12, 25]	19
2.3. Brennstoffzellentypen	28
3.1. Fahrzeugdaten	52
3.2. Generatortypen (Firma BOSCH [85])	54
3.3. Vergleich von Fahrzyklen	69
4.1. Kombinationsmöglichkeiten im erweiterten Kfz-Bordnetz	71
4.2. Maximale Leistung unterschiedlicher Generatortypen	72
4.3. Mögliche Auslegung für den benötigten Tiefsetzsteller	90
4.4. Mögliche Auslegung für den benötigten bidirektionalen DC/DC-Wandler	91
5.1. Beispiel der Zuweisung der Gewichte	104
A.1. Fahrzeugdaten - Teil 1	150
A.2. Fahrzeugdaten - Teil 2	151

A. Anhang

A.1. Fahrzyklen

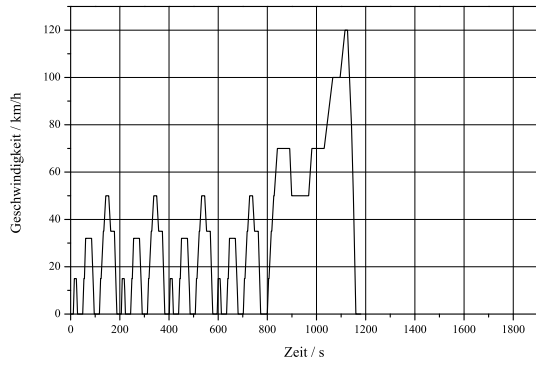


Abbildung A.1.: NEFZ

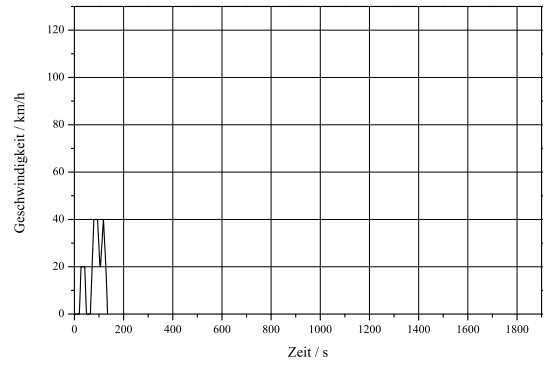


Abbildung A.2.: Japan JP10

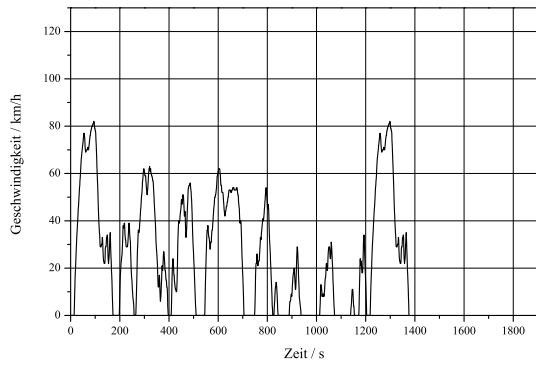


Abbildung A.3.: Japan JC08

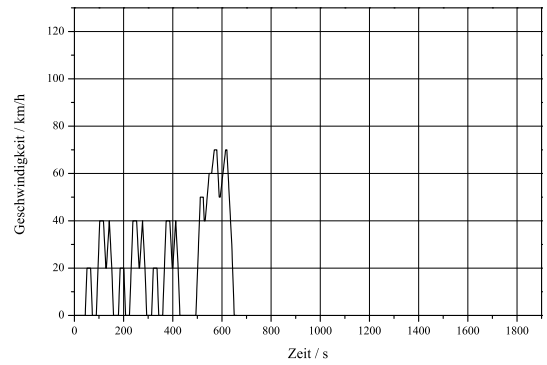


Abbildung A.4.: Japan 10-15 Mode

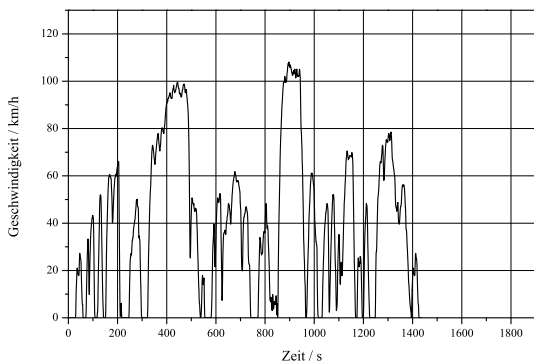


Abbildung A.5.: USA CUC LA72

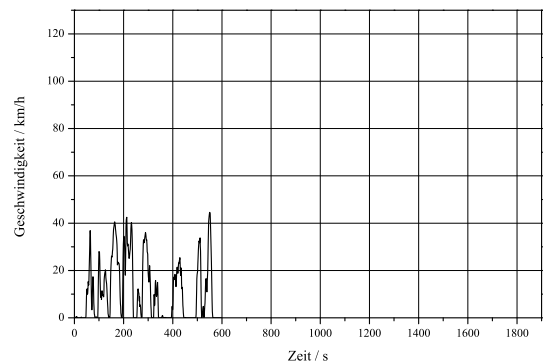


Abbildung A.6.: USA NYCC

A. Anhang

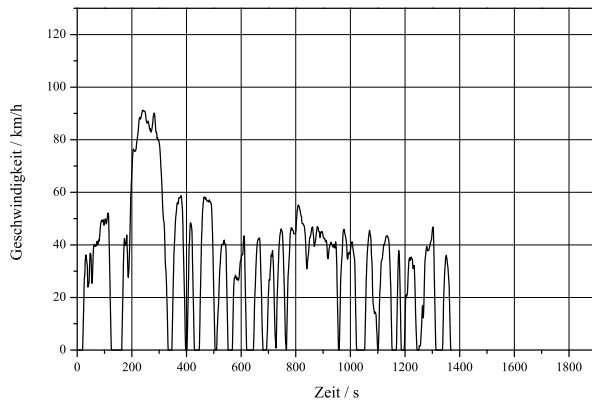


Abbildung A.7.: USA FTP 72

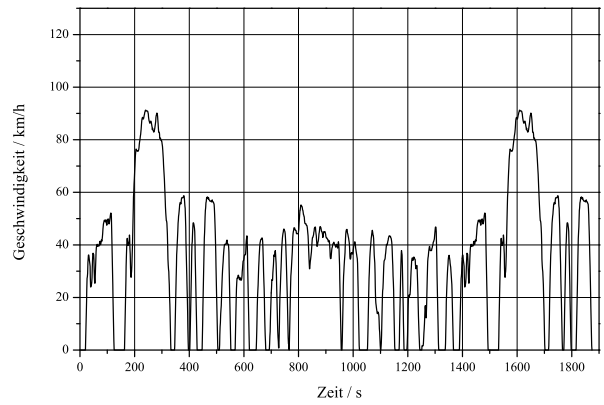


Abbildung A.8.: USA FTP 75

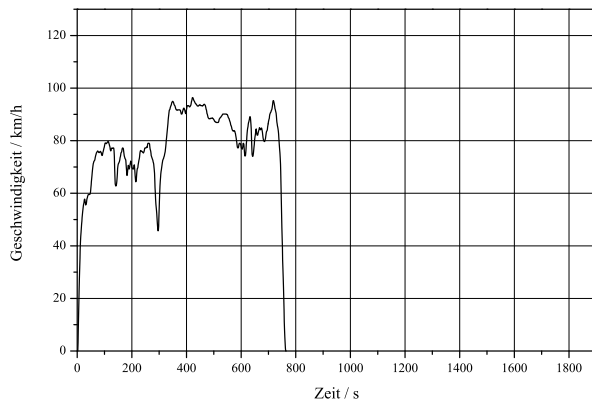


Abbildung A.9.: USA HWFET

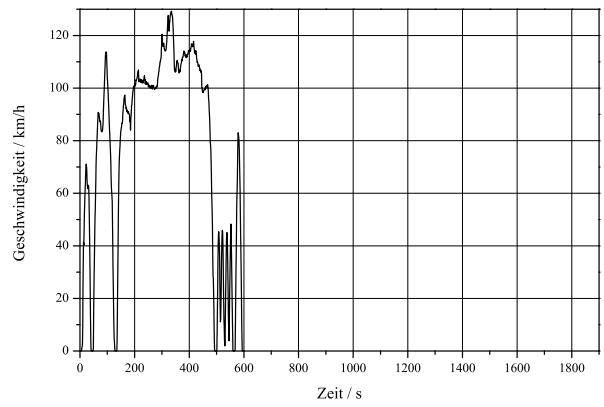


Abbildung A.10.: USA SFTP US06

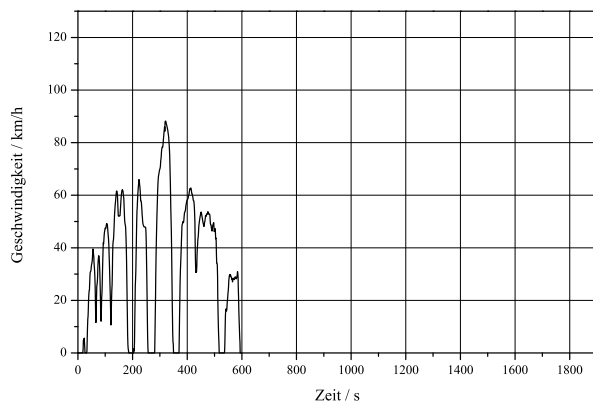


Abbildung A.11.: USA SFTP SC03

A. Anhang

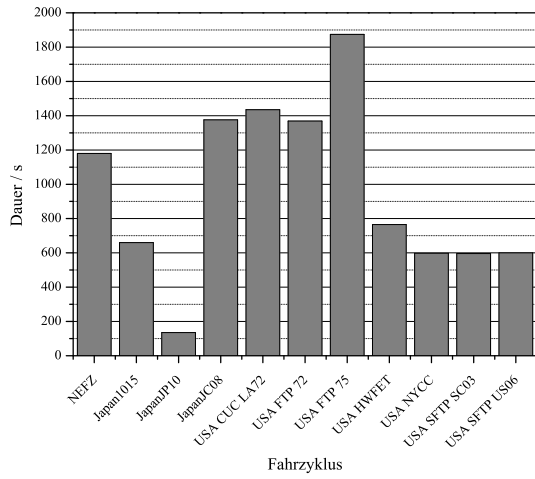


Abbildung A.12.: Dauer der Fahrzyklen

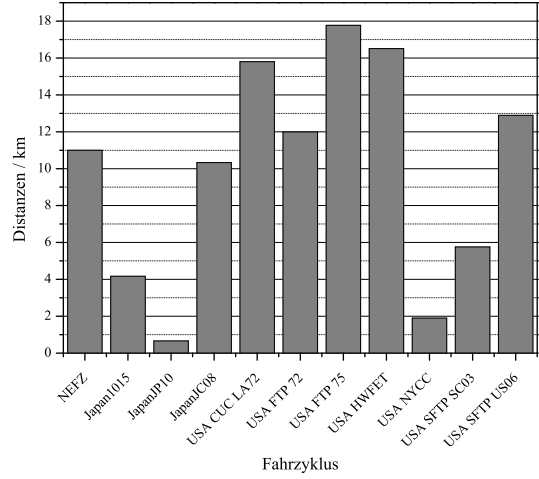


Abbildung A.13.: Distanzen

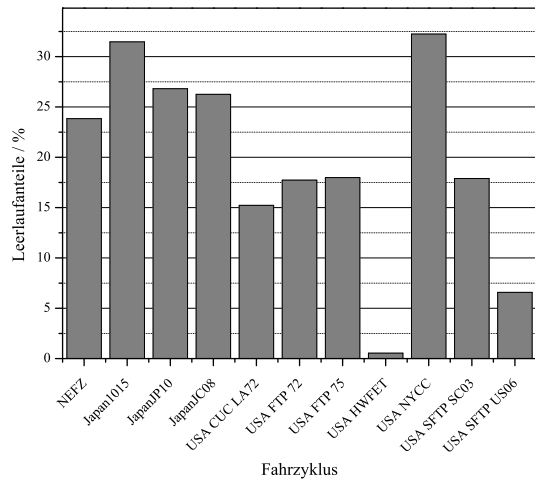


Abbildung A.14.: Leerlaufanteile

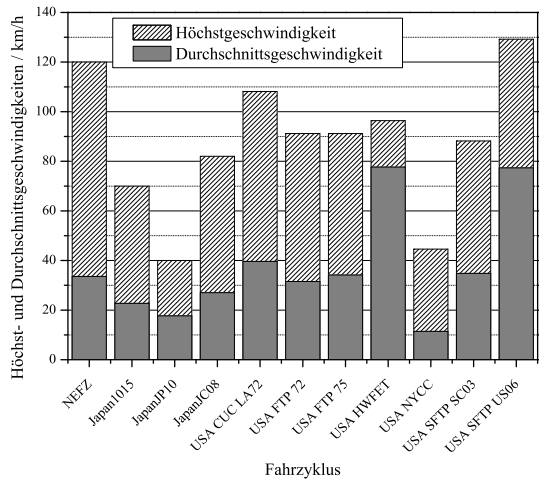


Abbildung A.15.: Höchst- und Durchschnittsgeschwindigkeiten

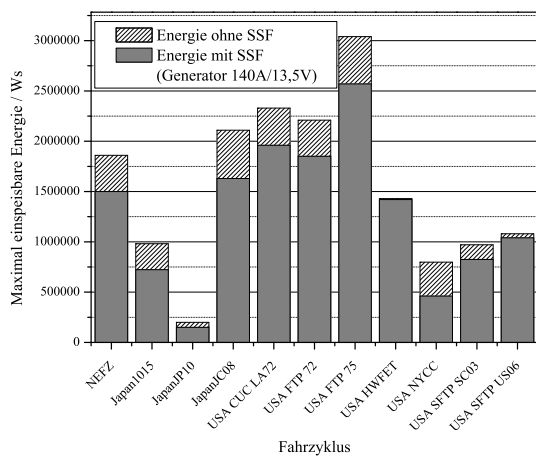


Abbildung A.16.: Maximal einspeisbare Energie

A.2. Lastzyklen

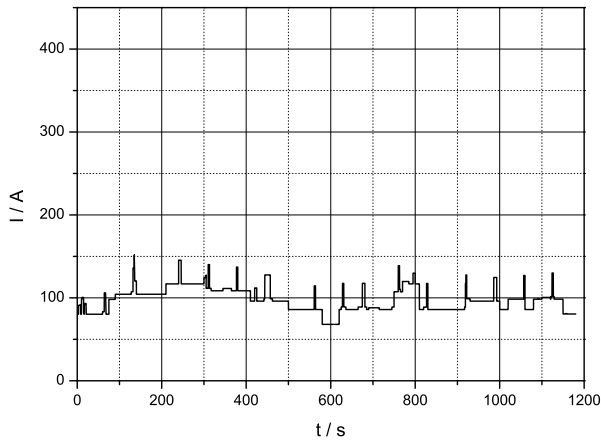


Abbildung A.17.: SN_Stadt

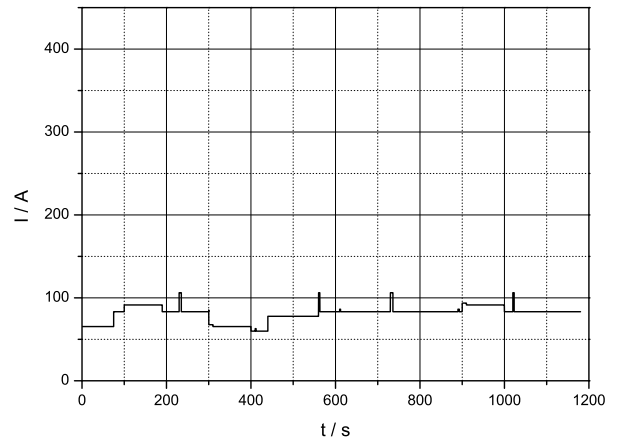


Abbildung A.18.: ST_Autobahn

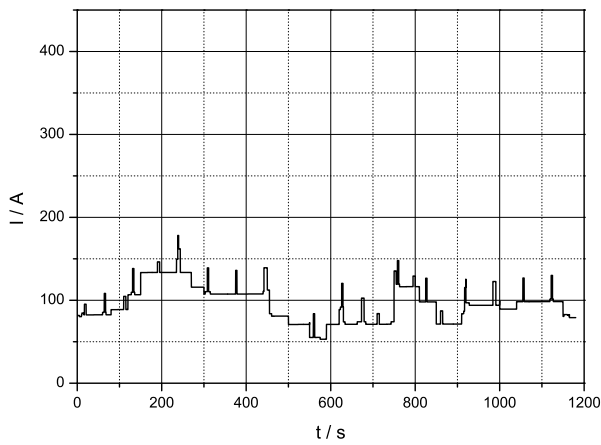


Abbildung A.19.: ST_Stadt

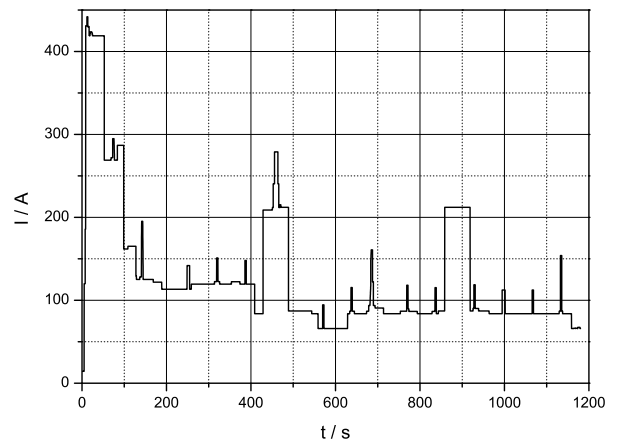


Abbildung A.20.: WN_Stadt

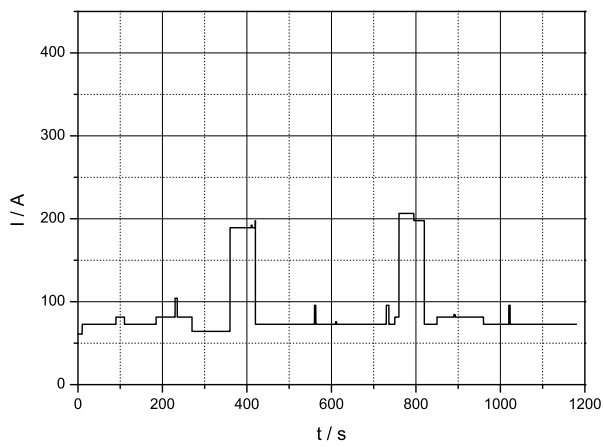


Abbildung A.21.: WT_Autobahn

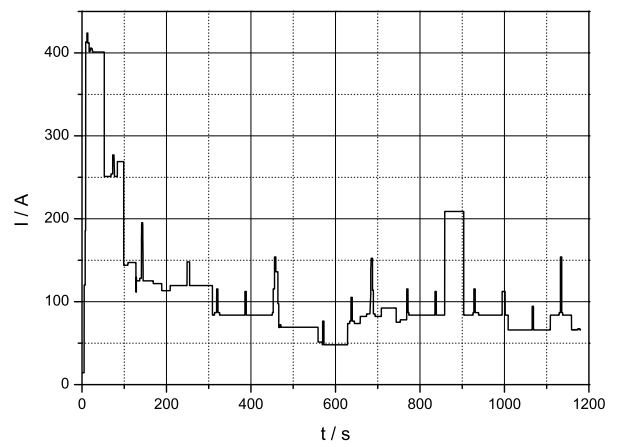


Abbildung A.22.: WT_Stadt

A.3. Fahrzeugdaten

Tabelle A.1.: Fahrzeugdaten - Teil 1

VW Lupo	1,0l
Getriebeübersetzung	
1. Gang	3,465 : 1
2. Gang	2,100 : 1
3. Gang	1,450 : 1
4. Gang	1,100 : 1
5. Gang	0,890 : 1
Achsgetriebeübersetzung	4,060 : 1
Radumfang	1,80m

VW Golf	1,8l
Getriebeübersetzung	
1. Gang	3,300 : 1
2. Gang	1,944 : 1
3. Gang	1,308 : 1
4. Gang	1,029 : 1
5. Gang	0,837 : 1
Achsgetriebeübersetzung	4,235 : 1
Radumfang	1,95m

VW Polo (<i>Diesel</i>)	1,9l
Getriebeübersetzung	
1. Gang	3,780 : 1
2. Gang	2,060 : 1
3. Gang	1,300 : 1
4. Gang	0,900 : 1
5. Gang	0,700 : 1
Achsgetriebeübersetzung	3,667 : 1
Radumfang	2,10m

VW Polo (<i>Otto</i>)	1,2l
Getriebeübersetzung	
1. Gang	3,460 : 1
2. Gang	1,960 : 1
3. Gang	1,390 : 1
4. Gang	1,030 : 1
5. Gang	0,850 : 1
Achsgetriebeübersetzung	3,667 : 1
Radumfang	2,10m

VW Touran (<i>Diesel</i>)	2,0l
Getriebeübersetzung	
1. Gang	3,460 : 1
2. Gang	2,050 : 1
3. Gang	1,300 : 1
4. Gang	0,900 : 1
5. Gang	0,710 : 1
Achsgetriebeübersetzung	3,667 : 1
Radumfang	2,10m

VW Touran (<i>Otto</i>)	1,6l
Getriebeübersetzung	
1. Gang	4,150 : 1
2. Gang	2,370 : 1
3. Gang	1,560 : 1
4. Gang	1,160 : 1
5. Gang	0,860 : 1
Achsgetriebeübersetzung	3,667 : 1
Radumfang	2,10m

A. Anhang

Tabelle A.2.: Fahrzeugdaten - Teil 2

VW Passat (<i>Diesel</i>)	1,9l
Getriebeübersetzung	
1. Gang	3,780 : 1
2. Gang	2,180 : 1
3. Gang	1,360 : 1
4. Gang	0,900 : 1
5. Gang	0,690 : 1
Achsgetriebeübersetzung	3,667 : 1
Radumfang	2,10m

VW Passat (<i>Otto</i>)	1,6l
Getriebeübersetzung	
1. Gang	3,500 : 1
2. Gang	2,120 : 1
3. Gang	1,300 : 1
4. Gang	0,940 : 1
5. Gang	0,790 : 1
Achsgetriebeübersetzung	3,44 : 1
Radumfang	2,10m

VW Phaeton	W12
Getriebeübersetzung	
1. Gang	3,455 : 1
2. Gang	1,944 : 1
3. Gang	1,444 : 1
4. Gang	1,129 : 1
5. Gang	0,894 : 1
Achsgetriebeübersetzung	3,667 : 1
Radumfang	2,10m

Persönliche Daten

Geburtsdatum:	09. April 1977
Geburtsort:	Wolfsburg
Schulbildung:	bis 1997 Abitur am Fachgymnasium Elektrotechnik in Wolfsburg mit den Leistungskursen Mathematik und Elektrotechnik
Zivildienst:	1997-1998 Zivildienst bei der Lebenshilfe Wolfsburg
Ausbildung:	1998-2001 Volkswagen AG Wolfsburg Ausbildung zum Energieelektroniker FR Betriebstechnik
Studium:	2001-2006 Studium der Elektrotechnik mit dem Hauptfach Leistungselektronik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Berufserfahrung:	2001 F+E Volkswagen AG Wolfsburg Motorelektrik für W-Motoren 2005-2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg Lehrstuhl für Leistungselektronik — Prof. Lindemann 2010-dato F+E Volkswagen AG Wolfsburg Ingenieur Abteilung für Hybridfahrzeuge