



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Paul Zühr

Modellierung eines Brennstoffzellen- Hybridsystems zur transienten Simulation von Fahrzyklen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Zusammenfassung

Paul Zühr

Titel der Masterthesis

Modellierung eines Brennstoffzellen-Hybridsystems zur transienten Simulation von Fahrzyklen

Stichworte

Brennstoffzelle, Traktionsbatterie, ECM-Modell, Hybridfahrzeug, Brennstoffzellenhybrid, elektrischen Antriebsstrang, Modellbildung, Simulation, Matlab, Simulink, Stateflow, Hybridstrategien, Betriebsstrategien, Hybridmodi, Fahrzyklen

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Simulationsmodells zur Abbildung eines Brennstoffzellen-Hybridfahrzeugs (PEM-Brennstoffzelle&Li-Ionen Batterie). Auf der Modellierung des elektrischen sowie thermodynamischen Verhaltens der elektrochemischen Komponenten liegt ein Schwerpunkt der Arbeit. Energiewandler und Speicher werden als serieller Hybridantriebsstrang in ein Fahrzeugmodell eingebettet. Es beinhaltet die wichtigsten Komponenten eines elektrischen Antriebsstrangs sowie ein Fahrwiderstandsmodell. Die Regelung erfolgt durch ein Fahrermodell. Zur effizienten Energiebereitstellung und Erfüllung der möglichen Hybridantriebsmodi wird eine Hybridstrategie implementiert, die situationsbedingt Entscheidungen über die auszuführende Energiebereitstellung trifft. Das erstellte Modell der Brennstoffzelle spiegelt qualitativ das zu erwartende Verhalten wieder. Für das Gesamtfahrzeug konnten in Fahrzyklen Wasserstoff-Verbrauchswerte ermittelt werden, die sich in ihrem Betrag plausibel gestalten. Das erarbeitete Simulationsmodell ist als Entwicklungswerkzeug zu verstehen. Es bietet die Möglichkeit verschiedene Regelungsstrategien sowie Managementsysteme zu implementieren und zu untersuchen. Weitere denkbare Anwendungsgebieten sind Parameterstudien zur Dimensionierung der beteiligten Komponenten, numerische Optimierungen der Hybridstrategie sowie vergleichende Studien dazu.

Paul Zühr

Title of the paper

Modelling of a Fuel cell Hybridsystem for the transient simulation of drive cycles

Keywords

Fuel cell, traction battery, ECM-Model, hybrid vehicle, fuel cell hybrid, electrical powertrain, modeling, simulation, Matlab, Simulink, Stateflow, hybridstrategys, operational strategy, hybridmode, drive cycles

Abstract

The present work deals with the development of a simulation model for the mapping a fuel cell hybrid vehicle (PEM fuel cell&Li-ion battery). One focus of the work is the modeling of the electrical and thermodynamic behavior of the electrochemical components. Energy converter and storage systems are embedded in a vehicle model with a serial hybrid drive train. It contains the most important components of an electric drive train as well as a driving resistance model. The regulation is carried out by a driver model. For the efficient supply of energy and the fulfillment of the possible hybrid modes, a hybrid strategy is implemented that makes decisions based on the situation regarding the energy supply path to be carried out. The generated model of the fuel cell qualitatively reflects the expected behavior. Hydrogen consumption values were determined for the vehicle in driving cycles, the amount of which is plausible. The simulation model developed is to be understood as a development tool. It offers the possibility of implementing and investigating various control strategies and management systems. Other conceivable areas of application are parameter studies for dimensioning the components involved, numerical optimizations of the hybrid strategy and comparative studies.



Aufgabenstellung

für das Projekt/ die Thesis

Ziel der Masterthesis ist die Entwicklung eines dynamischen Simulationsmodells für ein mobiles Brennstoffzellensystem (mobile Anwendung) bestehend aus Energiewandler und Energiespeicher. Die Simulationsumgebung ist Matlab/Simulink. Außerdem ist im Rahmen der Arbeit die Ausarbeitung einer Methodik zur Parametrisierung des Modells vorgesehen. Ausgehend von den zur Parametrisierung notwendigen Messungen sollen Anforderungen für einen zu entwickelnden skalierbaren Hybridprüfstand abgeleitet werden können. In einem ersten Schritt werden die erforderlichen Randbedingungen an das Modell abgeleitet und quantifiziert. Diese Randbedingungen orientieren sich an dynamischen Fahrzyklen, z.B. WLTC, FTP75:

- Freie Wahl der Betriebsstrategien
- Das Modell ist skalierbar hinsichtlich der Systemparameter (Leistung, Abmessungen von FC und Batterie, E-Maschinen (bzw. regelbare Last))
- das Modell berücksichtigt relevante dynamische Effekte der Einzelkomponenten

Die erforderlichen Systembestandteile sollen danach modular in einer geeigneten Systemarchitektur abgebildet werden können. Dazu werden dynamische thermische und elektrische Ersatzmodelle erstellt. Stoff- und Energieflüsse werden dabei durch die Ersatzmodelle bilanziert. Erforderliche Systemparameter werden benannt und Methoden zur Ableitung dieser Parameter entwickelt. Das Modell umfasst alle zum Betrieb des Fahrzeugs relevanten Baugruppen:

- Brennstoffzelle: PEM-FC (Niedertemperatur-Brennstoffzelle)
 - Gasversorgung
 - Strom, Spannung
 - Thermisches Verhalten
- Energiespeicher: Li-Ion Batterie
 - Ladezustand, elektrische Größen
 - Thermisches Verhalten
- Leistungselektronik (DC/DC, AC/DC, DC/AC)
- Regelung/ECU: Betriebsstrategie
- Powertrain Layout: serieller Hybrid, Range Extender
 - Elektromotor/Generator (Rekuperation der kinetischen Energie)

– Fahrwiderstände: Bremsen, Reifen, etc.

- Fahrer: Eine Regelung mittels Gaspedal und Bremse auf den angeforderten Fahrzustand aus dem Fahrzyklus

Das Modell kann gängige Betriebsmodi eines Hybridfahrzeuges abbilden:

- Stillstand
- Antrieb rein aus Batterie
- Antrieb rein aus FC
- Antrieb parallel aus Batterie und FC (Lastpunktverschiebung),
- Boost-Modus
- Rekuperation von kinetischer Energie

Das erstellte Modell ist zu verifizieren und die Ergebnisse sind schriftlich zu dokumentieren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelzeichen	VI
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Brennstoffzelle	3
2.2 Energiespeicher	10
2.3 Hybridfahrzeuge	14
2.4 Brennstoffzellenhybridfahrzeuge	19
3 Stand der Technik	21
4 Modell	23
4.1 Gesamtfahrzeug	23
4.2 Fahrer als Regler	25
4.3 Elektromotor/Generator	25
4.4 Antriebstrang	27
4.5 Brennstoffzellensystem	29
4.5.1 Elektrisches Verhalten	29
4.5.2 Wasserstoffversorgung	36
4.5.3 Ansaugtrakt der Reaktionsluft	38
4.5.4 Gasdiffusion - Partialdruckberechnung	48
4.5.5 Temperaturmodell	51
4.5.6 Dimensionierung der Brennstoffzelle	53
4.5.7 Betriebsweisen im Fahrzeug	54
4.6 Batteriemodell	55
4.7 Steuergerät ECU	60
4.7.1 Umsetzung Fahrerwunsch	60
4.7.2 Hybridstrategie	61
4.8 Leistungselektronik	68
5 Analyse und Potential des Modells	70
5.1 Brennstoffzelle (statisch, dynamisch)	70
5.2 Gesamtfahrzeug - Betriebsstrategie	74
6 Zusammenfassung	80
7 Ausblick	83
Literaturverzeichnis	85
Anhang	88

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Aufbau einer Brennstoffzelle und der ablaufenden Reaktionen	3
2.2	Strom-Spannungs-Kennlinie	5
2.3	Verlauf der Butler-Volmer-Gleichung für $\alpha = 0,5$ aufgeteilt nach Anoden-, Kathoden und Gesamtstrom	6
2.4	Tafel-Diagramm für $\alpha = 0,5$	7
2.5	Tafel-Diagramm für $\alpha = 0,2$ $0,5$ $0,9$	8
2.6	Veranschaulichung der Fick'schen Diffusion	9
2.7	Ionen und Elektroden beim Entladen einer galvanischen Zelle	11
2.8	Schematische Darstellung einer Lithium Ionen Batteriezelle im Entladebetrieb	12
2.9	Antriebslayouts von Hybridfahrzeugen bestehend aus VKM und Batterie als Hochvolt-speicher	16
2.10	Betriebsmodi eines Hybridfahrzeugs mit Verbrennungsmotor. Abbildung nach [Hof14]	18
2.11	Schematischer, vereinfachter Aufbau eines Brennstoffzellenhybridantriebsstrangs und der Richtung der möglichen Energieflüsse	19
3.1	Screenshot des Brennstoffzellenhybrid Layouts aus dem <i>ADVISOR</i> GUI	21
4.1	Der Fahrer als Regler für die Fahrzeuggeschwindigkeit	25
4.2	Leistungs- und Drehmomentkennfeld des BMW i3 Motors nach [Mer14]	26
4.3	Wirkungsgradkennfeld des BMW i3 Motors nach [Mer14]	27
4.4	Antriebsstrang	27
4.5	Zugkraftkennfeld	28
4.6	Komponenten eines Brennstoffzellensystems	29
4.7	Auf die Ausgangsspannung normierter Spannungsverlauf im kurzzeitdynamischen Bereich des im Rahmen von [EZ19] untersuchten Stacks	30
4.8	Auf die Ausgangsspannung normierter Spannungsverlauf im langzeitdynamischen Bereich des im Rahmen von [EZ19] untersuchten Stacks	31
4.9	Physikalisches ECM Modell nach [LD11]	32
4.10	reduziertes Physikalisches Ersatzschaltbild	33
4.11	Wasserstoffversorgung	36
4.12	Ansaugtrakt der Brennstoffzelle	39
4.13	Kennfeld des Allied Signal Kompressors nach [CLGA ⁺¹⁷]	40
4.14	Druckverhältnis in Abhängigkeit der Stromstärke	41
4.15	Wirkungsgradkennfeld des Allied Signal Kompressors nach [CLGA ⁺¹⁷]	42
4.16	Bilanzierungsgrößen der Kathode	46
4.17	Aufbau einer PEM-Zelle	49
4.18	Parametervariation zur Leistungsdimensionierung des Brennstoffzellenstacks	53
4.19	Nettoleistung des Brennstoffzellensystems für $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - MWC = 60\%$	54
4.20	Verlauf des elektrischen und Systemwirkungsgrades der Brennstoffzelle	55
4.21	Verwendetes Fünf-Parameter Ersatzschaltbild zur Simulation des elektrischen Verhaltens einer Li-Ion Batterie	56
4.22	Veranschaulichung der Batterie-Entladecharakteristik nach [Sch18]	56
4.23	Veranschaulichung er im <i>RC</i> -Element auftretenden Ströme und Spannungen [EZ19] . .	59
4.24	Screenshot der Hybridstrategie aus Stateflow	61
4.25	Veranschaulichung der Betriebsmodi und möglicher Übergänge	62
4.26	Visualisierung der Lastpunktverschiebung	66
4.27	Aufbau des Brennstoffzellenantriebs mit Leistungselektronik	69

5.1	Strom-Spannungskennlinie unter Variation der Temperatur mit $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - MWC = 60\%$	71
5.2	Strom-Spannungskennlinie unter Variation der Membranfeuchtigkeit mit $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - T_{FC} = 320\text{K}$	71
5.3	Spannungsantwort des Brennstoffzellensystems auf einen Stromsprung von 200A auf 100A für $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - MWC = 60\%$	72
5.4	Spannungsantwort des Brennstoffzellensystems auf verschiedene Stromsprünge für $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - MWC = 60\%$	73
5.5	Spannungsantwort des Brennstoffzellensystems auf einen Stromsprung mit $\Delta I = -50\text{A}$ für $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - MWC = 60\%$ und aktivem Temperaturmodell	73
5.6	Soll- und Ist-Geschwindigkeit im <i>WLTC</i>	75
5.7	Leistungsverteilung im <i>WLTC</i>	75
5.8	Wasserstoffverbrauch und Ladezustand im <i>WLTC</i> $SOC_{Start} = 70\%$	76
5.9	Wasserstoffverbrauch und Ladezustand im <i>NEFZ</i> $SOC_{Start} = 70\%$	76
5.10	Wahl der Betriebsarten der Hybridstrategie im <i>NEFZ</i> . $SOC_{Start} = 55\%$	77
5.11	Betriebsstrategie im Testzyklus 1/2 mit $SOC_{Start} = 55\%$	77
5.12	Betriebsstrategie im Testzyklus 2/2	78
8.1	Polarisationskurven unter Variation von Drücken und Temperaturen aus [Puk03]	88
8.2	Structure of the Matlab path	89
8.3	FCHEV Model first Layer	90
8.4	Screenshot der Hybridstrategie aus Stateflow	91

Tabellenverzeichnis

4.1	Eigenschaften des Brennstoffzellenfahrzeugs. Orientiert am <i>BMW i3</i>	24
4.2	empirische Konstanten Aktivierungswiderstand	33
4.3	empirische Konstanten Ohm'sche Überspannungen	34
4.4	empirische Konstanten Ohm'sche Überspannungen	35
4.5	Kenngrößen des Kompressormotors	43
4.6	empirische Konstanten Sättigungsdampfdruck	44
4.7	Bitmaske für den initialen Parkbetrieb	62
4.8	Bitmaske für den eDrive Battery Betriesmodus	63
4.9	Bitmaske für den eDrive Fuel Cell	64
4.10	Bitmaske für den Rekuperationsbetrieb	65
4.11	Bitmaske für die Lastpunktverschiebung	66
4.12	Bitmaske für die Lastpunktverschiebung im Stillstand	67
4.13	Bitmaske für den Boost Betriesmodus	67

Abkürzungs- und Indexverzeichnis

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AC	Wechselstrom (engl. alternating current)
Acc	Beschleunigung (engl. acceleration)
Br	Bremsung (engl. braking)
DC	Gleichstrom (engl. direct current)
ECM	elektrisches Ersatzschaltbild (engl. electrical equivalent circuit model)
ECP	Parameter eines ECM (engl. lectrical equivalent circuit parameters)
EMG	Elektromotor/Generator
FC	Brennstoffzelle (engl. fuel cell)
FCHEV	Brennstoffzellenhybridfahrzeug (engl. fuel cell hybrid electric vehicle)
GUI	Benutzeroberfläche (engl. graphical user interface)
Hum	Befeuchtung (engl. humidification)
LLK	Ladeluftkühler
LPV	Lastpunktverschiebung
MWC	Membran Wassergehalt (engl. membranewatercontent)
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
PEFC	Polymerelektrolytbrennstoffzelle (engl. polymerelectrolyte fuel cell)
PEM	Protonenaustauschmembran (engl. proton exchange membrane)
RDE	Emissionen im Fahrbetrieb (engl. real driving emissions)
RV	Radialverdichter
SL	Verlustmoment (engl. spin loss)
SOC	Ladezustand (engl. state of charge)
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WLTC	Fahrzyklus (engl. worldwide harmonized light vehicles test cycle)
WLTP	Testprozedur (engl. worldwide harmonized light vehicles test procedure)

Tiefgestellte Indizes

Indize	Bedeutung
0	Standardbedingungen
∞	Umgebung
a, An	Anode
Akt	Aktivierung
Br	Bremse
c, Ca	Kathode (engl. cathode)
cell	Zelle

comp	Kompressor (engl. compressor)
cor	korrigiert (engl. corrected)
dem	Anforderung (engl. demand)
el	elektrisch
env	Umgebung (engl. environment)
FC	Brennstoffzelle (engl. fuel cell)
i	Index, Spezies
in	Eingang (engl. input)
inj	injiziert (engl. injected)
irrev	irreversibel
l	flüssig (engl. liquid)
m	molar
max	maximal
min	minimal
N	Nernst
out	Ausgang (engl. output)
rek	Rekuperation
rev	reversibel
s	isentrop
sat	Sättigungszustand
Tr	Vortrieb (engl. traction)
veh	Fahrzeug (engl. vehicle)

Hochgestellte Indizes

Indize	Bedeutung
0	Standardbedingungen
channel	Ortsangabe: Strömungskanal
ch	Strömungskanal (engl. channel)

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Symbol	Beschreibung
A	Fläche
A	Stirnfläche
a	Aktivität
a	Beschleunigung
C	Wärmekapazität
c	Konzentration
c	Geschwindigkeit
c	spez. Wärmekapazität
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
D	Diffusionskoeffizient
d	Abstand
E	Energie
E	Spannung/Potential
F	Faradaykonstante, $F = 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$
F	Kraft
G	Getriebeübersetzung
G	Gibbs Enthalpie
g	Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
G_m	spez. molare Gibbs Enthalpie
H	Enthalpie
H	Hybridisierungsgrad
\dot{H}	Enthalpiestrom
h	spez. molare Enthalpie
H_u	unterer Heizwert
I	Stromstärke
i	Stromdichte
i_0	Austauschstromdichte
J	Trägheitsmoment
k	Wärmeübergangskoeffizient
l	Länge
M	Drehmoment
M	molare Masse
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
N	Anzahl
n	Drehzahl
n	Stoffmenge
\dot{n}	Stoffmengenstrom
P	Leistung
p	Druck
Q	el. Ladung
\dot{Q}	Wärmestrom

R	individuelle Gaskonstante
R	Widerstand
r	Radius
R_m	allg. Gaskonstante, $R_m = 8,3143 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$
RIF	Drehmassenfaktor
S	Entropie
T	Temperatur
t	Zeit
U	Spannung/Potential
w	Arbeit
x	Wassergehalt
z	Anzahl

Griechische Buchstaben

α	Ladungstransferkoeffizient
α	Winkel
Δ	Abweichung
δ	Länge
δ	Referenzdruck
ϵ	Emissionsgrad
η	Überspannung
η	Wirkungsgrad
Θ	Referenztemperatur
κ	Isentropenkoeffizient
λ	Feuchtigkeitsgehalt (Membran)
λ	Überschussfaktor
π	Druckverhältnis
π	Kreiszahl
ρ	Dichte
σ	Leitfähigkeit
σ	Stefan-Boltzmann Konstante, $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$
τ	Zeitkonstante
φ	rel. Feuchtigkeit
Ψ	Dissipation
ω	Winkelgeschwindigkeit

1 Einleitung

In Zeiten immer strenger werdender Abgasvorschriften und steigendem gesellschaftlichen Interesse an nachhaltigeren Fortbewegungsmitteln rücken elektrisch angetriebene Fahrzeuge immer mehr in der Vordergrund. Der Absatz dieser „E-Autos“ steigt seit Jahren stetig an und es bahnt sich der Abschied vom klassischen Verbrennungsmotor an. Als Energiespeicher von Elektroautos kommen aktuell überwiegend Lithium-Ionen Batterien zum Einsatz. Der Abbau der für diese Batterien benötigten Rohstoffe ist allerdings ähnlich kritisch zu betrachten wie die Förderung von fossilen Kraftstoffen. Die Energiespeicher können an öffentlichen Ladesäulen oder in der Garage des Besitzers aufgeladen werden. Der Strom dazu stammt aus dem Strommix des Anwenders. Da in Deutschland aktuell noch kein fossilfreier Strommix zur Verfügung steht, entstehen auch beim Betreiben von Elektroautos Emissionen. Zwar nicht im Betrieb des Fahrzeuges aber bei der Herstellung des zum Laden benötigten Stroms sowie der Herstellung des Fahrzeuges selbst. Eine Problematik bei Batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeugen ist die begrenzte Ladeleistung der Batterien, wodurch lange Ladezeiten entstehen, die den Betrieb weniger flexibler machen als ein einfacher Nachttankvorgang an der Tankstelle. An dieser Stelle kommen die Vorzüge von Brennstoffzellenhybridfahrzeugen zum Vorschein. Solche Fahrzeuge verfügen anstatt eines Verbrennungsmotors zur Energiewandlung über eine Brennstoffzelle. Für Fahrzeuganwendungen kommen vor allem Niedrig-Temperatur Brennstoffzellen zum Einsatz die mit Wasserstoff betrieben werden. Der Wasserstoff wird in Hochdrucktanks im Fahrzeug gespeichert wodurch sich der Tankvorgang ähnlich dem des Kraftstofftankens eines mit einem Verbrennungsmotor betriebenen PKW gestaltet. Der Wasserstoff wird von der Brennstoffzelle in Strom umgewandelt mit welchem der Elektromotor des Fahrzeuges angetrieben wird. Die dabei entstehenden Produkte sind lediglich Wasser und Wärme wodurch Brennstoffzellenfahrzeuge, genauso wie Batterie-elektrische, lokal emissionsfrei betrieben werden können. Die Herstellung von Wasserstoff kann sowohl nachhaltig wie auch fossil erfolgen. Da Brennstoffzellensysteme einer gewissen Trägheit unterliegen ist es sinnvoll sie mit einem Energiespeicher zu kombinieren um Lastspitzen abdecken zu können. Ein weiterer Vorteil ist, dass im Energiespeicher kinetische Energie beim Bremsvorgang gespeichert werden kann (Rekuperation). Aus diesen Gründen werden heutige Brennstoffzellenfahrzeuge in der Regel als Brennstoffzellenhybridfahrzeuge ausgelegt. Als Energiespeicher kommen auch hier Lithium-Ionen Batterien zum Einsatz. Diese können allerdings deutlich kleiner dimensioniert werden wie bei einem batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeug. Die Dimensionierung der Antriebskomponenten Brennstoffzelle und Traktionsbatterie ist ein wesentlicher Bestandteil in der Entwicklung solcher Fahrzeuge. Ebenso deren Zusammenwirken über eine Hybridbetriebsstrategie. Durch Betriebsstrategien wird die Entscheidung gefällt wie die Energie zum Antrieb bereitgestellt werden soll. Dazu können verschiedene Betriebsmodi ausgewählt werden, bei denen der Energiefluss aus den unterschiedlichen Energiequellen oder einer Kombination erfolgt. Das primäre Ziel einer Hybridbetriebsstrategie ist es diese Modi so zu wählen, dass der Kraftstoffverbrauch minimiert wird. Aktuell wird zur Durchführung solcher Entwicklungsarbeiten ein Prüfstandssystem an der HAW Hamburg entwickelt. Dieses modular geplante System soll über eine Brennstoffzelle und einen Energiespeicher verfügen. Die Auslegung des Systems ist dabei so angedacht, dass beide Komponenten individuell skaliert oder ausgetauscht werden können um verschiedene Dimensionierungen und deren Auswirkungen auf die Energieeffizienz oder Lebensdauer der Komponenten untersuchen zu können. Weiterhin sollen sie eine elektrische Last befriedigen können. In welchem Ausmaß, welche Komponente zur Erfüllung dieser Last beiträgt soll ebenfalls durch eine Hybridbetriebsstrategie entschieden werden können. Neben den genannten Komponenten des Energiewandlers und Energiespeichers spielen noch weitere Bestandteile eine Rolle. Beispielsweise die Leistungselektronik, die es ermöglicht durch Schaltungen die Energieflüsse aus den Komponenten aufzuteilen. Für nähere Information zum geplanten Prüfstand sei an dieser Stelle an den entsprechenden Fachbereich

der HAW Hamburg verwiesen. Da die Planung und der Aufbau solcher Prüfstandssysteme mit einem hohem zeitlichem und finanziellem Aufwand verbunden ist wird parallel zur physischen Entwicklung des Hybridsystems ein Simulationsmodell entwickelt, das über die gleichen Funktionen verfügt, wie der Prüfstand. Die Leistungsklasse des Simulationsmodells ist nicht wie der Prüfstand an Labormaßstäbe geknüpft weshalb es sich anbietet das Modell auf das Zielsystem eines Brennstoffzellenhybridfahrzeugs auszulegen. Dennoch soll es ebenso modular und skalierbar ausgestaltet werden, dass die Komponenten auch im Modell verschieden dimensioniert werden können. Es ist ebenfalls geplant das Simulationsmodell zu einem späteren Zeitpunkt auf das reale Prüfstandssystem parametrisieren zu können. Die Entwicklung dieses Simulationsmodells ist Gegenstand dieser Arbeit. Im Fokus der Entwicklung steht dabei die Abbildung relevanter physikalischer Effekte der beteiligten Komponenten, vor allem die der Brennstoffzelle. Es wird ein detailliertes Modell dieser erstellt, das auch dynamische und thermische Effekte berücksichtigt. Das Brennstoffzellenmodell wird gemeinsam mit einem ebenfalls für transiente Simulationen geeigneten Batteriemodell in eine Hybridfahrzeugarchitektur eingebettet und mit einer Hybridbetriebsstrategie verkettet. In den folgenden Kapiteln wird auf die zugrunde liegende Modellbildung eingegangen. Das Ergebnis der Arbeit ist ein Modell in Matlab und Simulink, das mit einer Basisbedatung ein Brennstoffzellenhybridfahrzeug abbilden kann. Dieses orientiert sich im Rahmen dieser Erstmodellierung an einem eigentlich batterie-elektrisch angetriebenem *BMW i3*, der durch ein Brennstoffzellensystem erweitert wurde. Mit dem Simulationsmodell wird ein Basiswerkzeug zur Durchführung numerischer Untersuchungen bereitgestellt.

2 Grundlagen

Nachfolgend werden die Grundlagen, welche zum Verständnis der Arbeit benötigt werden, erläutert. Es wird auf die Brennstoffzelle als Energiewandler eingegangen, mögliche Energiespeicher in Brennstoffzellenhybridsystemen werden vorgestellt und abschließend wird auf Hybridfahrzeugkonzepte eingegangen und ein Hybridlayout für das in Kapitel 4 vorgestellte System festgelegt.

2.1 Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle ist ein Energiewandler. Bei der Brennstoffzellenreaktion wird wie bei einer Verbrennung, chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Da, anders wie bei einer Verbrennungskraftmaschine, keine Wärmeenergie als Zwischenstufe (kalte Verbrennung) im Umwandlungsprozess vorhanden ist, unterliegt der Energieumwandlungsprozess der Brennstoffzelle nicht dem Carnot-Wirkungsgrad. Wärme ist lediglich ein Produkt der Umwandlungsreaktion, ebenso entstehendes Wasser. Brennstoffzellen lassen sich in Hoch- und Niedrigtemperatur Brennstoffzellen untergliedern. Weitere Kategorisierungen erfolgen anhand der an der Reaktion beteiligten Brennstoffe und nach dem Elektrolyt, dessen Material meist namensgebend ist. Für Fahrzeuganwendungen sind aus Sicherheitsaspekten Hochtemperatur Brennstoffzellen ungeeignet. In heutigen Brennstoffzellenfahrzeugen kommen im wesentlichen Polymerelektrolyt Brennstoffzellen (PEFC, engl. Polymerelectrolyte Fuel Cells) zum Einsatz. Sie bestehen aus einer Protonenaustauschmembran weshalb sie auch PEM-FC genannt werden (engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Als Brennstoff zur Verstromung kommt Wasserstoff H_2 zum Einsatz. Der Reaktionspartner ist Sauerstoff O_2 der in der Regel aus der umgebenden Luft stammt. In der nachfolgenden Abbildung ist der prinzipielle Aufbau einer PEMFC dargestellt:

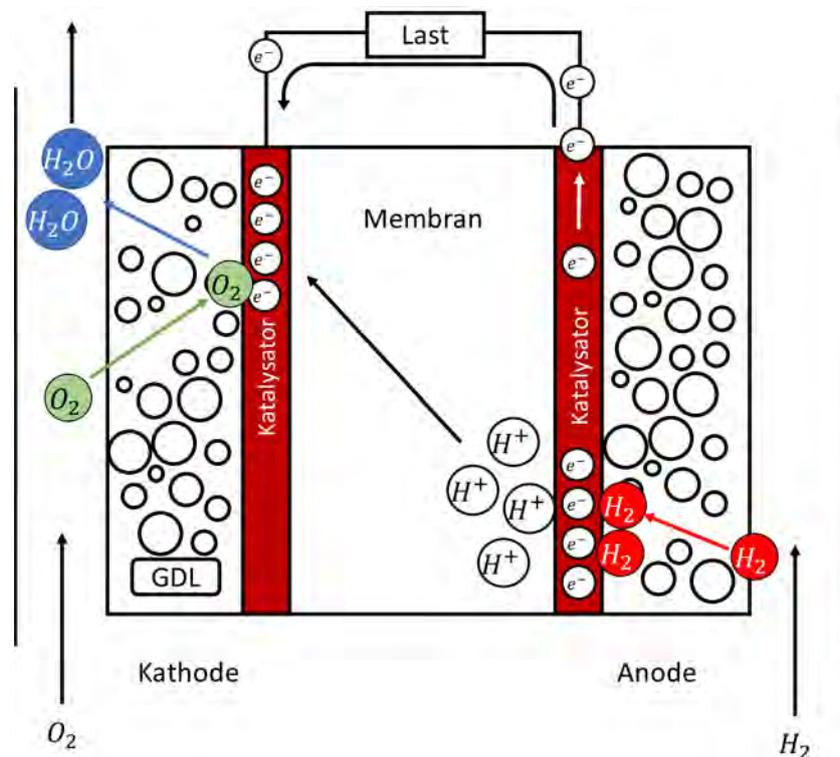


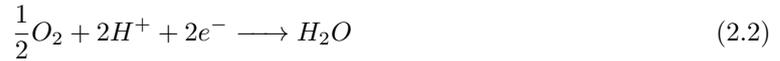
Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer Brennstoffzelle und der ablaufenden Reaktionen

Die Brennstoffzelle wird auf der Anodenseite mit dem Brennstoff, Wasserstoff, versorgt. An der Anode findet eine Oxidationsreaktion statt bei welcher der Wasserstoff, katalytisch begünstigt, in

Wasserstoffionen und Elektronen aufgespalten wird. Die ablaufende Reaktion folgt:



Die freien Wasserstoffionen können durch den Elektrolyten (feste Polymermembran) diffundieren. Der Polymerelektrolyt ist elektrisch isolierend, weshalb die Elektronen über den externen Stromkreis abfließen. An dessen Last kann durch den elektrischen Strom Arbeit verrichtet werden. An der Kathode reagiert der Sauerstoff mit den Wasserstoffionen und den Elektronen zu Wasser. Die ablaufende Reduktionsreaktion lautet:



Die vollständige ablaufende Redoxreaktion die in der PEM-Brennstoffzelle abläuft ist:



Die Spannung die durch die Redoxreaktion anliegt, wenn kein Strom abgenommen wird ist die reversible Zellspannung ΔE^0 . Die reversible Zellspannung ist die Potentialdifferenz der Elektroden $\Delta E^0 = E_{Kathode}^0 - E_{Anode}^0$. Es handelt sich bei der reversiblen Zellspannung um die verlustfreie Spannung, welche unter Standardbedingungen ($T = 25^\circ\text{C}$, $p = 101325\text{Pa}$) zwischen den Elektroden anliegt. Die Gleichung zur Berechnung dieses Standardpotentials ΔE^0 lautet:

$$\Delta E^0 = -\frac{\Delta G_m^0}{z * F} \quad (2.4)$$

Darin ist ΔG_m^0 die freie spezifische Gibbs Energie. Dabei handelt es sich um einen für verschiedene Reaktionen tabellierten Wert, der aussagt wie viel Energie zur Verrichtung von Arbeit zur Verfügung steht. z ist die Anzahl der Elektronen, welche bei der Umsetzung von einem Molekül des Brennstoffes durch den elektrischen Kreis fließen. Im Falle der Brennstoffzelle, welche mit reinem Wasserstoff und Sauerstoff betrieben wird beträgt $z = 2$. F ist die Faraday Konstante mit dem konstanten Wert $F = 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$. Liegen keine Standardbedingen vor kann durch die Nernst-Gleichung die Abweichung von diesen bestimmt werden. Dabei handelt es sich um eine Korrekturgleichung, welche das Standardpotential des Reaktionspaares (hier Sauerstoff und Wasserstoff) von Standardbedingungen auf die tatsächliche vorliegenden Bedingungen reduziert. Die allgemein gültige Form der Nernst-Gleichung für die Reaktion von $j\text{mol } J$ und $k\text{mol } K$ zu $m\text{mol } M$ nach: $jJ + kK \longrightarrow mM$ lautet:

$$\Delta G_m = \Delta G_m^0 - R_m * T_{cell} * \ln \frac{a_J^j * a_K^k}{a_M^m} \quad (2.5)$$

In Gleichung 2.5 ist a die Aktivität der jeweiligen Komponenten. Die Aktivität einer Komponente ist definiert als $a = \frac{p}{p_0}$ worin wiederum p der Partialdruck der jeweiligen Komponente und p_0 der Standarddruck ist. Um auf die Nernstspannung der Reaktion $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2O$ zu schließen ist die Nernstgleichung auf die Anoden und Kathodenreaktion aus den Gleichungen 2.1 und 2.2 anzuwenden. Die Aktivitäten lassen sich durch ihren Zusammenhang zu den Partialdrücken der Produkte und Edukte ausdrücken. Kombiniert man die Nernstgleichung zudem mit dem Zusammenhang aus Gleichung 2.4, lässt die Nernstspannung ΔE_N bestimmen. Nach Umformung und Anwendung logarithmischer Gesetze lässt sich die Nernstspannung, in Abhängigkeit der Zelltemperatur und der Partialdrücke der Edukte bestimmen:

$$\Delta E_N = \Delta E_0 - \frac{T_{cell} * R_m}{z * F} * \ln \frac{1}{p_{H_2} * \sqrt{p_{O_2}}} \quad (2.6)$$

In Abbildung 2.2 ist dieser Abfall der Zellspannung vom Standardpotential auf das Nernstpotential durch die Klemmspannungsverluste η_0 ersichtlich. Die Abbildung veranschaulicht die Strom-Spannungskennlinie, den Spannungsverlauf bei ansteigender Stromdichte i (Strom pro aktiver Elektrodenfläche [i] = $\frac{A}{cm^2}$), einer Brennstoffzelle.

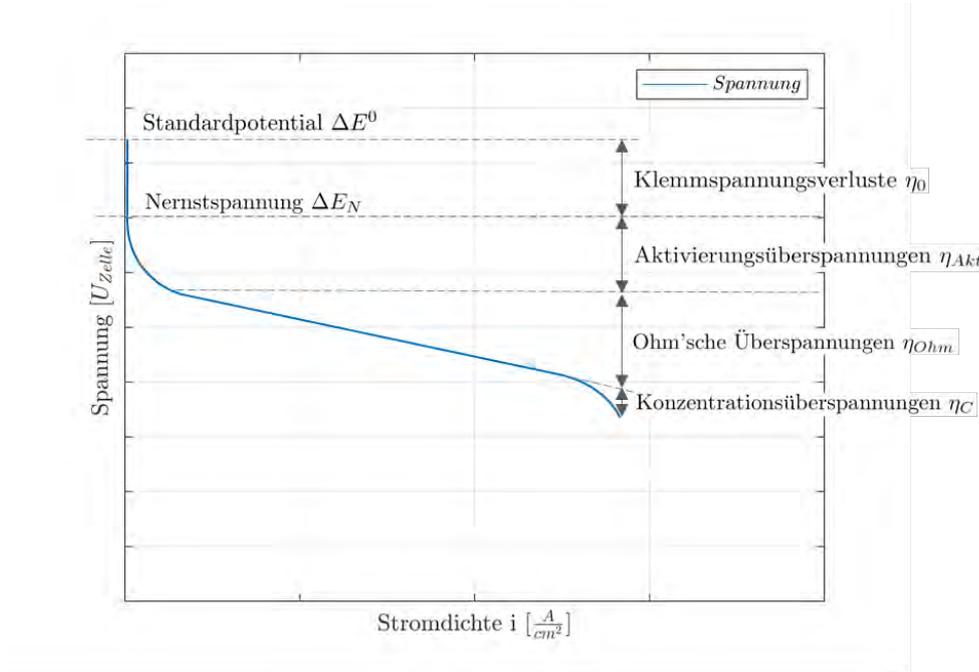


Abbildung 2.2: Strom-Spannungs-Kennlinie

Im Betrieb der Brennstoffzelle, unter Last, senkt sich das Zellpotential weiter ab. Mit steigendem Strom sinkt die Zellspannung entlang der abgebildeten Strom-Spannungs-Kennlinie ab. Die Brennstoffzellenkennlinie verläuft stets in einer charakteristischen Form, welche sich auf die Verlustspannungen oder auch Überspannungen (engl. Overvoltages) zurückführen lässt. Man unterscheidet zwischen Aktivierungs-, Ohmschen- und Konzentrationsüberspannungen.

In folgendem soll auf die einzelnen Überspannungen eingegangen werden. Im Sinne einer Modellbildung für ein Brennstoffzellensystem ist es wichtig diese Größen ausreichend genau mathematisch beschreiben zu können. Die hier vorgestellten Gleichungen beschreiben die zu Grunde liegenden physikalischen Effekte. Für das Brennstoffzellenmodell in Kapitel 4 kommen empirische Gleichungen zum Einsatz, die das hier beschriebene Verhalten abbilden und die Abhängigkeiten von Prozessparametern berücksichtigen.

Beginnend mit kleinen Stromstärken bzw. Stromdichten i überwiegen die Aktivierungsüberspannungen. Diese auch Ladungsdurchtrittshemmungen genannten Überspannungen beruhen auf der begrenzten Reaktionsgeschwindigkeit an den Oberflächen der Elektroden [DR18] [Sch18]. Aktivierungsüberspannungen treten grundsätzlich bei allen elektrochemischen Reaktionen auf. Eine übliche Beschreibung erfolgt anhand der Tafelgleichung, benannt nach Julius Tafel, der 1905 durch Versuche einen gleichbleibenden Zusammenhang zwischen der Überspannung und der Beschaffenheit der Elektroden für verschiedene elektrochemische Reaktionen feststellte. Bei der Tafelgleichung:

$$\eta_{Akt} = A * \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (2.7)$$

handelt es sich um eine Sonderform der Butler-Volmer-Gleichung. Für welche Bereiche die obenstehende Tafelgleichung gültig ist, lässt sich durch genauere Betrachtung der Butler-Volmer-Gleichung

feststellen. Diese lautet:

$$i = i_0 * \left[\exp\left(\frac{(1 - \alpha) * F * \eta_{Akt}}{R * T}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha * F * \eta_{Akt}}{R * T}\right) \right] \quad (2.8)$$

In Abbildung 2.3 ist der Verlauf der Butler-Volmer-Gleichung dargestellt. Für die dargestellte Reaktion liegt der so genannte Ladungstransferkoeffizient bei $\alpha = 0,5$. Dabei handelt es sich um einen Symmetriefaktor zwischen Anoden- und Kathodenstrom. Für Wasserstoffreaktionen liegt dieser für viele Elektrodenmaterialien bei 0,5 [DR18]. In Gleichung 2.8 ist die Austauschstromdichte i_0

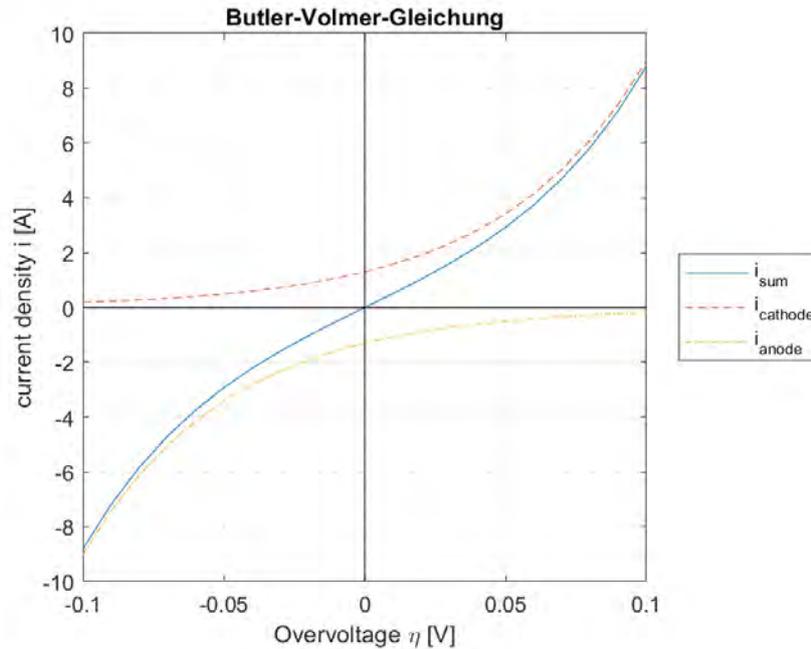


Abbildung 2.3: Verlauf der Butler-Volmer-Gleichung für $\alpha = 0,5$ aufgeteilt nach Anoden-, Kathoden und Gesamtstrom

maßgeblich für den resultierenden Strom verantwortlich. Eine Interpretation dieser Größe ist, dass es sich um die Stromdichte handelt, bei welcher keine Überspannungen vorliegen bzw. ab welcher sich Überspannungen ausbilden. Bei der Reaktion einer PEM-Brennstoffzelle handelt es sich um eine Gleichgewichtsreaktion. Das bedeutet, dass auch wenn kein Strom fließt, die Stromdichte $i = 0$ ist, trotzdem die Reaktion stattfindet. Allerdings gleichzeitig und ausgeglichen in beide Richtungen. Für die Kathodenreaktion gilt die Reaktionsgleichung: $\text{O}_2 + 4\text{e}^- + 4\text{H}^+ \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$ Diese Gleichgewichtsreaktion führt dazu, dass sich ständig Elektronen von und zum Elektrolyten bewegen. Bei diesem Elektronenfluss, handelt es sich um den Austauschstrom.

In der Butler-Volmer-Gleichung lassen sich die beiden exponentiellen Terme exakt den Elektroden der elektrochemischen Zelle zuordnen. Der in 2.8 linke exponentielle Term beschreibt den Anodenstrom, der rechte Term den Kathodenstrom. Beide Terme sind abhängig von der Aktivierungsüberspannung. In Abbildung 2.3 ist der Verlauf der Anoden- und Kathodenströme, sowie der resultierende Strom, welcher sich als Summe der Einzelströme ergibt dargestellt. Es wird deutlich, dass schon bei kleiner Variation der Überspannung einer der beiden Elektrodenströme überwiegt. Nur in einem kleinem Bereich um die Gleichgewichtslage ist der resultierende Strom überwiegend auf beiden Elektrodenreaktion basierend. Es lassen sich somit drei Bereiche definieren. Für größere, positive Überspannungen $\eta_{Akt} > 0,1$ dominiert der Kathodenstrom, für negative der Anodenstrom und um die Gleichgewichtslage der Mischzustand. Für diese Definitionsbereiche lässt sich 2.8 vereinfachen. Für

positive Überspannungen gilt:

$$i = i_0 * [\exp(\frac{(1 - \alpha) * F * \eta_{Akt}}{R * T})] \quad (2.9)$$

Analog gilt für negative Überspannungen:

$$i = i_0 * [-\exp(\frac{-\alpha * F * \eta_{Akt}}{R * T})] \quad (2.10)$$

und für den Bereich in dem sowohl Kathoden- wie auch Anodenreaktion relevant sind die unvereinfachte Form der Butler-Volmer-Gleichung wie in Gleichung 2.8. Die beiden vorgestellten Parameter α und i_0 können nicht direkt gemessen werden. Eine Möglichkeit sie dennoch zu bestimmen ist ihren Verlauf zu linearisieren. Auf Grund der exponentiellen Form ist dies durch eine Transformation in logarithmische Koordinaten möglich. Bei dieser Darstellung handelt es sich um die so genannten, Tafel-Diagramme. Mittels dieser Diagramme lassen sich die Austauschstromdichte sowie der Ladungstransferkoeffizient bestimmen. In Abbildung 2.4 ist das Tafeldiagramm für $\alpha = 0,5$ dargestellt.

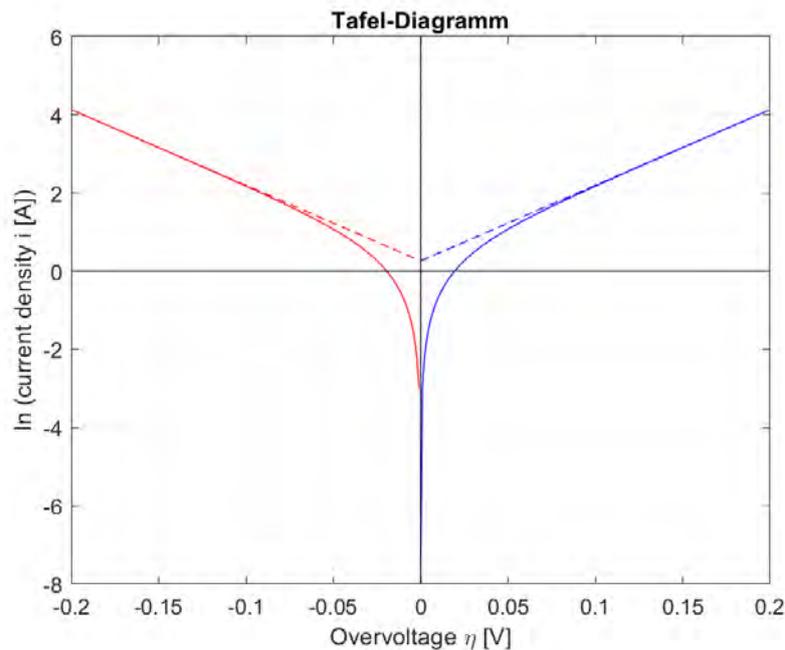
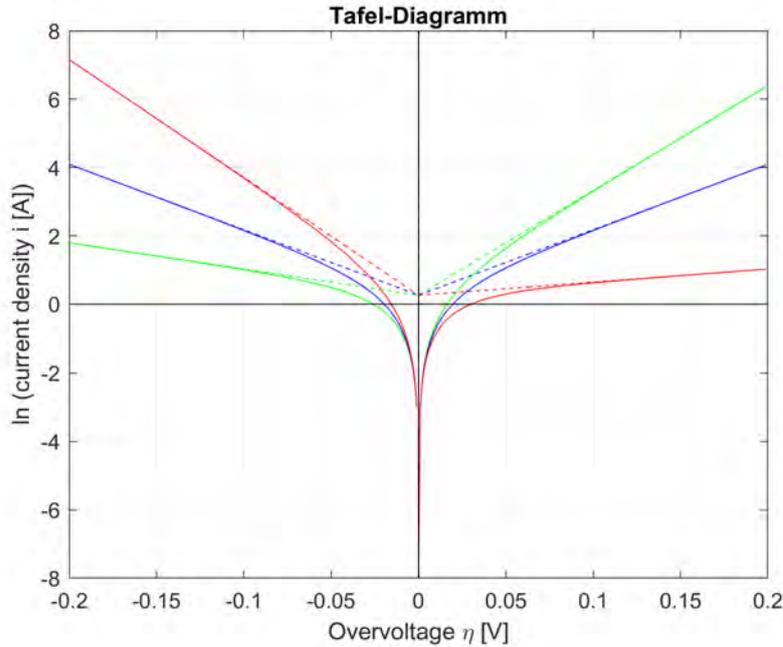


Abbildung 2.4: Tafel-Diagramm für $\alpha = 0,5$

Um den Einfluss des Ladungsübergangskoeffizienten zu verdeutlichen ist nachstehend nochmals der Verlauf des Tafeldiagramms, jedoch für verschiedene α dargestellt. Eine Variation von α führt demnach zu einer Verschiebung des Gleichgewichts von dominierenden Oxidations- zu Reduktionsströmen. In einem Tafel-Diagramm lässt sich α als Gradient des linearen Bereichs beschreiben und ebenso ermitteln. An dieser Stelle wird nicht weiter auf der Ladungsübergangskoeffizienten eingegangen, da er wie bereits erwähnt für PEM Brennstoffzellen im Bereich $\alpha = 0,5$ liegt und er auch insgesamt einen verhältnismäßig geringen Einfluss auf die Überspannungen hat [DR18].

Was man in Abbildung 2.5 erkennen kann ist, dass sich der Schnittpunkt der linearisierten Kurven nicht ändert. Durch Ablesen des Schnittpunktes mit der Ordinate erhält man die Austauschstromdichte i_0 .

Das beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Koeffizienten α und der Austauschstromdichte i_0 kann dazu verwendet werden diese Größen aus Messdaten abzuschätzen. Es sei jedoch erwähnt,

Abbildung 2.5: Tafel-Diagramm für $\alpha = 0, 2, 0, 5, 0, 9$

dass die Größen weiteren Einflüssen wie zum Beispiel der Temperatur oder der Konzentration der Komponenten (bzw. Partialdrücke von Sauerstoff und Wasserstoff) unterliegen. Diese Abhängigkeiten machen die experimentelle Bestimmung sehr aufwendig und erfordern viele Messreihen um aussagekräftige Kennfelder der Größen zu erzeugen.

Die Tafel-Gleichung 2.7 gilt folglich nur für den Bereich in welchem der linearisierte Verlauf der Butler-Volmer-Gleichung im Tafel-Diagramm dem Kurvenverlauf entspricht. Also bei Überspannungen, welche ungefähr im Bereich $|\eta_{Akt}| > 0,1\text{V}$ liegen. Man erhält die Tafel Gleichung aus Umformung der in 2.10 und 2.9 vorgestellten Vereinfachungen der Butler-Volmer-Gleichung und Zusammenfassung der konstanten Faktoren.

Auf den Bereich der Aktivierungsüberspannungen folgt der lineare Arbeitsbereich der Brennstoffzelle. In diesem Bereich überwiegen die Ohm'schen Überspannungen, welche sich durch eine lineare Proportionalität zur Stromdichte kennzeichnen. Der Verlauf folgt dem Ohm'schen Gesetz und wird hervorgerufen durch die begrenzte Protonenleitfähigkeit des Elektrolyten sowie elektrischen Widerständen der Elektroden. Es gilt das Ohm'sche Gesetz: $V_{Ohm} = I * R_{Ohm}$. Der Ohm'sche Widerstand wird durch Faktoren wie der Leitfähigkeit des Elektrolyten beeinflusst, welche wiederum von der Membranfeuchtigkeit und somit auch der Temperatur abhängt. Die Bestimmung des Ohm'schen Widerstandes für eine Variation dieser Parameter erfordert ausführliche Messreihen.

Mit immer weiter ansteigender Stromdichte endet der lineare Bereich der Kennlinie und es treten Stofftransportverluste auf, welche ein stark nicht-lineares Abfallen der Kennlinie verursachen. In diesem Bereich werden die Reaktanden schneller umgesetzt als sie an die Reaktionsfläche nachdiffundieren können infolgedessen bricht die Spannung ein. Der Transport von Reaktionsgasen durch die porösen Elektroden kann durch die Fick'sche Diffusionsregel beschrieben werden und ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Geht man davon aus, dass der Konzentrationsverlauf innerhalb der Diffusionsschicht linear verläuft so erhält man:

$$\frac{dn}{dt} = -D * A * \frac{c_j - c}{\delta} \quad (2.11)$$

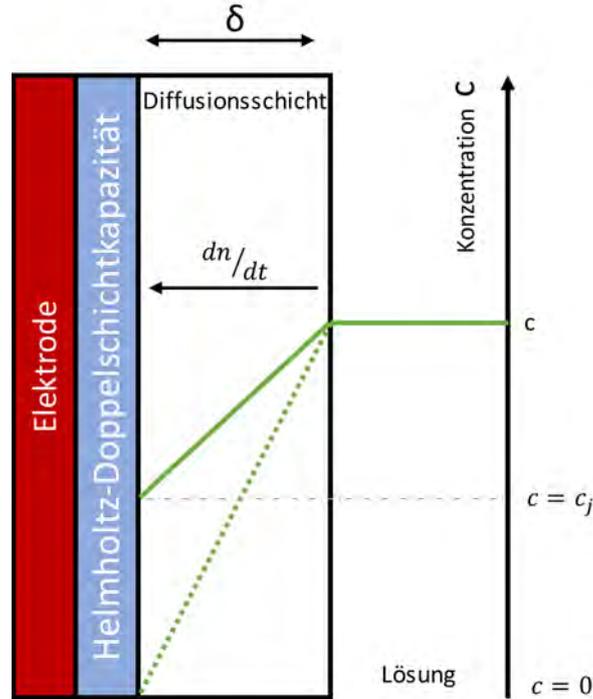


Abbildung 2.6: Veranschaulichung der Fick'schen Diffusion

In Gleichung 2.11 ist c die Konzentration im Strömungskanal, also außerhalb der Diffusionsschicht, c_j die Konzentration an der Reaktionsfläche und δ die Länge der Diffusionsschicht. Weiterhin ist D der Diffusionskoeffizient und A die aktive Zelloberfläche. Nach dem Faradayschen Gesetz gilt für einen Strom I der Zusammenhang $I = z * F * \frac{dn}{dt}$ bzw. für die Stromdichte $i = \frac{I}{A} = \frac{z * F}{A} * \frac{dn}{dt}$ und in Kombination ergibt sich dadurch die Stromdichte in Abhängigkeit der Konzentration zu:

$$i = z * F * D * \frac{c - c_j}{\delta} \quad (2.12)$$

Es lässt sich für Brennstoffzellen eine theoretische maximale Stromdichte vorstellen bei welcher jegliche an der Reaktionsfläche vorhandenen Reaktanten umgesetzt werden. In diesem Fall ist die Konzentration an dieser Stelle $c_j = 0$ und die maximale Stromdichte liegt bei:

$$i_{max} = z * F * D * \frac{c}{\delta} \quad (2.13)$$

Umformen und Einsetzen der Gleichungen 2.12 und 2.13 liefert ein Verhältnis zwischen der Konzentration im Strömungskanal zur Konzentration an der Reaktionsfläche:

$$\frac{c_j}{c} = 1 - \frac{i}{i_{max}} \quad (2.14)$$

Die zugehörige Spannung lässt sich durch die konzentrationsabhängige Nernst-Gleichung (Gleichung 2.6 ist die Nernst-Gleichung in Abhängigkeit der Partialdrücke) bestimmen, diese lautet für eine Referenzkonzentration von $c_0 = 1 \text{ mol/l}$ und ohne Stromfluss ($i = 0$):

$$\Delta E_{N,i=0} = \Delta E_0 - \frac{T_{cell} * R_m}{z * F} * \ln \frac{c}{c_0} \quad (2.15)$$

Fließt ein elektrischer Strom, wird der Reaktand umgesetzt und die Konzentration ist nicht mehr

unverändert. Bei Stromfluss gilt die Nernst-Gleichung in dieser Form zu:

$$\Delta E_{N,i \neq 0} = \Delta E_0 - \frac{T_{cell} * R_m}{z * F} * \ln \frac{c_j}{c_0} \quad (2.16)$$

Der Spannungsverlust durch die Änderung der Konzentration ergibt sich aus der Differenz der Spannungen aus 2.15 und 2.16. Ersetzt man weiterhin das Konzentrationsverhältnis nach Gleichung 2.14 so erhält man für die Konzentrationsüberspannungen:

$$V_{conc} = \frac{T_{cell} * R_m}{z * F} * \ln \frac{c_j}{c} = \frac{T_{cell} * R_m}{z * F} * \ln \left(1 - \frac{i}{i_{max}}\right) \quad (2.17)$$

Die erläuterten Überspannungen reduzieren die Spannung der Brennstoffzelle. Abhängig von der Stromstärke mehr oder weniger. Neben den Überspannungen sei an dieser Stelle noch der Effekt der sich ausbildenden Doppelschichtkapazität erwähnt. Es handelt sich dabei um die physikalische Ausbildung eines Kondensators durch das Vorhandensein von Partikeln unterschiedlicher Polarisaton. Diese Helmholtz-Doppelschichtkapazität bildet sich zwischen Elektrode und Elektrolyt aus, der Stelle an welcher die Partikel mit unterschiedlicher Polarisaton zusammenfinden. Die Ausbildung dieser Kapazität hat vor allem Einfluss auf das dynamische Verhalten der Brennstoffzelle und wird im Rahmen der Modellbildung ebenfalls berücksichtigt. Die Helmholtz-Doppelschichtkapazität führt zu einem Zeitverhalten des Strom-Spannungsverhaltens und wirkt sich vor allem auf die Ausbildung der Aktivierungsüberspannungen aus. Modell-technisch kann der Effekt durch das Zeitverhalten eines RC-Elements berücksichtigt werden.

2.2 Energiespeicher

Automobilhersteller setzten unterschiedlichste Energiespeicher in ihren Hybridfahrzeugen ein. Sie alle Verfolgen das Ziel überschüssige Energie zwischenzuspeichern und sie bei Bedarf wieder bereitzustellen. Die Klassifizierung der Energiespeicherung lässt sich anhand der gespeicherten Energieform vornehmen. Für Fahrzeuganwendungen sind vor allem chemische, elektrische und mechanische Energiespeicher relevant. Druckspeicher und Wärmespeicher bilden eher Nischenanwendungen.

Auch wenn sich in jüngster Zeit zeichnet ein Trend in Richtung Lithium-Ionen Batterien abzeichnet sind andere Speichertechnologien trotzdem Interessant und sind auch weiter Entwicklungsgegenstand vieler OEMs. Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über Speichertechnologien wie sie in aktuellen Hybridfahrzeugen eingesetzt werden.

elektrische Energiespeicher

Elektrische Energiespeicher lassen sich weiter Klassifizieren. Für Fahrzeuganwendungen haben sie jedoch alle gemeinsam, dass es sich um reversible Energiespeicherprozesse (Wiederaufladen möglich) handelt. Zu den elektrischen Energiespeichern gehören elektrochemische Speicher deren Vertreter vor allem Batterien oder Akkumulatoren sind, induktive Speicher sowie elektrostatische Speicher.

elektrochemische Speicher - Sekundärzellen

Bei Traktionsbatterien für Fahrzeuganwendungen handelt es sich um miteinander verschaltete (parallel und seriell) galvanische Zellen in welchen reversible Energie Ein- und Ausspeicherungsprozesse stattfinden. Aufgrund der Reversibilität handelt es sich um Sekundärelemente. Bei diesen Prozessen laufen chemische Reaktionen ab, genauer Redoxreaktionen. Dabei finden gleichzeitig Reduktionsreaktion an einer Elektrode der galvanischen Zelle und Oxidationsreaktionen an der anderen statt. Der Aufbau einer galvanischen Zelle ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Galvanische Zellen bestehen aus einem Elek-

trodenpaar unterschiedlicher Metalle. Die Auswahl der Elektrodenmaterialien ist ausschlaggebend für die zu erreichende Zellspannung. Aus der elektrochemischen Spannungsreihe können diese Potentiale einzelner Metalle entnommen werden. Durch die Differenz der Potentiale der Elektrodenpaarung ergibt sich das Zellpotential. Die Elektroden befinden sich in einem Elektrolyten, der Ionenleitend ist. Zudem sind die beiden Halbzellen durch eine Membran elektrisch voneinander getrennt. Diese Membran ist undurchlässig für Elektronen und durchlässig für Ionen die, abhängig von Lade- oder Entladebetrieb, ihre Richtung umkehren.

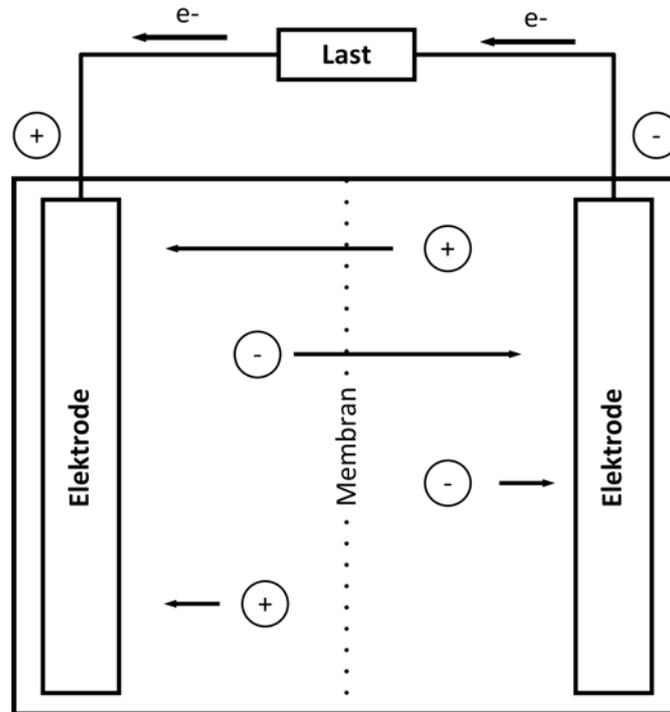


Abbildung 2.7: Ionen und Elektroden beim Entladen einer galvanischen Zelle

Die Ionen und Elektronenbewegung sind in Abbildung 2.7 für einen Entladevorgang dargestellt. Während dieses Entladevorgangs fließen die Elektronen von der negativen zur positiven Elektrode und verrichten dabei Arbeit. Das nachfließen von Elektronen wird durch das Auflösen des Elektrodenmaterials sichergestellt (Oxidationsreaktion). Die freien positiven Ionen werden durch die zur positiven Elektrode fließenden Elektroden reduziert. Beim Anlegen einer Gleichspannung lässt sich dieser Prozess umkehren. Der Elektronen bzw. Ionenfluss erfolgt dann in die jeweils andere Richtung. Batterien unterliegen wie alle Energiewandler und Speicher Verlusten. Durch Innenwiderstände entsteht Wärme, es entstehen Ladungsverluste durch Gasungen und die Batterie unterliegt Selbstentladungsprozessen [Hof14]. Dem Entstehen von Wärme muss durch ein Batteriemanagementsystem entgegengewirkt werden um die Verluste einzugrenzen und Zellschädigungen zu vermeiden. Einzelne Batteriezellen werden seriell und parallel miteinander verschalten um sie den Leistungsanforderungen entsprechend auszuliegen. Aktuelle Trends in der Automobilindustrie deuten darauf hin, dass sich zunächst Li-Ionen Batterien als Traktionsbatterien für elektrifizierte Antriebskonzepte durchsetzen werden. Aus diesem Grund wird die Funktionsweise dieser Energiespeicher nachfolgend beschrieben.

Lithium-Ionen Batterien

Lithium ist das Element, das in der elektrochemischen Spannungsreihe das negativste Elektrodenpotential ($E_0 = -3.04V$) aufweist und ist dazu auch das leichteste Element im festen Zustand. Neben

diesen Eigenschaften ist der größte Vorteil von Lithium-Ionen Batterien ist, dass keine Zersetzungsreaktionen der Elektroden stattfinden. Anstatt das Elektrodenmaterial zu zersetzen werden die Li-Ionen durch die ablaufende Redoxreaktion eingelagert (Interkalation). Dies geschieht an einer Elektrode über eine Metalloxid oder Metallphosphatstruktur, die in der Lage ist Li-Ionen in ihrem Kristallgitter einzulagern. Für diese Strukturen werden beispielsweise Verbindungen wie $LiMO_2$, LiM_2O_4 , $LiCoO_2$ oder $LiFePO_4$ eingesetzt. Die andere Elektrode verfügt über eine Graphit Kristallstruktur, welche ebenfalls in der Lage ist, Li-Ionen einzulagern. Durch die ausbleibende Zersetzung der Elektroden bleibt die Struktur vorhanden, wodurch viele Lade- und Entladezyklen realisiert werden können. In Abbildung 2.8 ist der Prinzipielle Aufbau einer Lithium-Ionenzelle veranschaulicht. Der Separator ist auch bei einer Li-Ionen Batterie für die elektrische Trennung der Elektroden verantwortlich und er ist durchlässig für die Li-Ionen. Im Elektrolyt sind Li-Ionen leitende Salze gelöst um den Ionentransport zu gewährleisten. Es werden aber auch Polymerelektrolyte verwendet.

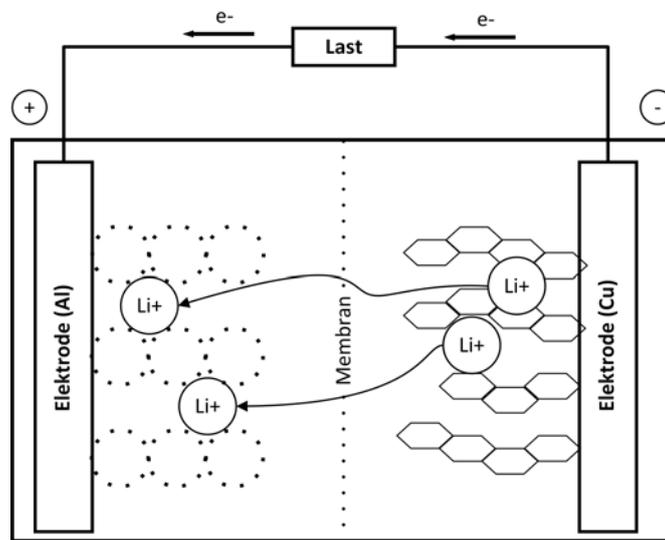


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung einer Lithium Ionen Batteriezelle im Entladebetrieb

Wie es in Abbildung 2.8 zu erkennen ist verfügen die bereits genannten Aktivmaterialien über eine Gitterstruktur, was zu einer Oberflächenvergrößerung führt. Durch eine große Oberfläche können hohe Reaktionsraten realisiert werden, weshalb die Ausführungen der Elektrodenaktivmaterialien ständiger Weiterentwicklung der Batteriehersteller unterliegen. Die Gitterstrukturen der Aktivmaterialien sind auf Stromabnehmern aufgebracht die aus Kupfer (negative Elektrode) bzw. Aluminium (positive Elektrode) bestehen.

Beim Entladen der Batterie werden die im Graphitgitter eingelagerten Li-Ionen ausgelöst. Dabei werden Elektronen freigesetzt (Oxidationsreaktion), die durch den Stromkollektor aus Kupfer abfließen. Durch den entstehenden Stromfluss kann Arbeit verrichtet werden. Gleichzeitig werden die durch die Oxidation freigesetzten Li-Ionen im Elektrolyten gelöst. Sie fließen durch die Membran zum Metalloxid wo sie durch die dort überschüssigen Elektronen reduziert und in der Metalloxidstruktur eingespeichert werden (Reduktionsreaktion). Dieser Entladevorgang wird in 2.8 dargestellt. Wird die Batterie geladen kehren sich die genannten Reaktion um. Bei von außen angelegter Spannung werden die Li-Ionen wieder aus dem Metalloxid gelöst und diffundieren durch die Membran zur Graphit Struktur, an welcher nun die Reduktionsreaktion mit den Elektronen stattfindet. [Kor13] [Sch18] [Hof14]. In Kapitel 4.6 wird auf die Umsetzung einer Lithium Ionen Batterie im Rahmen dieser Simulationsarbeit eingegangen.

Superkondensatoren

Superkondensator (engl. Supercaps oder Ultracaps) lassen sich den elektrostatischen Energiespeichern zuordnen. Für Fahrzeuganwendungen sind in erster Linie moderne Doppelschichtkondensatoren von Bedeutung. Solche Kondensatoren nutzen den Helmholtz'schen Effekt, welcher besagt, dass sich bei Anlegen einer Spannung an zwei sich in elektrolytischer Flüssigkeit befindlichen Elektroden eine Doppelschicht ausbildet. Im ungeladenen Zustand sind im Elektrolyten die Ionen gleichmäßig verteilt. Wird nun eine Spannung angelegt orientieren sich die positiv geladenen Ionen zur negativen Elektroden und umgekehrt. Durch diese Neuorientierung (Polarisation) wird die Energie im Kondensator, ohne das Abfließen von chemischen Reaktionen, elektrostatisch gespeichert. Superkondensatoren werden in Hybrid-Fahrzeuganwendungen vor allem zur Abdeckung von kurzzeitigen hohen Lastspitzen genutzt. Durch ihre geringen Innenwiderstände können sie sehr hohe Ladeströme umsetzen weshalb sie besonders gut für solche hochdynamischen Lastspitzen eignen. Damit besitzen Sie eine sehr hohe Leistungsdichte und haben im Vergleich zu Batterien sehr hohe zyklische Lebensdauern von bis zu 10 Mio. Ladezyklen. Im Vergleich zu Batterien verfügen Sie jedoch über wesentlich geringere Energiedichten. Ihnen wird aktuell noch hohes Weiterentwicklungspotential zugesprochen. Trotzdem stellen Sie für Hybridfahrzeuge keine Alternativen zur Traktionsbatterie dar. Sie können durch ihre hochdynamischen Eigenschaften aber eine sehr effiziente Ergänzung in einem Hybridsystem darstellen. [Axe18][Hof14] In aktuellen Forschungsberichten kommen Superkondensatoren auch im Zusammenhang mit Brennstoffzellenhybridsystemen zur Ergänzung von Brennstoffzelle und Traktionsbatterie vor.

Mechanische Energiespeicher - Schwungradspeicher

Schwungradspeicher eignen sich wie Superkondensatoren nicht zur langfristigen Speicherung von Energie. Das Prinzip des Schwungrades beruht auf der Speicherung kinetischer Energie durch das Trägheitsmoment einer sich drehenden Masse, oft einer Scheibe. Die rotierende Masse wird im Falle von Energieüberschuss durch einen Elektromotor angetrieben und erhöht dadurch ihre Drehzahl. Bei Energiebedarf treibt die Scheibe den Elektromotor im generatorischen Betrieb an und gibt so Leistung ab die dem Antriebstrang zur Verfügung gestellt werden kann. Die speicherbare Energie berechnet sich in Abhängigkeit des Trägheitsmoments und der Drehzahl wie in Gleichung 2.18:

$$E = \frac{1}{2} * J * (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad (2.18)$$

Die speicherbare Energiemenge ist folglich linear vom Trägheitsmoment des Schwungrades und quadratisch von der Drehzahl abhängig. Aus diesem Grund liegt ein Fokus auf der Hochdrehzahlauslegung aller Komponenten. Schwungradspeicher liegen im Ragone-Diagramm, was Energie- und Leistungsdichte betrifft zwischen Superkondensatoren und Batterien. Um Verluste durch Reibung zu vermeiden werden zudem effiziente Lagerkonzepte angewendet und das Schwungrad evakuiert um die Reibung mit der Luft zu reduzieren. Die Hohe Drehzahl führt zu besonderen Sicherheitsanforderung. Im Schadensfall muss das Gehäuse die sich mit bis zu $60000 \frac{1}{min}$ drehende Schwungrad aufhalten können. Auf Grund dieses Aspektes haben sich Schwungräder nicht vollständig durchgesetzt obwohl sie Kraftstoffeinsparungen von 10% im NEFZ (Neuer europäischer Fahrzyklus) [Hof14] bei geringem Gewicht von 6kg (Werte für das Volvo KERS System) erreichen können. Bislang bleiben sie damit Nischenanwendung die oft im Rennsport oder Konzeptfahrzeugen Anwendung finden.

chemische Energiespeicher

Chemische Energiespeicher werden neben ihrem Aggregatzustand (gasförmig oder flüssig) oft nach ihrem Herstellungspfad unterschieden. Man unterscheidet fossile und regenerativ hergestellte Kraftstoffe.

Zu den fossilen gehören klassische Kraftstoffe aus Raffinerieprozessen wie Benzin oder Diesel, sowie synthetisch hergestellte Kraftstoffe aus Erdgas und Kohle. Andere synthetische Kraftstoffe können regenerativ aus Biomasse gewonnen werden. Zur Synthese eingesetzte Prozesse sind beispielsweise Vergärungen, Fischer-Tropsch-Synthese oder Hydrierungen und Veresterungen. Wasserstoff kann sowohl konventionell über das Synthetisieren aus Erdgas oder Kohle wie auch regenerativ gewonnen werden. Die weitaus nachhaltigste Herstellung von Wasserstoff erfolgt über die Elektrolyse, welche mit regenerativ erzeugtem Strom aus Wasser-, Wind- oder Sonnenenergie betrieben wird. Als problematisch stellt sich bei dieser Erzeugung die lange Wirkungsgradkette von der Energieerzeugung bis zum Wasserstoffspeicher im Fahrzeug heraus.

Wasserstoff lässt sich in Brennstoffzellen verstromen oder auch in modifizierten Kolbenmaschinen verbrennen. In beiden Fällen stellt die Speicherung ein Problem beim Einsatz in Kraftfahrzeugen dar. Wasserstoff verfügt über eine sehr geringe volumetrische Energiedichte, weshalb er entweder unter hohem Druck (bis 700bar) oder verflüssigt (kryogene Speicherung) gespeichert werden muss. Eine weitere Variante ist das stoffliche Speichern bei dem Festkörper oder Flüssigkeiten mit Wasserstoff beladen werden. In automobilen Anwendung hat sich bisher die Druckspeicherung durchgesetzt. Zwar verfügt Wasserstoff über die angesprochene geringe volumetrische Energiedichte zugleich verfügt er jedoch auch über eine hohe gravimetrische Energiedichte. Für eine Reichweite von 500 km werden abhängig der Fahrweise 4 – 6 kg H_2 benötigt. Bei einer Verdichtung dieser Wasserstoffmasse auf 700bar liegt das notwendige Tankvolumen immer noch bei 100 – 150l [Axe18]. Der Hohe Raumbedarf und die notwendige Druckstabilität führen zu einem hohen Gewicht des Druckspeichers. Außerdem stellt die Speicherung auch hohe werkstofftechnische Anforderungen da Wasserstoff dazu neigt in metallische Oberflächen zu diffundieren und dabei zu Materialversprödungen zu führen. [Axe18][Hof14][EK08]

2.3 Hybridfahrzeuge

Hybridfahrzeuge besitzen Antriebsstränge, die sich nicht aus einer alleinigen Energiequelle gespeist werden. Sie verfügen über mindestens zwei Energiewandler oder Energiespeicher, die gemeinsam für den Antrieb des Fahrzeugs verantwortlich sind. Dabei können Sie unterschiedlich auf diesen Einwirkung. Aktuell haben sich Hybridkonzepte bestehend aus Verbrennungskraftmaschine (VKM), Energiespeicher und Elektromotor/Generator (EMG) durchgesetzt. Denkbar sind jedoch auch andere Kombination wie Gasturbine-Elektromotor oder auch Brennstoffzelle-Elektromotor. Das primäre Einsatzziel von Hybridantrieben ist die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs und die Reduzierung schädlicher Emissionen. Neben diesen primären Zielen fallen auch Themen der Performance und des Komforts in das Potential hybrider Antriebsstränge. Einem Hybridfahrzeug stehen, je nach Hybridlayout, mehrere Möglichkeiten zur Verfügung diese Ziele zu erfüllen. Diese Hybrid-Betriebsarten sind:

- **Nutzung des hohen Wirkungsgrades von Elektromotoren** beim rein elektrischen Fahren.
- Bei der **Start-Stopp-Funktion** wird der Verbrennungsmotor im Stillstand oder um den Stillstand abgeschaltet. Dadurch entstehen Kraftstoffersparnisse durch die Nicht-Befuerung desselben aber auch thermische Vorteile da das verhältnismäßig kalte Abgas im Stillstand die Abgasnachbehandlung nicht abkühlt.
- **Rückgewinnung bzw. Rekuperation** und Speicherung von kinetischer Energie während des Bremsvorgangs, anstatt vollständiger Dissipation an den Bremsen. Ein Teil des zur Verzögerung benötigten Bremsmoments wird durch ein gegendrehendes Generatormoment geleistet und die gewonnene Energie gespeichert. Neben kinetischer Energie kann auch Abgasenthalpie zurückgewonnen werden.

- **Betriebspunktverschiebung** um beispielsweise die vom Verbrennungsmotor angeforderte Leistung in Betriebspunkte höherer Wirkungsgrade zu verschieben. Dazu wird die Leistung angehoben oder die Drehzahl abgesenkt. Die zur Verschiebung benötigte Leistung stammt aus dem zweiten Energiespeicher des Hybridfahrzeuges bzw. kann dort überschüssige Energie gespeichert werden. Man spricht auch vom „Right-Sizing“.
- Beim **Boosten** wirken beide Energiequellen zusammen um eine größtmögliche Beschleunigung zu erreichen.
- Das **Aufladen der Energiespeicher** durch den Verbrennungsmotor bzw. konventionellen Antrieb kann gesamt oder teilweise erfolgen.
- Beim **Segeln** eines Hybridfahrzeuges ist der Antriebsstrang vollständig abgeschaltet und vom Antrieb entkoppelt. Dadurch wird ein Ausrollen des Fahrzeuges ermöglicht bei dem keine kinetische Energie in den Antriebsstrang zurückgespeist wird. Es finden somit weder Rekuperation noch „Motorbremsung“ durch das Motorschleppmoment statt.

Hybridfahrzeuge können anhand ihres Hybridisierungsgrades untergliedert werden. Der Hybridisierungsgrad H eines Hybridfahrzeuges aus VKM und EMG gibt Auskunft über den Anteil der elektrischen Leistung an der Systemleistung. Er ist definiert nach:

$$H = \frac{P_{EMG}}{P_{EMG} + P_{VKM}} \quad (2.19)$$

Anhand des Hybridisierungsgrades lassen sich Hybridfahrzeuge nach:

- Micro-Hybrid - $H \approx 0,05\%$
- Mild-Hybrid - $H \approx 0,1\%$
- Voll-Hybrid - $H \approx 0,25\%$
- Plug-In-Hybrid - $H > 0,25\%$

untergliedern. Auf die weitere Definition der so untergliederten Hybridvarianten wird an dieser Stelle verzichtet und auf die weiterführende Literatur wie beispielsweise [Hof14] verwiesen. Eine weitere Möglichkeit, die im Rahmen dieser Arbeit interessanter ist, ist die Untergliederung nach dem Layout (der Anordnung) der Komponenten des Antriebsstrangs. Ausgehend von diesen Anordnungsmerkmalen unterscheidet man *serielle*-, *parallele*- und *leistungsverzweigte* Hybride. Eine Übersicht dieser Anordnungen ist in Abbildung 2.9 zu finden. Die Pfeilrichtungen geben mögliche Energieflüsse an. Es handelt sich um schematische Darstellungen bei denen Komponenten wie Zwischengetriebe und Leistungselektronik nicht berücksichtigt sind.

Serielle Hybride

Der serielle Antrieb besteht aus einem Verbrennungsmotor (VKM) ,in Abbildung 2.9 dargestellt als Drei-Zylinder VKM, zwei elektrischen Maschinen und einem Hochvoltspeicher. Zum Vortrieb wird allein der Elektromotor verwendet der direkt das Achsgetriebe (Differential, kurz:Diff) antreibt. Dieselbe elektrische Maschine dient als Generator im Rekuperationsbetrieb wodurch der Energiefluss in beide Richtungen zwischen Batterie und EMG besteht. Eine zweite elektrische Maschine wird durch den Verbrennungsmotor angetrieben. Die dadurch generierte Leistung dient der Ladung der Batterie. Durch diese Anordnung besteht keine direkt Anbindung des Verbrennungsmotors zur Antriebsachse. Die vom Verbrennungsmotor und dem Generator erzeugte elektrische Energie wird entweder zum

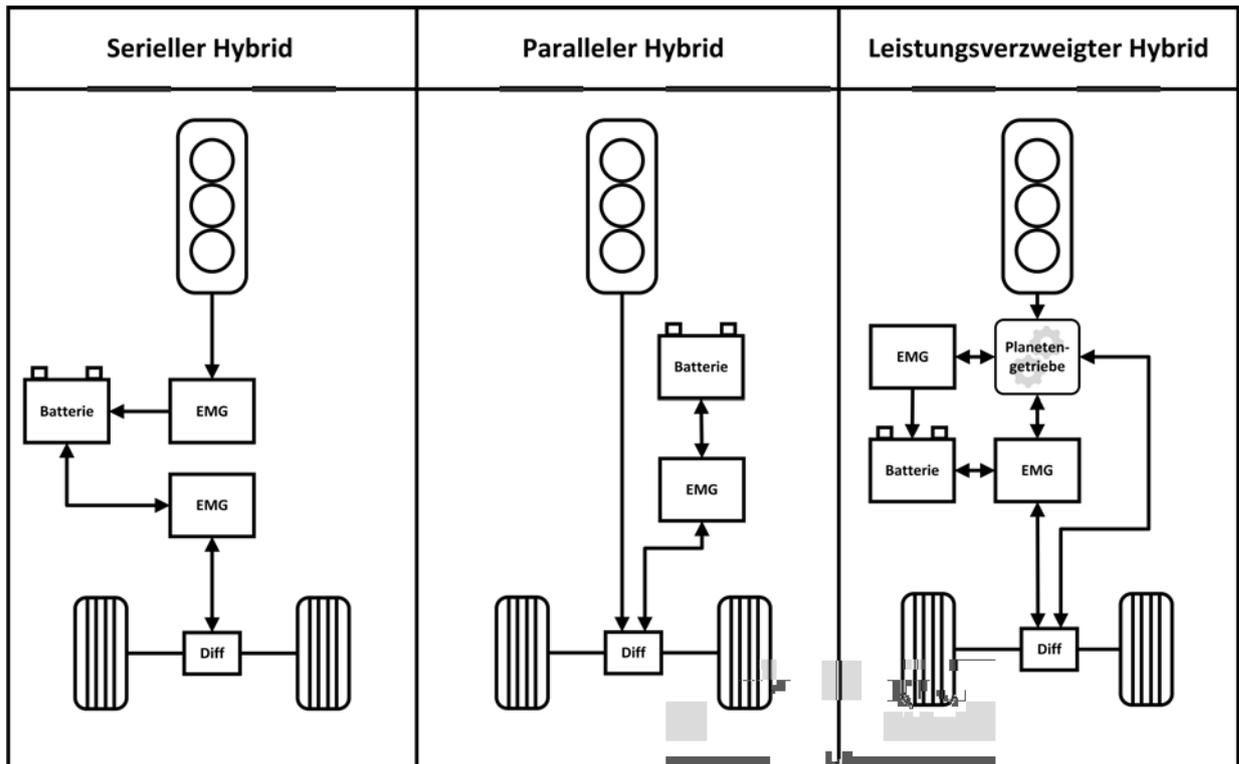


Abbildung 2.9: Antriebslayouts von Hybridfahrzeugen bestehend aus VKM und Batterie als Hochvoltspeicher

Laden der Batterie verwendet oder direkt an den antreibenden Elektromotor durchgeleitet. Die Entkopplung der VKM von der Antriebsachse stellt einen der größten Vorteile eines seriellen Hybrids dar, da dieser dadurch drehzahl und lastunabhängig in den Bereichen seines höchsten Wirkungsgrades betrieben werden kann. Vor allem bei langsamer Fahrt können dadurch im Vergleich zum reinen VKM Antrieb Vorteile erzielt werden. Der größte Nachteil liegt in den doppelten elektrischen Umwandlungsverlusten. Diese können bei hohen Geschwindigkeiten den Verbrauchsvorteil des Hybridsystems überschreiten, weshalb dieses Antriebslayout beispielsweise oft bei Stadtbussen Anwendung findet. Es werden mehrere Ausprägungen des seriellen Antriebs unterschieden. Bei der klassischen Variante werden die drei Motoren auf den selben Leistungsbereich ausgelegt. Die Dimensionierung orientiert sich dabei an der Höchstlast im Dauerbetrieb, welche im realen Betrieb selten vorliegt. Aus diesem Grund sind die Komponenten oft überdimensioniert. Eine weitere Auslegung des Antrieb ist die als „Range-Extender“. Dabei handelt es sich um ein Elektrofahrzeug bei welchem die Batterie als Hauptenergeträger fungiert. Der Verbrennungsmotor, der in der Regel deutlich kleiner dimensioniert ist, dient lediglich der Reichweitenerhöhung (engl. Range Extention). [Rei17][Axe18][Hof14]

Parallele Hybride

Bei parallelen Hybriden verlaufen die Energiepfade des Verbrennungsmotors und des Elektromotors parallel zueinander. Dieser parallele Verlauf ist auch in 2.9 ersichtlich. Nicht abgebildet sind die mechanischen Kopplungen. Bei einem parallelen Hybrid sitzt auf dem konventionellen Antriebsstrang zusätzlich eine E-Maschine. Es besteht eine mechanische Verbindung zwischen VKM und Antriebsachse. Die beiden Pfade können jeweils einzeln (rein elektrische Fahrt oder rein verbrennungsmotorische Fahrt) oder gemeinsam (Boost oder Lastpunktverschiebung) betrieben werden. Für Parallelhybride ergeben sich zwei Anordnungsmöglichkeiten in Abhängigkeit der Anordnung zum Getriebe. Bei

einem Ein-Wellenhybrid wirken EMG und VKM gemeinsam auf eine Getriebeeingangswelle. Beim Zwei-Wellenhybrid besitzen EMG und VKM jeweils eigene Getriebeeingangswellen. Man unterscheidet Parallelhybride zudem anhand der Position des EMG im Antriebsstrang ($P0$ bis $P4$). Parallele Hybride können außerdem durch die Verwendung einer zweiten Kupplung oder eines Doppelkupplungsgetriebes sinnvoll erweitert werden um das mögliche Spektrum an Betriebsarten zu erhöhen. Erweiterungspotential bietet ebenfalls der Einsatz einer zweiten E-Maschine ($P1-P2$ oder $P2-P3$). Für genauere Beschreibungen sei an dieser Stelle auf die einschlägigen Literaturstellen in [Rei17],[Axe18] und [Hof14] verwiesen. Die größten Vorteile eines parallelen Antriebslayouts sind der geringe Einbauaufwand, da der konventionelle Antriebsstrang oft beibehalten werden kann. Er wird im einfachsten Fall lediglich um einen Elektromotor erweitert. Bei der einfachsten Erweiterung sind allerdings nicht alle Hybridfunktion realisierbar. Der Aufwand steigt mit der Komplexität des Parallelen Layouts (Anzahl EMG, Kupplungen, Ein- oder Zwei-Wellenhybrid), welche notwendig ist um alle Funktionen eines Vollhybrids zu ermöglichen (z.B. rein elektrisches Fahren).

Leistungsverzweigte Hybride

Bei Leistungsverzweigten Hybriden kommt ein Planetengetriebe zum Einsatz. Es ermöglicht die Aufteilung der Leistung der Einzelkomponenten wodurch es die Merkmale von seriell und parallelem Antriebslayout vereint. Durch das Planetengetriebe als zentrale Leistungsverzweigung ist es möglich die Drehzahlen von VKM und der beiden EMG unabhängig voneinander einzustellen. Ein Leistungsverzweigter Hybrid ist in der Lage alle Hybridfunktion zu erfüllen und ist daher immer ein Voll-Hybrid. Beispielsweise kann die Leistung der VKM derart aufgeteilt werden, dass ein Teil der Leistung in elektrische umgewandelt wird und die Batterie lädt. Der verbleibende Teil kann gemeinsam mit der zweiten E-Maschine für einen kombinierten Antrieb genutzt werden. Wesentlicher Vorteil dieser Leistungsverzweigung ist, dass in Bereichen niedriger Leistungen überwiegend der elektrische Pfad mit dem Wirkungsgradvorteilen der EMG genutzt werden kann und in Bereichen höherer Leistung der mechanische Pfad ohne elektrische Umwandlungsverluste. Ähnlich wie beim seriellen Hybridantrieb müssen die Komponenten relativ groß dimensioniert werden. Die Auslegung des Planetengetriebes ist für die Wahl des Übertragungspfades verantwortlich. Es kann kein manueller Wechsel der Betriebsart erfolgen. Damit bestimmt, sollte das Layout nicht um weitere Komponenten im Antriebsstrang erweitert werden, das Planetengetriebe auch die Hybrid-Betriebsstrategie.[Rei17][Axe18][Hof14]

Solche **Hybrid-Betriebsstrategien** verfolgen bei Hybridfahrzeugen den Zweck die zum jeweiligen Fahrzustand und Fahrerwunsch passende Betriebsart auszuwählen. Anders als bei einem konventionellem Antrieb, bei dem der Fahrerwunsch direkt an die Leistung der VKM gekoppelt ist (abgesehen von der Gangwahl) muss bei einem Hybridfahrzeug festgelegt werden durch welche Energiequelle die angeforderte Leistung bereitgestellt werden soll. Bei Hybridfahrzeugen ergeben sich neben der Gangwahl durch das Vorhandensein mehrerer Energiequellen und Energiewandler weitere Freiheitsgrade [Grü12]. Dabei hängt die Wahl der zum jeweiligen Zeitpunkt effizientesten Betriebsart vom Hybridkonzept selbst sowie dem Zustand des Fahrzeuges ab. An oberster Stelle wird die Erfüllung des Fahrerwunsch gesetzt. Wie diese erfüllt wird bestimmt Betriebsstrategie, die in die Wahl der Betriebsart auch Faktoren wie die Senkung des Energieverbrauchs und der Emissionen berücksichtigt. Zusätzlich können Faktoren wie Fahrdynamik und Komforthöhung berücksichtigt werden. Ein effizientes Antriebsstrangmanagement (Betriebsstrategie) erfordert Kenntnisse über die Zustände der beteiligten Komponenten. Dazu kommen Datenbusse, die über Sensoren die Zustände erfassen, am Hybrid-Steuergerät zusammen.

Im Bereich des Antriebsstrangmanagement liegt enormes Einsparpotential sowohl für den Kraft-

stoffverbrauch wie auch das Emissionsreduzierungspotential. Es ist daher immerwährender Entwicklungsgegenstand und es existieren zahlreiche Varianten zur Umsetzung einer Betriebsstrategie. Eine Auswahl und Beschreibung lässt sich beispielsweise in [Hof14] finden. Die darin thematisierten Betriebsstrategien sind:

- Kausale und Nicht-Kausale Betriebsstrategien
- Optimale Betriebsstrategien
 - Statische Optimierung
 - Numerische Optimierungsmethoden
 - Analytische Optimierungsmethoden
- Suboptimale Betriebsstrategien
- Heuristische Betriebsstrategien

Auf Letztere soll an dieser Stelle genauer eingegangen werden, da sie in einer abgewandelten Form auf das modellierte Brennstoffzellenfahrzeug dieser Arbeit angewendet wird. Bei heuristischen Betriebsstrategien handelt es sich um erfahrungsbasierte Betriebsstrategien. Die nachfolgende Abbildung 2.10 veranschaulicht die Grenzen der verschiedenen Betriebsmodi eines Hybridfahrzeuges mit Verbrennungsmotor in Abhängigkeit von Drehmoment und Fahrzeuggeschwindigkeit. Bei der abgebildeten Strategie handelt es sich um eine heuristische Betriebsstrategie. Die Grundlage dieser sind Bool'sche Variablen oder Funktionen aus der unscharfen Logik (engl. „Fuzzy Logic“)[Hof14]. Im Sin-

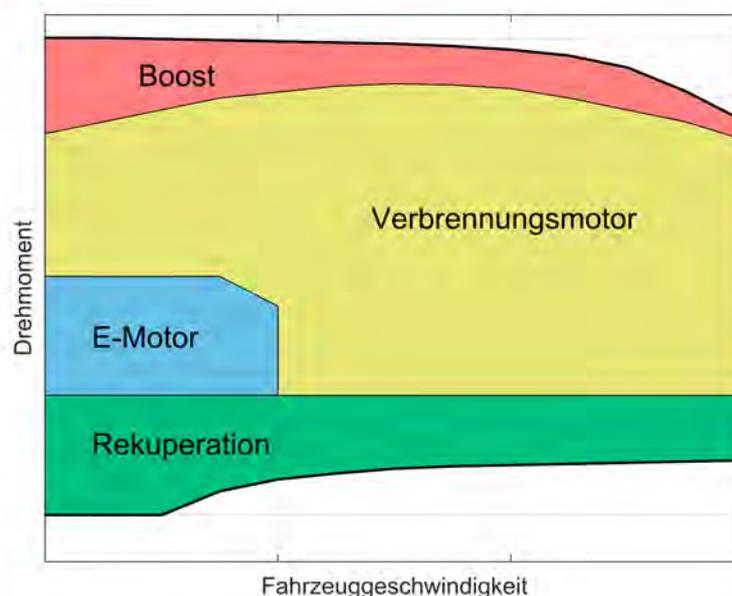


Abbildung 2.10: Betriebsmodi eines Hybridfahrzeugs mit Verbrennungsmotor. Abbildung nach [Hof14]

ne der Energieeffizienz ist es sinnvoll weitere Parameter in die Betrachtung mit einzubeziehen. Dabei spielt vor allem der *SOC* des eingesetzten Energiespeichers eine dominante Rolle. Dieser kann Auskunft darüber geben ob ein rein Batterieelektrisches Fahren oder der Boost-Betrieb überhaupt möglich sind. Neben diesem müssen weitere Parameter berücksichtigt werden. Außerdem kommen Hystereseschleifen zum Einsatz um im Übergangsgebiet zwischen den Betriebsmodi ständiges Wechseln zu vermeiden. Heuristische Betriebsstrategien kommen oft in der Praxis zum Einsatz, da sie im

Bereich des vorstellbaren liegen und daher gut parametrisiert werden können. In der Praxis werden die Parameter der heuristischen Betriebsstrategie durch Simulationen im Vorfeld während der Fahrzeugentwicklung erstellt [Hof14]. Im Rahmen der Modellbildung dieser Arbeit wird ein Brennstoffzellenhybridfahrzeug mit einer heuristischen Betriebsstrategie entwickelt. Das Simulationsmodell bietet eben diese Möglichkeit die Grenzen der heuristischen Betriebsstrategie durch Simulationsversuche zu bestimmen. Die entwickelte Betriebsstrategie wird in Kapitel 4.7.2 thematisiert.

Neben den genannten Betriebsstrategien spielen in jüngster Zeit auch immer mehr selbstlernende Betriebsstrategien in der Entwicklung von Hybridfahrzeugen eine Rolle. Durch die immer höher werdende Rechenleistungen der Steuergeräte im Fahrzeug werden solche, auf Künstlicher-Intelligenz (KI) basierende Betriebsstrategien, ermöglicht. Viele aktuelle Veröffentlichungen beschäftigen sich mit diesen Arten des Antriebsstrangmanagements.

2.4 Brennstoffzellenhybridfahrzeuge

Bisher wurden in diesem Kapitel vor allem Hybridfahrzeuge betrachtet die aus Verbrennungskraftmaschinen und einer Traktionsbatterie als Energiespeicher bestehen. In Brennstoffzellenhybridfahrzeugen entfällt der Verbrennungsmotor und damit auch die Zwischenstufe über die Rotationsenergie der Kurbelwelle. Da die Brennstoffzelle direkt elektrische Energie bereitstellt, ist es ausreichend die Brennstoffzelle und den Energiespeicher über eine Leistungselektronik und Schaltung so miteinander zu koppeln, dass sie zusammen einen Elektromotor mit Energie zum Fahrzeugantrieb versorgen. Derselbe Elektromotor dient während Verzögerungsphasen als Generator und liefert über die Leistungselektronik einen Rekuperationsstrom zur Speicherung an die Batterie. In Abbildung 2.11 ist der stark vereinfachte Aufbau eines Brennstoffzellenhybrid-Antriebsstranges und die Richtung möglicher Energieflüsse abgebildet. Auf Grund der gegebenen Topologie können Brennstoffzellenhybridfahrzeuge (FCHEV, engl. Fuel

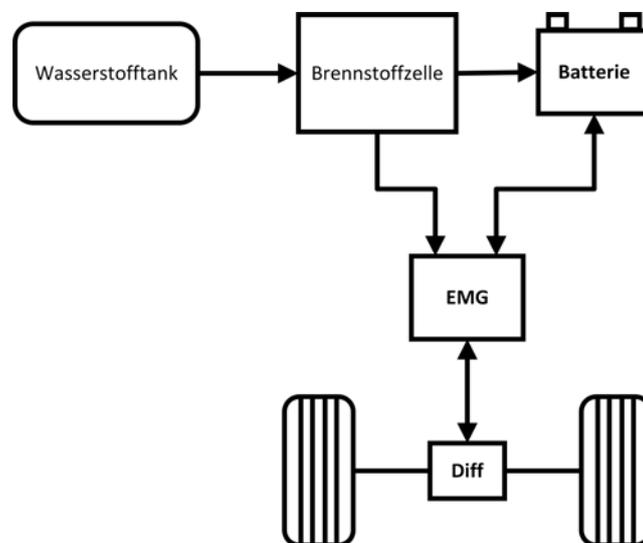


Abbildung 2.11: Schematischer, vereinfachter Aufbau eines Brennstoffzellenhybridantriebsstrangs und der Richtung der möglichen Energieflüsse

Cell Hybrid Electric Vehicle) den seriellen Hybridfahrzeugen zugeordnet werden. [GND17][Grü12] Eine heuristische Betriebsstrategie mit einer Drehmoment-Geschwindigkeits-Grundlage wie in 2.10 dargestellt ist für ein „FCHEV“ nicht zielführend. Es wird daher eine Leistung-Geschwindigkeits basierte heuristische Betriebsstrategie benötigt, welche in Abhängig dieser Parameter, den optimal Energielieferanten bestimmt. Der Aufbau einer solchen Betriebsstrategie sowie die im „FCHEV“ vorkommenden Betriebsmodi werden in 4.7.2 genau beschrieben. In diesem Kapitel wird ebenfalls auf die im Rah-

men dieser Arbeit auf das Simulationsfahrzeug angepassten Hystereseschleifen und Grenzparameter eingegangen.

3 Stand der Technik

Die Simulation von Fahrzeugkonzepten spielt im Entwicklungsalltag der Fahrzeughersteller eine immer größer werdende Rolle. In den Modellen stecken viel Know-How und Firmeninterne Erfahrungswerte, weshalb es verständlich ist, dass diese Entwicklungstool nicht der breiten Masse zur Verfügung gestellt werden. Ein sehr ausführliches Entwicklungstool, das in *Matlab* frei verwendet werden kann ist der *Advanced Vehicle Simulator, ADVISOR*, der vom „National Renewable Energy Laboratory“ entwickelt wurde. Der Entwicklungsgrund lag bereits 1994 in einer Kooperation vom „US Department of Energy, DOE“ und namhaften amerikanischen Automobilherstellern, mit dem Ziel der Entwicklung von Hybridfahrzeugen. *ADIVSOR* bietet dazu eine Vielzahl an möglichen Antriebsstranglayouts und Zusammensetzungen, die über ein GUI (engl. Graphical User Interface) zusammengestellt und Parameter definiert werden können. Neben Hybridkonzepten bestehend aus Verbrennungsmotoren und Energiespeichern unterschiedlicher Anordnungen bietet *ADVISOR* auch die Möglichkeit Brennstoffzellenhybridfahrzeuge abzubilden. Im GUI können eine Vielzahl von relevanten Modellparametern bearbeitet werden um so das Fahrzeug wie gewünscht abbilden zu können. Dazu gehören Fahrzeugspezifische Größen wie Massen, Stirnfläche und alle weiteren den Fahrwiderstand beeinflussenden Größen sowie die Parameter der Energiewandler und Speicher. Es stehen Modelle verschiedener Batterietypen und Brennstoffzellentypen bereit die wiederum durch gezielte Parametrisierung verändert werden können. Für die Brennstoffzellensimulation können statische Strom-Spannungskennlinien parametrisiert werden, weshalb der Einfluss dynamischer Effekte in der Basis-Version nicht im Fokus steht. Für die Batteriemodelle stehen verschiedene Modellierungsansätze bereit, auch das wie in dieser Arbeit beschriebene Verfahren über elektrische Ersatzschaltbilder. [MBH⁺02][BHHJ13][TSC17] Für Brennstoffzellenhybride ergibt sich weiter die Einschränkung, dass in der Basis-Version von *ADVISOR*, lediglich die Hybridtopologie einer Range-Extender-Variante zur Verfügung steht. In 3.1 ist ein Screenshot aus dem *ADVISOR* GUI des Antriebslayouts abgebildet. In Kapitel 2.3 wird noch genauer auf die Hybridlayouts und auch auf das gewählte Layout des im Rahmen dieser Arbeit modellierten Brennstoffzellenhybridfahrzeuges (FCHEV) eingegangen. Ebenfalls fehlend ist die Möglichkeit die zugrun-

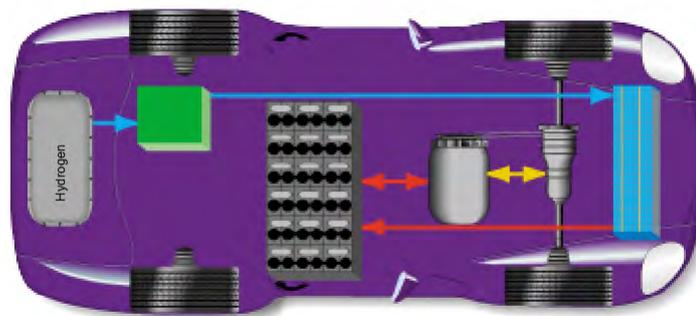


Abbildung 3.1: Screenshot des Brennstoffzellenhybrid Layouts aus dem *ADVISOR* GUI

de liegende Betriebsstrategie bzw. das Antriebsstrangmanagement des Hybridsystems zu verändern. Ebenso unklar bleibt welche Hybridmodi überhaupt zur Verfügung stehen. Grundsätzlich bietet *ADVISOR* auch die Möglichkeit durch Parametrisierung und Eingriff in die Modellstrukturen das Modell auf seine Bedürfnisse anzupassen und damit die genannten Schwierigkeiten durch Eigenentwicklungen zu kompensieren. Jedoch entspricht dies einem Eingriff in ein äußerst komplexes Simulationstool, das nicht ohne weiteren, intensiven Aufwand möglich ist.

ADVISOR stellt eines der wenigen frei verfügbaren Simulationstools zur Berechnung von Brennstoffzellenhybridfahrzeugen dar. In einer Benchmarking Arbeit von [HM03] werden verfügbare Simula-

tionstools darunter auch *ADVISOR* für Brennstoffzellenfahrzeuge miteinander verglichen. In [Grü12] wird ein FCHEV-Modell beschrieben das über eine Hybridbetriebsstrategie Entscheidungen über die gewählte Betriebsart trifft. Dabei werden zwei Betriebsstrategien im Sinne der Kraftstoffersparnis für ein Brennstoffzellenfahrzeug gegenübergestellt. Die Modellierung der Brennstoffzelle dieser Arbeit erfolgt über einen statischen Modellansatz. Es existieren eine Vielzahl von Veröffentlichungen zur Modellierung der Einzelkomponenten eines Brennstoffzellenhybridsystems. In [GND17] werden mehrerer Modellierungsansätze zur Entwicklung von Regelungsstrategien von Brennstoffzellenhybridfahrzeugen vorgestellt. Eine ausführliche Übersicht über bestehende Modelle, wie auch elektrische Ersatzschaltbilder für Brennstoffzellen erfolgt in [GBM13]. Die Auflösung der Modelle unterscheidet sich dabei stark. Es existieren Modelle, die das rein elektrische, statische Verhalten der Brennstoffzellen anhand von Strom-Spannungskennlinien abbilden aber auch detailreiche Ansätze die ihren Fokus beispielsweise auf Transportphänomene (Stoff- und Wärme) innerhalb der Zelle legen wie in [Abd18]. Es lassen sich zahlreiche Modellierungsansätze für sowohl Brennstoffzellen wie auch Batterien finden, die sich für die jeweiligen Einsatzzwecke mehr oder weniger eignen. Man unterscheidet die Modellierungsansätze nach beispielsweise der Art der zugrundeliegenden Gleichungen und der Datenbasis nach. Demzufolge können analytische, empirische oder Halb-empirische Modellen unterschieden werden. Oft werden auch die Raumdimensionen (0D bis 3D) oder die abgebildeten Phänomene zur Kategorisierung herangezogen. Die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Effekte sind vor allem das elektrische und Thermische Verhalten der elektrochemischen Systeme des Brennstoffzellenfahrzeugs sowie deren Verhalten unter transienten (dynamischen) Betriebszuständen im Betrieb des Fahrzeuges. Die Anforderungen an die einzelnen Modelle dieser Arbeit sowie deren letztliche Ausgestaltung werden im nachfolgenden Kapitel 4 behandelt.

4 Modell

Eine grundlegende Anforderung an das Simulationsmodell dieser Arbeit ist dessen Skalierbarkeit und Modularität. Der modulare Aufbau erlaubt es nachträgliche Verfeinerungen einzelner im Modell integrierten Teilmodelle vorzunehmen. Durch den modularen Aufbau kann dabei die Gesamtarchitektur beibehalten werden. Um das zu gewährleisten werden im Modell teilweise Platzhaltermodelle (sog. "Blackboxen") verwendet um Modellparameter zu berücksichtigen, ohne die tatsächlich zugrundeliegenden physikalischen Effekte abzubilden. Diese Blackboxen können durch Modellweiterungen zu einem späteren Zeitpunkt integriert werden.

Die Anforderung der Skalierbarkeit ergibt sich im wesentlichen aus der Auslegung der Brennstoffzelle und der Batterie. Diese lassen sich vor allem über ihre Zellanzahlen, der Art der Verschaltung und der aktiven Zellfläche skalieren. Zu beachten ist, dass sich bei einer veränderten Dimensionierung auch die Anforderung an die Systemperipherie verändert. Beispielsweise kann der modellierte Kompressor bei einer Verdopplung der Zellanzahl der Brennstoffzelle nicht mehr genug Sauerstoff bereitstellen um die Brennstoffzelle in jedem Betriebspunkt ausreichend zu versorgen.

Das Brennstoffzellenmodell soll relevante dynamische Effekte berücksichtigen. Dazu gehören im Rahmen dieser Erstmodellierung die elektrischen und thermodynamischen Effekte im der Brennstoffzelle und Batterie sowie die Fahrzeugdynamik, die eine Reaktion aller beteiligten Komponenten auf den Fahrerwunsch widerspiegelt. Im Fokus dieser Erstmodellierung steht zudem der Aufbau der Systemarchitektur für das Hybridsystem sowie die Kommunikation der beteiligten Systeme über die Intelligenz einer Hybridstrategie.

Weiterhin soll es möglich sein das Modell zu auf ein zu diesem Zeitpunkt noch nicht existentes reales Prüfstandsystem parametrisieren zu können. Das reale System im Labormaßstab befindet sich zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit in der Planungsphase. Damit geht einher, dass keine Messdaten zur Verfügung stehen um das Simulationsmodell Modell zu parametrisieren bzw. zu Validieren. Aus diesem Grund müssen in den folgenden Kapiteln, in welchen die einzelnen Systemmodelle vorgestellt werden, Annahmen getroffen bzw. Validierungen auf Basis exemplarischer Systeme durchgeführt werden, die das zu erwartende physikalische Verhalten aufweisen.

Im Anhang befindet sich eine Abbildung die die oberste Simulationsebene des entwickelten Simulinkmodells abbildet. Aus der Abbildung kann entnommen werden wie die Teilmodelle miteinander verbunden sind. Die Kommunikation zwischen ihnen erfolgt über Datenbusse in den die berechneten Größen hinterlegt sind.

4.1 Gesamtfahrzeug

Im Teilmodell „Gesamtfahrzeug“ wird die Fahrzeuggeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Fahrwiderstände und Fahrzeugeigenschaften berechnet. Es wird ein vereinfachter Ansatz gewählt, bei welchem das Fahrzeug als Punktmasse abgebildet wird. Das bedeutet, dass sich die Fahrzeugmasse auf einen idealisierten Körper ohne geometrische Eigenschaften verteilt, wodurch keine Aufteilung der Gewichtskräfte auf die Fahrzeugachsen berücksichtigt werden muss. Die in diesem Teilmodell relevanten Fahrzeugeigenschaften orientieren sich am batterieelektrisch angetriebenen *BMW i3* und sind der nachfolgenden Tabelle 4.1 zu entnehmen.

Für die Fahrzeugdynamik wird das Kräftegleichgewicht der wirkenden Fahrwiderstände wie in Gleichung 4.1 aufgestellt. Darin entspricht F_W der Zugkraft an den Rädern und ist die Summe der Einzelfahrwiderstände.

$$F_W = \sum F_i = F_{Roll} + F_{climb} + F_{aero} + F_{inertial} \quad (4.1)$$

Tabelle 4.1: Eigenschaften des Brennstoffzellenfahrzeugs. Orientiert am *BMW i3*

Größe		Wert
Gewicht	m_{veh}	1730 kg
Stirnfläche	A	2,38 m ²
Luftwiderstandsbeiwert	c_w	0,29
Getriebeübersetzung	G	9,655
Reifenrollradius	r_{tyre}	0,35 m
Rollwiderstandsbeiwert	$k_r(c_{veh})$	$c_{veh} * 10^{-5} + 0,012$
Drehmassenfaktor	RIF	1,1

Für die Fahrwiderstände gelten unter der Vereinfachung des Punktmassenansatzes, einer trockenen Fahrbahn ohne Kurvenfahrten, Windstille und Vernachlässigen des Vorspurwiderstandes die folgenden Beziehungen:

- Der Luftwiderstand F_{aero} errechnet sich nach Gleichung 4.2. Darin ist c_w der Luftwiderstandsbeiwert und A die Stirnfläche des Fahrzeuges nach [BMW17]. ρ ist die Dichte der Umgebungsluft und c_{veh} die Fahrzeuggeschwindigkeit.

$$F_{aero} = \frac{1}{2} * c_w * A * \rho * c_{veh}^2 \quad (4.2)$$

- Der Steigungswiderstand F_{climb} errechnet sich nach:

$$F_{climb} = m_{veh} * g * \sin \alpha \quad (4.3)$$

Darin ist α der Steigungswinkel, m_{veh} das Fahrzeuggewicht und $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ die Fallbeschleunigung auf der Erde.

- Der Rollwiderstand berechnet sich nach:

$$F_{roll} = k_R(v) * m_{veh} * g = 0,012 + 10^{-5} * \frac{c_{veh}}{km/h} * m_{veh} * g \quad (4.4)$$

In Gleichung 4.4 sind m_{veh} und g wieder die Fahrzeugmasse und die Fallbeschleunigung. k_R ist der geschwindigkeitsabhängige Rollwiderstandsbeiwert nach [Axe18].

- Die Beschleunigungskraft $F_{inertial}$ ist die Kraft mit welcher das Fahrzeug beschleunigt wird. Sie errechnet sich nach:

$$F_{inertial} = RIF * m_{veh} * a_{veh} \quad (4.5)$$

In Gleichung 4.5 ist m_{veh} die Fahrzeugmasse und a_{veh} die Fahrzeugbeschleunigung. RIF ist der Drehmassenfaktor des Antriebsstranges (engl. Rotational Inertial Force Factor).

Um die Fahrzeuggeschwindigkeit berechnen zu können wird zunächst Gleichung 4.1 nach der Fahrzeugbeschleunigung aus Gleichung 4.5 umgestellt. Die Fahrzeugbeschleunigung ergibt sich nach:

$$a_{veh} = \frac{1}{m_{veh} * RIF} * (F_W - F_{roll} - F_{climb} - F_{aero}) \quad (4.6)$$

Die Zugkraft F_W ist die am Rad wirkende Kraft zum Antrieb des Fahrzeugs. Auf die Berechnung der Zugkraft aus dem vom Motor bereitgestellten Drehmoment wird in Kapitel 4.4 eingegangen.

Durch einmalige Integration von Gleichung 4.6 nach der Zeit erhält man die Fahrzeuggeschwindigkeit.

$$c_{veh} = \int a_{veh} dt \quad (4.7)$$

Die Fahrzeuggeschwindigkeit kann als Rückmeldung des Fahrzeuges auf den Fahrerwunsch interpretiert werden. Wie sich der Fahrerwunsch äußert wird im nächsten Kapitel erläutert.

4.2 Fahrer als Regler

Der Fahrer ist im Modell der Regler, der die Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Soll-Geschwindigkeit regelt. Die Eingangsgrößen sind dementsprechend diese Geschwindigkeiten. Die Soll-Geschwindigkeit, im Regelfall aus einem Fahrzyklus stammt, stellt die Führungsgröße dar. Die Ist-Geschwindigkeit ist die Reaktion des Fahrzeugmodells auf Stör- und Regelgrößen. In Abbildung 4.1 werden die Signalflüsse verdeutlicht.

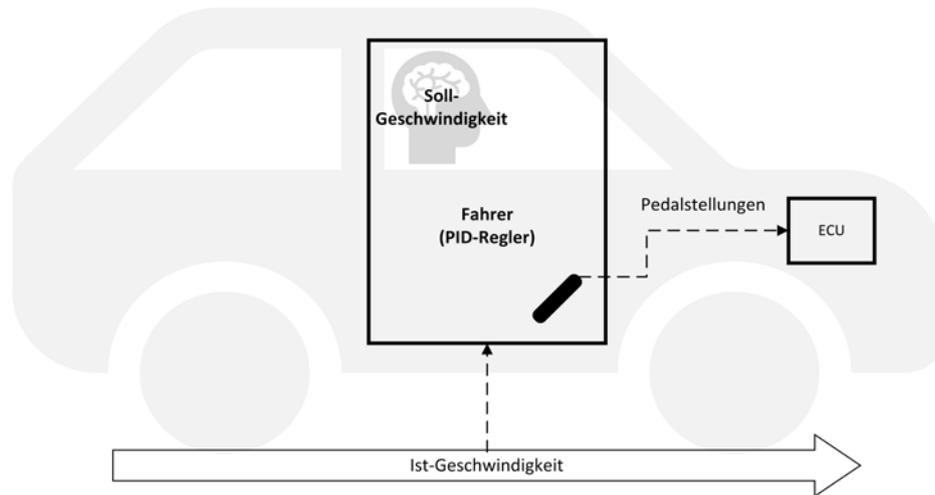


Abbildung 4.1: Der Fahrer als Regler für die Fahrzeuggeschwindigkeit

Im Fahrermodell wird zunächst die Differenz aus Soll- und Ist-Geschwindigkeit ermittelt. Diese Regelabweichung wird von einem PID-Regler in ein Stellsignal umgesetzt. Dieses Stellsignal liegt zwischen „-1“ für eine Vollbremsung und „+1“ für die maximale Beschleunigungsanforderung. Im Modell wird es aufgespalten, sodass negative Werte die Bremspedalstellung und positive die Gaspedalstellung abbilden. Eine gleichzeitige Betätigung von beiden Pedalen ist nicht gewünscht. Um ein unerwünschtes Rollen des Fahrzeugs im Stillstand zu verhindern, wird das Bremspedal während des Haltens betätigt. Die vom Fahrermodell ausgegebenen Pedalstellungen werden in % an das Steuergerät weitergeleitet. Dort werden Sie in Drehmoment- bzw. Bremskraftanforderungen umgesetzt.

4.3 Elektromotor/Generator

Das modellierte Brennstoffzellenfahrzeug orientiert sich wie bereits erwähnt am batterieelektrisch betriebenen *BMW i3*. Die Analogie zu diesem Fahrzeug wird auch beim Elektromotor bzw. Generator (Bezeichnung im Modell „EMG“) berücksichtigt. Zum Einsatz kommt ein „Hybrid-Synchron-Motor“, bei welchem es sich um eine spezielle Bauart eines Permanent erregtem Synchron Motors handelt. Der Motor wurde speziell von BMW für den Einsatz im i3 und i8 entwickelt und wird auch von BMW produziert. Er stellt ein maximales Drehmoment von 250 Nm bereit und erreicht seine maximale Drehzahl bei $11400 \frac{1}{\text{min}}$. Die Nennleistung beträgt 125 kW. Nachfolgend ist das Kennfeld des Motors abgebildet wie es nach [Mer14] vermessen wurde.

Dem Motor wird vom Steuergerät, der „ECU“ (engl. Electronic Control Unit), eine Drehmomentanforderung vorgegeben. Wie diese ausgehend von den Steuerungssignalen des Fahrers umgesetzt wird, wird in Kapitel 4.7.1 erläutert. Diese Anforderung entspricht der am Ausgang des Elektromotors. Da die Bereitstellung dieses Drehmoments mit Verlusten verbunden ist, wird eine höhere Leistung

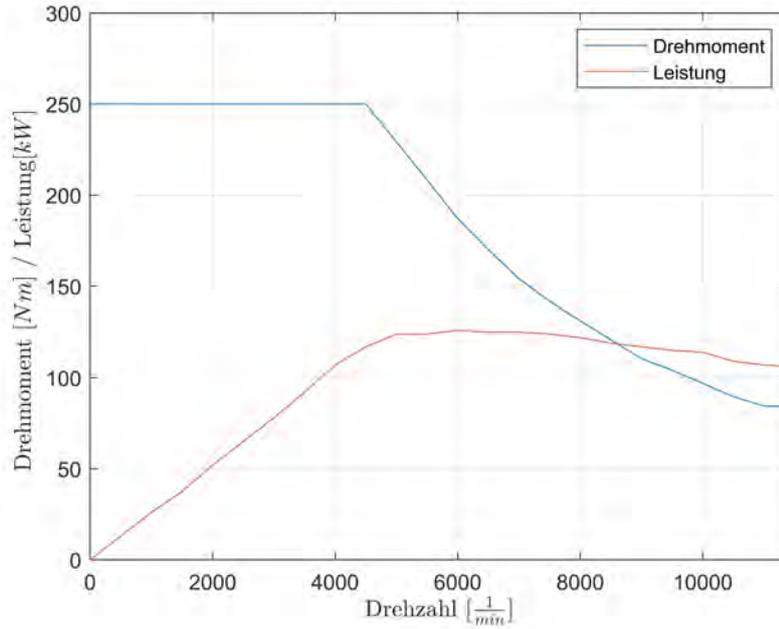


Abbildung 4.2: Leistungs- und Drehmomentkennfeld des BMW i3 Motors nach [Mer14]

am Eingang des Motors benötigt, als die vom Motor an den Antriebsstrang abgegebene Leistung. Das vom Steuergerät angeforderte Drehmoment M_{dem} wird über die momentane Drehzahl zur angeforderten Leistung P_{dem} umgerechnet. Dabei entspricht die angeforderte Leistung jener, welche am Ausgang des EMG bereitgestellt werden soll. Diese Größe wird in folgendem mit $P_{EMG,out}$ bezeichnet.

$$P_{dem} = P_{EMG,out} = M_{dem} * \omega_{EMG} \quad (4.8)$$

Über das Wirkungsgradkennfeld, in nachstehender Abbildung 4.3 ersichtlich, kann der zum jeweiligen Betriebspunkt zugehörige Wirkungsgrad η_{EMG} des Motors ermittelt werden.

Damit lässt sich die notwendige Leistung zum Betrieb des Motors für den Antriebsfall nach:

$$P_{EMG,in} = P_{EMG,out} * \frac{1}{\eta_{EMG}} \quad (4.9)$$

bestimmen. Diese Leistung $P_{EMG,in}$ muss durch die Brennstoffzelle, die Batterie oder einer Kombination bereitgestellt werden um dem Fahrerwunsch nachzukommen. Für die Rekuperation, die Rückgewinnung kinetischer Energie über den generatorischen Betrieb, ist das angeforderte Drehmoment negativ. Es wird angenommen, dass das Wirkungsgradkennfeld für negative Drehmomente über die Drehzahl-achse gespiegelt werden kann. Für diesen Betrieb ist die rekuperierbare Leistung ebenfalls um den Wirkungsgrad des EMG zu reduzieren :

$$P_{EMG,in} = P_{EMG,out} * \eta_{EMG} \quad (4.10)$$

In Gleichung 4.10 ist $P_{EMG,in}$, die Leistung, welche der Generator zum Laden der Batterie bereitstellt. $P_{EMG,out}$ ist die Leistung die vom Antriebsstrang in Form kinetischer Energie bereitgestellt wird.

Die vom Teilsystem des Elektromotors berechneten Leistungen für den Antriebs- und den Rekuperationsfall, werden im Teilsystem der Leistungselektronik in Kapitel 4.8 verwendet. Dort wird abhängig vom gewählten Hybridbetriebsmodus die Leistungsverzweigung zwischen Brennstoffzelle und Batterie

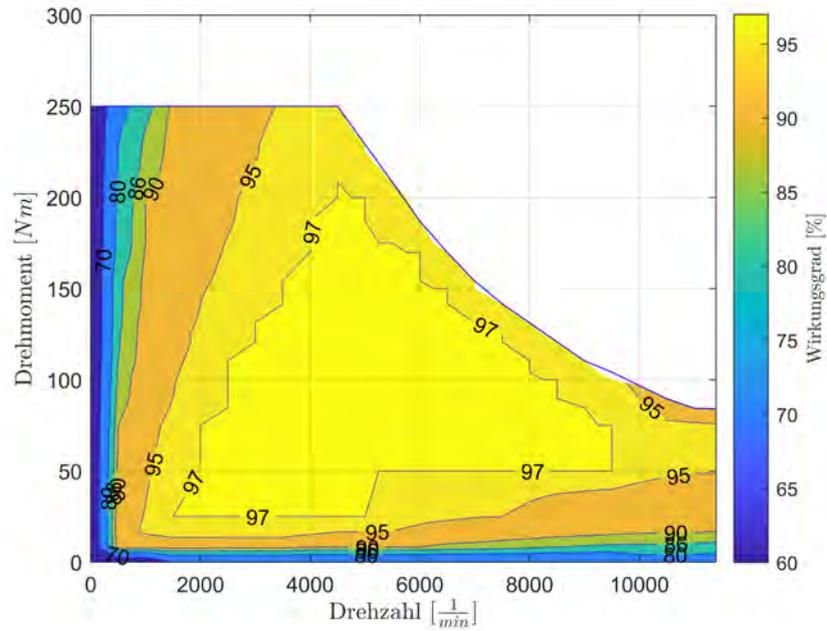


Abbildung 4.3: Wirkungsgradkennfeld des BMW i3 Motorsnach [Mer14]

umgesetzt.

4.4 Antriebsstrang

Der gesamte serielle Antriebsstrang des Fahrzeuges setzt sich aus dem Elektromotor, einem einstufigen Getriebe mit fester Übersetzung, dem Achsdifferential und letztlich den Rädern zusammen. Nachfolgend ist in 4.4 der Antriebsstrang schematisch abgebildet.

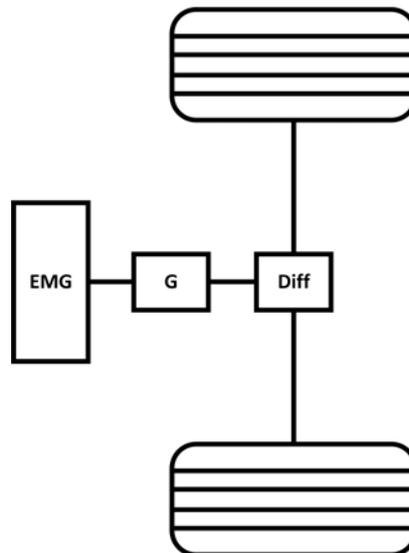


Abbildung 4.4: Antriebsstrang

Die feste Getriebeübersetzung liegt nach [BMW17] bei $G = 9,665 : 1$. Der *BMW i3* ist typischerweise mit widerstandsoptimierter Bereifung ausgestattet. Laut Datenblatt handelt es sich bei Auslieferung um Reifen mit der Typbezeichnung 155/70R19. Diese Reifen verfügen, ohne Berücksichtigung des dynamischen Radhalbmessers, über einen Reifenradius von $r_{Rad} = 35\text{mm}$. Über das Übersetzungsverhältnis

des Achsdifferentials lassen sich keine Informationen finden. Es wird daher von einem 1 : 1 Verhältnis ausgegangen. Im Teilmodell des Antriebsstrangs wird das vom Elektromotor erzeugte Drehmoment auf eine am Rad wirkende Antriebskraft F_{Tr} engl. „Tractive Force“) reduziert. Dem Antriebsstrang wird dazu ein konstantes Verlustmoment zugeschrieben. Dieses Verlustmoment M_{SL} (engl. „Torque Spin Loss“) wird konstant mit $M_{SL} = 6\text{N m}$ angenommen. Außerdem muss die Bremskraft, welche nicht durch ein negatives Motormoment, sondern durch die Reibbremse erzeugt wird, abgezogen werden, sodass sich die am Rad wirkende Kraft F_{Tr} nach:

$$F_{Tr} = (M_{EMG,out} - M_{SL}) * \frac{G}{r_{Rad}} - F_{Br} \quad (4.11)$$

berechnet.

An dieser Stelle lässt sich eine Abschätzung der theoretisch maximal erreichbaren Geschwindigkeit aufstellen. Geht man von einem verlustfreien Antriebsstrang aus errechnet sich die Höchstgeschwindigkeit c_{max} nach:

$$c_{max} = 2 * \pi * \frac{n_{max,EMG}}{G_{Gesamt}} * r_{Rad} = 42,23 \frac{m}{s} = 155,63 \text{km/h} \quad (4.12)$$

Die Höchstgeschwindigkeit liegt außerdem dann vor, wenn die Fahrwiderstände und die vom EMG an der Rädern erzeugten Antriebskräfte gleich groß sind. Bei der vorhandenen Dimensionierung des Motors und den physikalischen Eigenschaften des Fahrzeugs, liegt der Schnittpunkt dieser Kräfte erst hinter der maximalen (angegebenen) Drehzahl des Motors. Somit ist der limitierende Faktor für die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht die Kraft, sondern die Motordrehzahl, wie nach Gleichung 4.12 berechnet. Die nachstehende Abbildung 4.5 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Die Differenz zwischen der Fahrwiderstandslinie und der verfügbaren Radkraft ist die Kraftreserve um das Fahrzeug weiter zu beschleunigen.

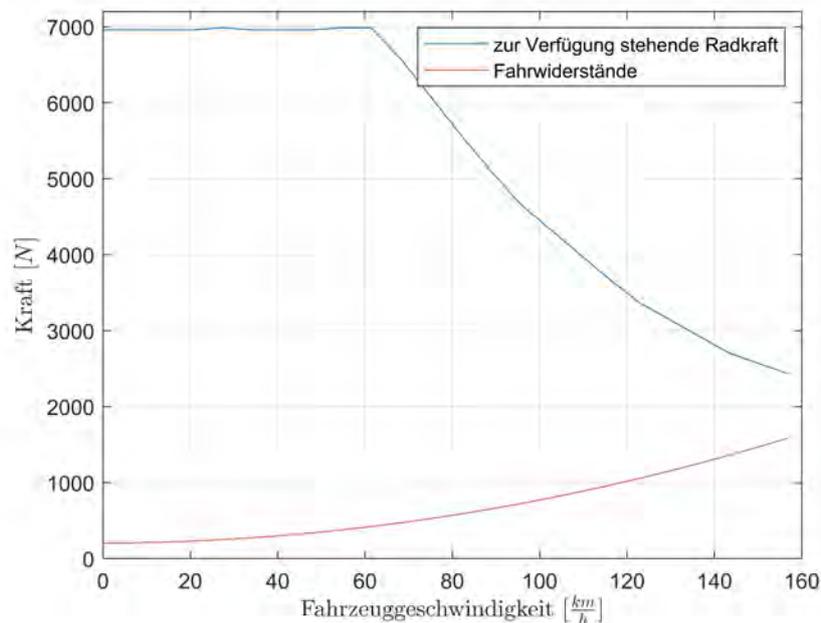


Abbildung 4.5: Zugkraftkennfeld

Der Hersteller limitiert die Fahrzeuggeschwindigkeit auf $150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ [BMW17]. Diese Grenze wird auch im Modell eingeführt.

4.5 Brennstoffzellensystem

Auf der Modellierung der Brennstoffzelle liegt ein wesentlicher Fokus dieser Arbeit. Die Anforderungen an das Modell sind dementsprechend hoch. Dabei stehen relevante dynamische Effekte, welche im Betrieb der Brennstoffzelle vorkommen, mit im Vordergrund. An dieser Stelle zeigt sich erneut die bereits erwähnte Schwierigkeit auf, dass weder Parametrisierungs- noch Validierungsversuche durchgeführt werden können. Es wird ein Modellierungsansatz gewählt, welcher das Brennstoffzellensystem in seinen einzelnen Bestandteilen halb-empirisch abbilden kann. In solchen Modellen kommen physikalisch-analytisch Ansätze für einige Komponenten zum Einsatz und wiederum empirische Ansätze für komplexe Teilsysteme. Die empirischen Ansätze sind nur dort möglich wo sich Messdaten bzw. empirische Konstanten aus der Literatur oder vorangegangenen Arbeiten ableiten lassen. Um ein modulares Systemmodell zu erstellen müssen zunächst die benötigten Komponenten definiert werden. Da es sich in dieser Arbeit um die Erstmodellierung eines noch nicht existenten Systems handelt, bietet es sich an, sich zunächst auf die minimale Systemarchitektur [HA08] [Puk03] zu beschränken. In Abbildung 4.6 sind die wesentlichen Bestandteile des System ersichtlich. Außerdem deren Interaktion miteinander bzw. die Regulationsmechanismen. Diese bestehen aus der Gasversorgung sowie dem Wasser- und Thermomanagement.

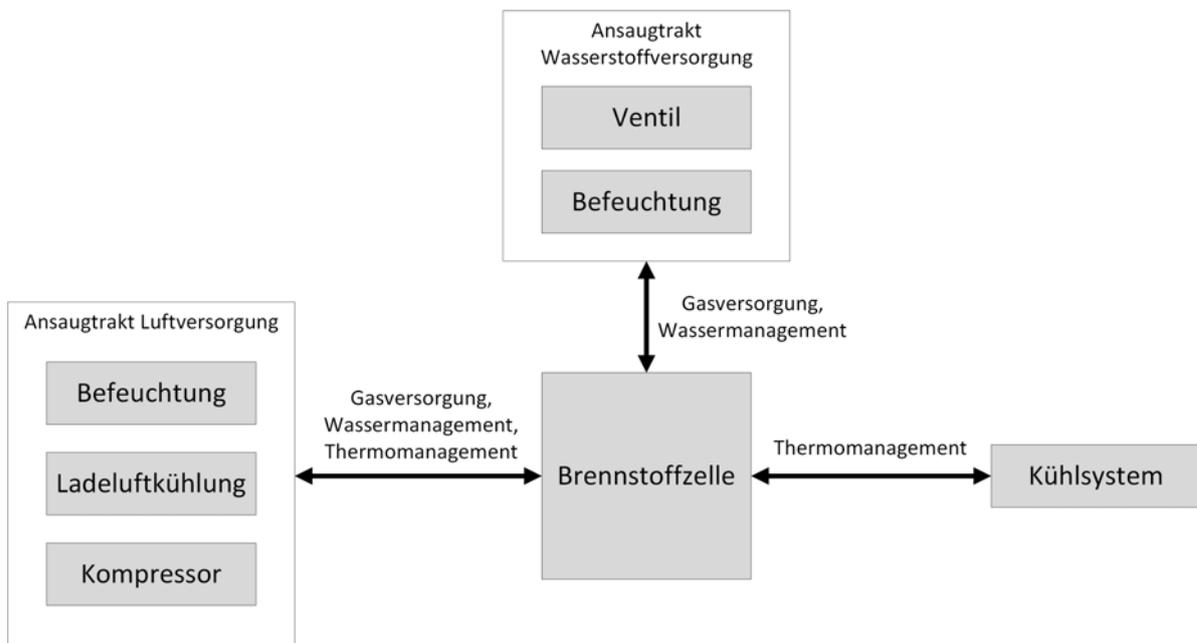


Abbildung 4.6: Komponenten eines Brennstoffzellensystems

In den folgenden Kapiteln wird die Modellbildung dieser Komponenten erläutert und auf deren Schnittstellen zu anderen Submodellen eingegangen.

4.5.1 Elektrisches Verhalten

Neben der Strom-Spannungs-Kennlinie, die bereits im Grundlagenkapitel 2 charakterisiert wurde und die das statische Verhalten einer Brennstoffzelle abbilden kann, ist das dynamische Verhalten der Brennstoffzelle von besonderer Bedeutung. Gerade im Verbund in einem Hybridsystem spielt das dynamische Verhalten eine große Rolle, da es das Zusammenwirken der beteiligten elektrischen Komponenten beeinflusst. In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Spannungsberechnung im Rahmen der Modellbildung umgesetzt wird, sodass neben dem statischen Verhalten auch dynamische Effekte

berücksichtigt werden. Dazu wird ein elektrisches Ersatzschaltbild vorgestellt und die Bestimmung der darin enthaltenen Parameter nach [Puk03] erläutert. Zunächst sollen allerdings die dynamischen Effekte, die im Betrieb einer Brennstoffzelle auftreten, charakterisiert werden. Dabei spielen das Ladeverhalten der Doppelschichtkapazität, Trägheiten der Wasserstoff- und Sauerstoffströme sowie thermodynamische Effekte eine Rolle [WNS05]. Sie lassen sich in kurzzeitdynamische und langzeitdynamische Effekte untergliedern:

Kurzzeitdynamisches Verhalten

Das Kurzzeitdynamische Verhalten einer Brennstoffzelle, als eine Reaktion auf eine abrupte Laständerung, verfügt über Zeitkonstanten im Bereich unter einer Sekunde. Es beruht auf der Reaktionskinetik der Brennstoffzelle. Die sich ausbildende Doppelschichtkapazität sowie die internen Zellwiderstände (z.B. die Ionenleitfähigkeit des Elektrolyten) verursachen dieses Verhalten, das in nachstehender Abbildung dargestellt ist. Es handelt sich um die hochaufgelösten Messreihen der vorangegangenen Arbeit [EZ19].

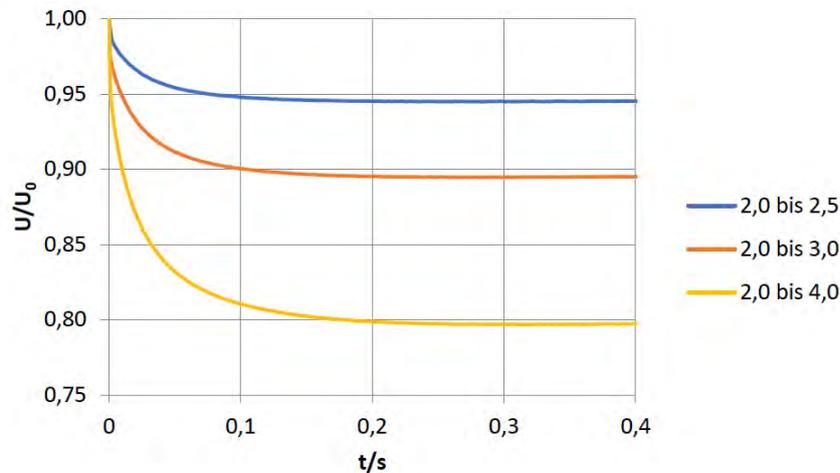


Abbildung 4.7: Auf die Ausgangsspannung normierter Spannungsverlauf im kurzzeitdynamischen Bereich des im Rahmen von [EZ19] untersuchten Stacks

Es erfolgen Stromsprünge unterschiedlicher Beträge bei $t = 0$ s. Die Spannungsantwort der Brennstoffzelle als Reaktion auf diese Anregung im kurzzeitdynamischen Bereich ist in der Abbildung 4.7 ersichtlich. Der sofortige Einbruch der Zellspannung wird durch die inneren Widerstände hervorgerufen und folgt dem Ohm'schen Gesetz. Der darauffolgende abflachende Verlauf resultiert aus der Doppelschichtkapazität deren Zeitverhalten dem eines Kondensators entspricht. Die Einschwingzeit im kurzzeitdynamischen Bereich lag bei den Untersuchungen für alle Stromsprünge im Bereich von $\Delta t_{s,short} = 200 - 300$ ms, unabhängig von der Richtung des Stromsprunges.

Langzeitdynamisches Verhalten

Das langzeitdynamische Verhalten resultiert aus den sich ändernden thermodynamischen Eigenschaften des Systems. Die Änderung der Temperatur beispielsweise, die einen Einfluss auf das Zellpotential hat, erfolgt nicht unmittelbar auf den Stromsprung. Die Zeitkonstanten liegen im Bereich mehrerer Hundert Sekunden. Ein Effekt der ebenfalls der Langzeitdynamik zugeordnet werden kann, ist das Entstehen eines Über- bzw. Unterschwingens in der Spannungsantwort. Die Ursache hierfür ist die Trägheit der Reaktionsgase bzw. der Komponenten, die diese zur Verfügung stellen. Das langzeitdynamische Verhalten des in [EZ19] untersuchten Stacks ist auf eine Spannung von eins normiert in der nachfolgenden Abbildung 4.8 für mehrere Stromsprünge ersichtlich.

Ändert sich der Betrag der Stromstärke ändert sich auch der Bedarf der Reaktionsgase, um diesen Strom zu liefern. Erfolgt beispielsweise eine Verringerung der Stromstärke, ist zunächst noch ein Überschuss der Reaktanten an den Elektroden vorhanden, die Spannung steigt daher zunächst auf

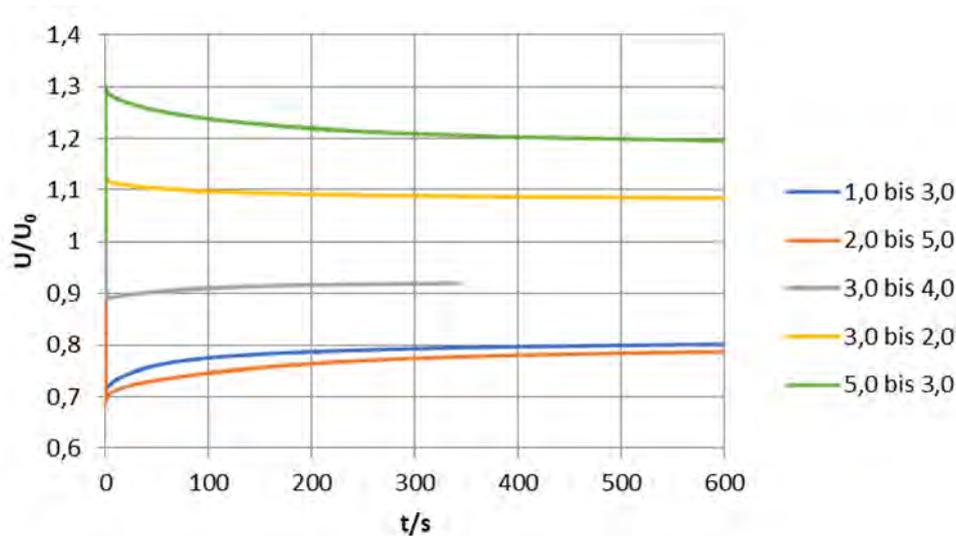


Abbildung 4.8: Auf die Ausgangsspannung normierter Spannungsverlauf im langzeitdynamischen Bereich des im Rahmen von [EZ19] untersuchten Stacks

einen höheren Betrag an (umgekehrt für eine positive Stromänderung), bevor sich der statische Zustand nach einiger Zeit eingeschwungen hat. Dieses Verhalten ist in 4.8 durch zunächst die sofortige Spannungsänderung durch das kurzzeitdynamische Verhalten (nicht in einer Abbildung gemeinsam auflösbar) ab $t = 0$ s ersichtlich, von dem aus sich dann das Überschwingen für negative Stromsprünge ΔI einstellt und umgekehrt ein Unterschwingen für positive Stromsprünge. In den Untersuchungen von [EZ19] konnte gezeigt werden, dass die Einschwingzeit im langzeitdynamischen Bereich von der Startstromstärke und dem Betrag des Stromimpulses abhängt. Der untersuchte Stack verfügt über keine aktive Stackkühlung, weshalb das langzeitdynamische Verhalten der Stackspannung auch der sich mit der Stromstärke ändernden Zelltemperatur unterliegt. Der abgebildete Verlauf bildet eine Überlagerung der beiden erläuterten langzeitdynamischen Effekte ab. Im Modell wird das Nacheilen der Reaktionsgase durch die modellierte Versorgung der Brennstoffzelle mit Luft durch einen Kompressor im Kapitel 4.5.3 berücksichtigt. Der Einfluss der Stacktemperatur wird neben der Berechnung der temperaturabhängigen Nernst-Spannung auch durch die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Komponenten des Ersatzschaltbildes berücksichtigt, was im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch beschrieben wird.

Das im gesamten resultierende dynamische Verhalten der Brennstoffzelle ist eine Überlagerung dieser kurz- und langzeitdynamischer Effekte. In folgendem wird die modelltechnische Umsetzung des Betriebsverhaltens der Brennstoffzelle beschrieben.

Die Simulation elektrochemischer Systeme erfolgt oft über so genannte elektrische Ersatzschaltbilder (engl. Electrical Equivalent Circuit Model, kurz ECM). Dabei handelt es sich um elektrische Bauteile (Widerstände, Kondensatoren, Spulen, Dioden usw.), welche derart miteinander verschaltet sind, dass sie das Verhalten des elektrochemischen Systems abbilden. Dabei kommt es besonders auf die Parametrisierung dieser elektrischen Bauteile an. Sie sind in der Regel nicht konstant, sondern abhängig von Systemparametern wie den Temperaturen oder Drücken, und sind damit auch von den dynamischen Effekten, denen diese Größen unterliegen, betroffen. In der vorangegangenen Arbeit [EZ19] erfolgte ein Überblick über ECM Brennstoffzellenmodelle aktueller wissenschaftlicher Veröffentlichungen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Ersatzschaltbild entwickelt und durch Prüfstandsversuche parametrisiert. Das Verfahren zur Parametrisierung wird darin ebenfalls thematisiert. In der Arbeit von [Pag07]

werden weitere Verfahren zur Parametrisierung von Ersatzschaltbildern für PEM-Brennstoffzellen erläutert. Ein physikalische Ersatzschaltbild nach [LD11], das in Abbildung 4.9 dargestellt ist, lässt sich durch die Struktur der elektrischen Bauteile direkt auf die Brennstoffzelle beziehen. Die beiden

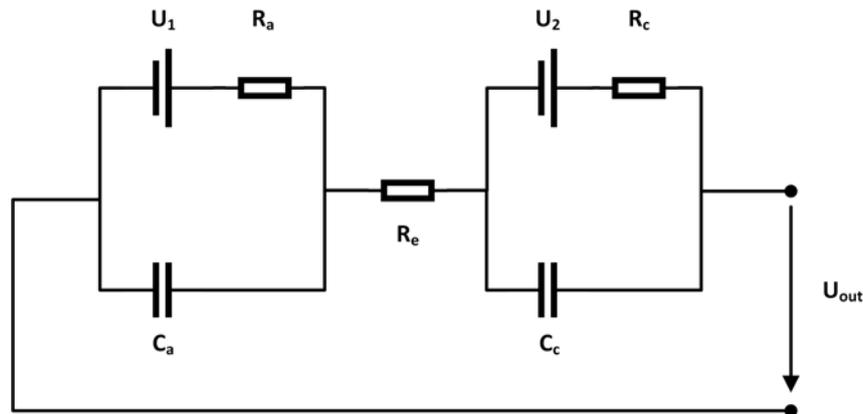


Abbildung 4.9: Physikalisches ECM Modell nach [LD11]

parallelen Stromkreise können als Anode und Kathode interpretiert werden und der lineare Widerstand R_e bildet die begrenzte Ionenleitfähigkeit des Elektrolyten zwischen den Elektroden ab. Die Spannungsquellen von Anode und Kathode simulieren das jeweilige Elektrodenpotential, das durch die dazu in Reihe geschalteten Widerstände reduziert wird. Durch die Parallelschaltung der Kondensatoren kann die Ausbildung der Doppelschichtkapazität berücksichtigt werden. Da es sich bei den Widerständen um konstante lineare Widerstände handelt, werden keine nicht-linearen Effekte wie die Aktivierungsüberspannungen berücksichtigt. Die Größen dieses Ersatzschaltbildes können durch eine Stromimpulsanalyse oder Impedanzspektroskopie bestimmt werden.

Verzichtet man auf die örtliche Auflösung kann ein reduziertes Ersatzschaltbild abgeleitet werden. Das in 4.10 abgebildete ECM wird sehr häufig in der Literatur verwendet und wird auch im Rahmen dieser Modellbildung Anwendung finden. Auf welchen Annahmen die Modellreduzierung beruht kann in [Hau07] nachvollzogen werden.

Die Spannungsquelle U_1 repräsentiert die offene Klemmspannung der Brennstoffzelle, die nach der Nernst-Gleichung 2.6 bestimmt wird. Diese Spannung ist folglich abhängig von den Prozessparametern Temperatur, Partialdruck des Wasserstoffs und Sauerstoffpartialdruck.

Die modelltechnische Umsetzung zur Berechnung der ECM-Parameter (R_a R_c R_r) basiert auf der Arbeit von J.T. Pukrushpan [Puk03]. In dieser Arbeit werden ausführliche Messreihen einer PEM-Brennstoffzelle für automobiler Anwendungen analysiert, um empirische Gleichungen zu entwickeln und so zu parametrisieren, dass sie die Messdaten widerspiegeln. Die Messreihen auf denen die empirischen Größen basieren, werden im Anhang dargestellt. Es handelt sich dabei um Polarisationskurven, Strom-Spannungskennlinien, der untersuchten Brennstoffzelle für verschiedene Drücke und Temperaturen. Das Verfahren, das dazu angewendet wird die Gleichungen auf diese Messdaten zu „fitten“ (abzubilden), ist die Nicht-lineare Regression. Es handelt sich dabei um ein mathematisches Verfahren, das auf dem Datenfitting mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate basiert. Es kann beispielsweise in Matlab durchgeführt werden. Matlab verfügt dazu über eine Curve-fitting Toolbox oder die Funktion „lsqcurvefit“.

Die Aktivierungsüberspannungen können, wie im Grundlagenkapitel zur Brennstoffzelle 2.1 beschrieben, durch die Tafelgleichung angenähert werden. Da diese nur für Stromdichten $i > i_0$ gültig ist wird eine Funktion gesucht, die das gesamte Spektrum an Stromdichten abbildet. Eine Gleichung

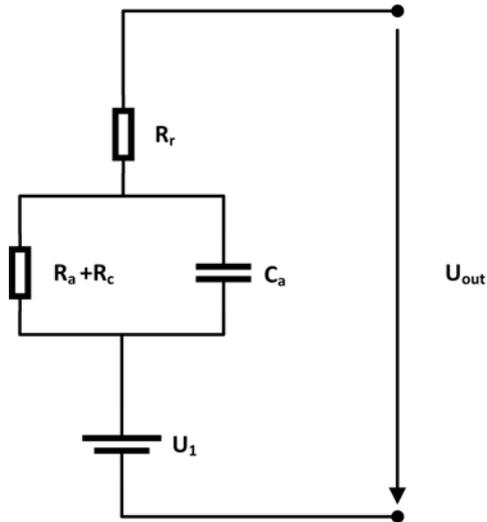


Abbildung 4.10: reduziertes Physikalisches Ersatzschaltbild

dieser Art ist Gleichung 4.13:

$$\eta_{Akt} = v_0 + v_a * (1 - \exp(-c_1 * i)) \quad (4.13)$$

das Datenfitting dieser Gleichung ergibt für die Parameter v_0 und v_a und die folgenden Abhängigkeiten von Drücken(in bar) und Temperaturen (in Kelvin):

$$v_0 = v_{01} - v_{02} * (T_{FC} - 298,15) + v_{03} * T_{FC} * \left(\ln \frac{p_{Kathode} - p_{sat}}{1,01325} + 0,5 * \ln \frac{v_0 p * (p_{Kathode} - p_{sat})}{1,01325} \right) \quad (4.14)$$

$$v_a = v_{a1} * T_{FC} + v_{a2} * \left(\frac{p_{O_2}}{v_{ap}} + p_{sat} \right)^2 + v_{a3} * T_{FC} - v_{a4} * \left(\frac{p_{O_2}}{v_{ap}} + p_{sat} \right) + v_{a5} * T_{FC} + v_{a6} \quad (4.15)$$

Die darin enthaltenen empirischen Größen zur Berechnung des Aktivierungswiderstandes sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Zur Anwendung im ECM-Modell muss noch das Ohm'sche Gesetz angewendet

Tabelle 4.2: empirische Konstanten Aktivierungswiderstand

Parameter	Wert
v_{01}	0,279
v_{02}	$8,5 * 10^{-4}$
v_{03}	$4,08 * 10^{-5}$
v_{0p}	0,1173
v_{a1}	$-1,618 * 10^{-5}$
v_{a2}	$1,618 * 10^{-2}$
v_{a3}	$1,8 * 10^{-4}$
v_{a4}	0,16
v_{a5}	$-5,8 * 10^{-4}$
v_{a6}	0,5736
v_{ap}	0,1173
c_1	10

werden um Gleichung 4.13 als Widerstand auszudrücken.

$$R_a = \frac{v_0 + v_a * (1 - \exp(-c_1 * i))}{i} \quad (4.16)$$

Der Ohm'sche Widerstand des ECM-Modells repräsentiert die begrenzte Ionenleitfähigkeit des Elektrolyten sowie die internen Widerstände der Zelle. Dabei folgt er dem Ohm'schen Gesetz. Die Ohm'sche Überspannung die am Widerstand R_R abfällt ist:

$$\eta_{Ohm} = i * R_R \quad (4.17)$$

Der Ohm'sche Widerstand selbst ist stark von der Leitfähigkeit des Elektrolyten $\sigma_{Membran}$ abhängig. Die empirische Gleichung die den Ohm'schen Widerstand, $[R_R] = \Omega \text{ cm}^2$, abbildet ist Gleichung 4.18. Darin ist $d_{Membran}$ die Abmessung der Membran und liegt für die modellierte Brennstoffzelle bei $d_{Membran} = 0,0128 \text{ cm}$ [Puk03], vereinfacht ist es der geometrische Abstand zwischen den Elektroden.

$$R_R = \frac{d_{Membran}}{\sigma_{Membran}} \quad (4.18)$$

Die Leitfähigkeit der Membran wiederum ist von ihrer Befeuchtung $\lambda_{Membran}$ und der Zelltemperatur T_{FC} abhängig. Die Membranfeuchtigkeit $\lambda_{Membran}$ variiert zwischen $\lambda_{Membran} = 0 - 14$. Für 0 ist keine Feuchtigkeit vorhanden, bei 14 ist die Membran komplett gesättigt und der Ohm'sche Widerstand minimal [Spr91] [Bar13]. Da im Rahmen dieser Modellbildung noch kein Membranfeuchtigkeitsmodell integriert ist wird sie als konstant angenommen. Für die durchgeführten Simulationen wurde Sie mit einer 60% Befeuchtung angenommen was einem $\lambda_{Membran} = 8,4$ entspricht. Die Leitfähigkeit lässt sich durch die empirische Gleichung aus [Puk03] bestimmen.

$$\sigma_{Membran} = b_{11} * \lambda_{Membran} - b_{12} * \exp(b_2 * (1/303 - 1/T_{FC})) \quad (4.19)$$

Die zugehörigen empirischen Konstanten wurden für eine *NAFION 117* [Bar13][Spr91] Membran bestimmt, sie lauten:

Tabelle 4.3: empirische Konstanten Ohm'sche Überspannungen

Parameter	Wert
b_{11}	0,279
b_{12}	$8,5 * 10^{-4}$
b_2	$4,08 * 10^{-5}$

Konzentrationsüberspannungen treten erst bei höheren Stromdichten auf. Im Grundlagenkapitel wurde eine analytische Gleichung zur Berechnung der Konzentrationsüberspannungen vorgestellt, in welcher die Bestimmung der limitierenden Stromdichte i_{max} jedoch offen bleibt. In einem realen System vermeidet man es die Brennstoffzelle im Bereich der Konzentrationsüberspannungen zu betreiben, da dies die Zelle schädigen kann. In der Arbeit von [Puk03] wird eine empirische Gleichung angegeben die ebenfalls die limitierende Stromdichte verwendet deren Wert ist jedoch für die in der Arbeit untersuchte Zelle angegeben (siehe Tabelle 4.4) Die besagt Gleichung lautet:

$$\eta_{Konz} = i * (c_2 + \frac{i}{i_{max}}) c_3 \quad (4.20)$$

Für die darin enthalten Größe c_2 erfolgt eine Fallunterscheidung Anhand des Sauerstoffpartialdruckes und dem Sättigungsdampfdruck bei Brennstoffzellentemperatur. Für $\frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat} < 2$ ist c_2

$$c_2 = (c_{21} * T_{FC} + c_{22}) (\frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat}) + c_{23} * T_{FC} + c_{24} \quad (4.21)$$

Für $\frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat} > 2$ ist c_2

$$c_2 = (c_{25} * T_{FC} + c_{26}) \left(\frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat} \right) + c_{27} * T_{FC} + c_{28} \quad (4.22)$$

Die empirischen Konstanten die in den Gleichungen 4.20, 4.21 und 4.22 zur Bestimmung der Konzentrationsüberspannung vorkommen sind in Tabelle 4.4 aufgelistet. Zur Verwendung im ECM-Modell

Tabelle 4.4: empirische Konstanten Ohm'sche Überspannungen

Parameter	Wert
i_{max}	2,2
c_{21}	$7,16 * 10^{-4}$
c_{22}	-0,622
c_{23}	$-1,45 * 10^{-3}$
c_{24}	1,68
c_{25}	$8,66 * 10^{-5}$
c_{26}	-0,068
c_{27}	$-1,6 * 10^{-4}$
c_{28}	0,54
c_3	2

wird Gleichung η_{Konz} noch nach dem Ohm'schen Gesetz durch die Stromdichte geteilt. Durch die vorgestellten Gleichungen und Parameter kann das ECM-Modell nach Abbildung 4.10 aufgebaut werden. Zum Realisieren wird das Schaltbild in Gleichungen übersetzt die es beschreiben. Die Differentialgleichung für das Verhalten eines RC-Elements wird auch im Kapitel 4.6 nochmals thematisiert, sie basiert auf dem Ohm'schen Gesetz, den Kirchhoff'schen Regeln und dem Aufladeverhalten eines Kondensators. Eine ausführliche Herleitung findet sich beispielsweise in der vorangegangenen Arbeit [EZ19]. Für das gesamte ECM-Modell lässt sich die Klemmspannung U_{out} wie folgt berechnen:

$$U_{out} = U_1 - \eta_{Ohm} - \frac{1}{C_a} * \int \left(I - \frac{U_{R_a+R_c}}{(R_a + R_c)} \right) dt \quad (4.23)$$

Die in 4.23 verwendeten Größen sind durch die beschriebenen empirischen Zusammenhänge bekannt. Es gilt jedoch noch die Kapazität C_a zu bestimmen. In [Puk03] wird für das RC-Element mit extrem kleinen Zeitkonstanten gerechnet ($\tau_{RC} = 10^{-19}s$) und es wird daher vernachlässigt. Die Untersuchungen von [Hau07] und auch die Messreihen der vorangegangenen Arbeit [EZ19] haben zwar auch kleine Zeitkonstanten ermittelt, die daraus resultierenden Kapazitäten werden aber trotzdem bestimmt und weiter berücksichtigt. Ein Verfahren um die Kapazität zu bestimmen wird in [EZ19] vorgestellt. Zur Durchführung wird eine hochaufgelöste Messung der Spannungsantwort (wie in Abbildung 4.7) auf einen Stromimpuls benötigt, aus deren Verlauf die Zeitkonstante bestimmt werden kann. Der Zusammenhang der Zeitkonstanten eines RC-Elements und den Beträgen von Widerstand und Kapazität ist:

$$\tau_{RC} = (R_a + R_c) * C = \frac{1}{5} * \Delta t_{s,short} \quad (4.24)$$

Der Faktor $\frac{1}{5}$ beruht auf dem charakteristischen, exponentiellen Verlauf beim Laden eines Kondensators. Nach einer Zeitkonstanten τ_{RC} ist ein Kondensator zu 63% geladen. Auf Grund des exponentiellen Verlaufs erreicht er nie den Zustand vollständiger Ladung. Nach fünf Zeitkonstanten $5 * \tau_{RC}$ ist er jedoch bereits zu 99% geladen, weshalb man annimmt, dass er ab diesem Zeitpunkt kein Zeitverhalten mehr auf die Schaltung ausübt. In den vorangegangenen Messreihen konnten Einschwingzeiten $\Delta t_{s,short}$ im Bereich 200–300ms ermittelt werden. Unter dieser Erkenntnis und Anwendung von Gleichung 4.24 lässt sich die Kapazität berechnen. Gleichung 4.24 ist mit der in [EZ19] bestimmten Zeitkonstanten von $\tau_{RC} = 0,06s$ im Modell dieser Arbeit hinterlegt. Im Rahmen einer späteren Parametrisierung des

Modells auf den neuen Hybridprüfstand ist die Zeitkonstante erneut zu bestimmen und auf Einflüsse der Prozessparameter zu untersuchen.

Die elektrische Leistung der Brennstoffzelle kann als Produkt aus Strom und Spannung bestimmt werden. Die Spannung für eine Einzelzelle wird durch die ECM abbildende Gleichung 4.23 berechnet. Für einen Brennstoffzellenstack aus N seriell verschalteten Einzelzellen beträgt die elektrische Leistung:

$$P_{el,Stack} = N * I * U_{out,FC} \quad (4.25)$$

Das Modell und besonders die Parameterdateien aus [Puk03] wurden für die Umsetzung in dieser Arbeit vor allem deshalb gewählt, da zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit keine eigenen Untersuchungen an einem Brennstoffzellensystem möglich waren. Den sich aktuell in der Entwicklung befindliche Hybridversuchsprüfstand abzubilden erfordert eine Parametrisierung durch ausführliche Messreihen. Dies und die Bestimmung der empirischen Parameter durch Regressionsverfahren ist Gegenstand einer späteren Arbeit.

4.5.2 Wasserstoffversorgung

Die Versorgung der Anode mit Wasserstoff erfolgt in der mobilen Anwendung üblicherweise wie in der nachstehenden Abbildung 4.11 ersichtlich aus einem Wasserstoffspeicher. Da Wasserstoff eine sehr geringe Dichte aufweist muss er zur Speicherung entweder stark gekühlt oder unter hohem Druck gespeichert werden. Für Laboranwendungen ist eine direkte Versorgung aus einem Elektrolyseur denkbar oder eine Kombination aus beidem. Zur Simulation der Brennstoffzelle müssen Kenntnisse über die Eigenschaften des in die Anode einströmenden Gasgemisches aus Wasserstoff und Wasser vorliegen, welche in diesem Kapitel definiert werden sollen.

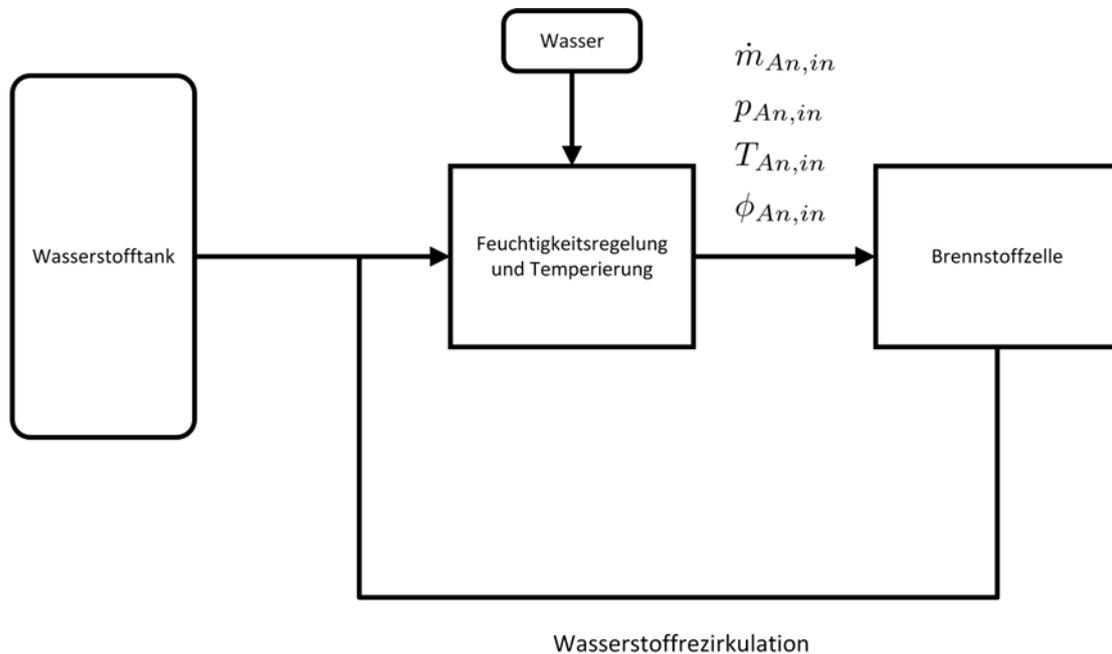


Abbildung 4.11: Wasserstoffversorgung

Der der Brennstoffzelle zugeführte Wasserstoff entspricht in der Regel einem Vielfachen des benötigten Wasserstoffs, um auch bei abrupten Lastwechseln sofort ausreichend Wasserstoff zur Verfügung zu haben. Die Anode verlässt demnach unverbraucher Wasserstoff. Um keinen unnötigen Wasserstoff zu verbrauchen, führt man den Überschusswasserstoff zurück und mischt ihn dem vor den Konditionie-

rungseinheiten bei. Dabei handelt es sich um eine Einheit zur Gewährleistung einer vorgegebenen relativen Feuchtigkeit $\varphi_{An,in}$. Zum Erreichen dieser Feuchtigkeit kann es notwendig sein, Wasser hinzuzufügen oder auch Wasser abzuscheiden. In der Realität müssen derartige Kreisläufe von Zeit zu Zeit durchspült werden um eingetragenes Wasser abzuscheiden. Da in dieser Erstmodellierung kein Eintrag von Wasser über die Membran erfolgt werden auch keine Anodenspülungen benötigt. Das Gasgemisch wird neben der Befeuchtung auch auf eine vorgegebene Temperatur $T_{An,in}$ konditioniert. Sowohl die relative Feuchtigkeit wie auch die Temperatur sind in dieser Arbeit als Platzhaltermodelle realisiert. Das bedeutet in diesem Fall, dass es sich bei den Größen um direkte Eingabeparameter in das Modell handelt. Es wird die Annahme getroffen, dass das aus der Anode ausströmende Gasgemisch die Temperatur der Brennstoffzelle angenommen hat (s. Gleichung 4.26). Auf die Brennstoffzellentemperatur wird in Kapitel 4.5.5 eingegangen.

$$T_{An,out} = T_{FC} \quad (4.26)$$

Der benötigte Wasserstoffmassenstrom lässt sich über das Faraday-Gesetz in Abhängigkeit der Zellanzahl N und der Stromstärke I bestimmen, da bei der Reaktion pro mol $z = 2$ Elektronen frei werden, ergibt sich der Stoffmengenstrom des umgesetzten Wasserstoffs nach:

$$\dot{n}_{H_2,an,used} = \frac{N * I}{z * F} = \frac{N * I}{2 * F} \quad (4.27)$$

Der insgesamt an Wasserstoff zugeführte Stoffmengenstrom lässt sich über den Überschussfaktor λ_{H_2} bestimmen. Die Differenz aus zugeführtem und verbrauchtem Wasserstoff verlässt die Anode unverbraucht:

$$\dot{n}_{H_2,an,out} = \dot{n}_{H_2,an,in} - \dot{n}_{H_2,an,used} = \dot{n}_{H_2,an,used} * \lambda_{H_2} - \dot{n}_{H_2,an,used} = (\lambda_{H_2} - 1) * \dot{n}_{H_2,an,used} \quad (4.28)$$

Um Schädigungen der Membran zu vermeiden sollte kein Druckunterschied zwischen Anode und Kathode vorliegen. Aus diesem Grund wird der Druck des in die Anode einströmenden Gases dem Druck, welcher in die Kathode einströmt, gleichgesetzt. In einem realen System erreicht man dies durch Regelung des Wasserstoffmassenstroms aus dem Wasserstofftank durch ein Ventil, wodurch sich der Überschussfaktor ändert. Innerhalb dieser Arbeit wird er als konstant angenommen und ist somit eine Eingangsgröße in das Modell. Wie sich der Druck des in die Kathode einströmenden Gases zusammensetzt wird im nachfolgenden Kapitel zu Beschreibung der Luft-Ansaugstrecke erläutert.

Für den Partialdruck des Wassers gilt anodenseitig

$$p_{H_2O,an,in} = p_{sat}(T_{An,in}) * \varphi_{an,in} \quad (4.29)$$

Weiterhin gilt der Zusammenhang für ideale Gase:

$$p_{an,in} = p_{H_2O,an,in} + p_{H_2,an,in} \quad (4.30)$$

Es wird davon ausgegangen, dass sich auf Grund der Feuchtigkeitsregelung kein flüssiges Wasser im Anodenkanal befindet. Die Eingangsgröße der relativen Feuchtigkeit ist damit auf maximal 1 (vollständig gesättigt) limitiert. Da das austretende Gasgemisch die Temperatur der Brennstoffzelle angenommen hat, die höher liegt als die des einströmenden Gases, kann davon ausgegangen werden, dass sich kein flüssiges Wasser in der Anode bildet oder diese verlässt. Die Tatsache, dass im Rahmen dieser Erstmodellierung auch kein Masseneintrag von Wasser über die Membran erfolgt bekräftigt die Annahme, dass das Gasgemisch stets ungesättigt ist. Durch diese Annahme lässt sich weiterhin festhalten, dass

der einströmende Wasserstoffmengenstrom \dot{n}_{H_2O} dem ausströmenden entspricht. Dieser lässt sich über den Zusammenhang von Stoffmengenstrom zu Partialdruck $\frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{Gesamt}} = \frac{p_i}{p_{Gesamt}}$ für ideale Gase bestimmen.

$$\dot{n}_{H_2O,an,in} = \dot{n}_{H_2O,an,out} = \dot{n}_{an,in} * \frac{p_{H_2O,in}}{p_{an,in}} = \dot{n}_{an,in} * \frac{\varphi_{an,in} * p_{sat}(T_{an,in})}{p_{an,in}} \quad (4.31)$$

Für den insgesamt einströmenden Stoffmengenstrom $\dot{n}_{an,in}$ gilt:

$$\dot{n}_{an,in} = \dot{n}_{an,H_2,in} + \dot{n}_{H_2O,an,in} \quad (4.32)$$

und:

$$\dot{n}_{an,in} = \dot{n}_{an,H_2,in} * \frac{p_{an,in}}{p_{H_2,in}} = \dot{n}_{an,H_2,in} * \frac{p_{an,in}}{p_{an,in} - p_{H_2O,an,in}} \quad (4.33)$$

Durch die Gleichungen 4.27 bis 4.33 lassen sich alle Stoffmengenströme bestimmen. Ebenso sind durch sie die Drücke am Eingang der Anode definiert. Zur vollständigen Bilanzierung können, wenn diese auch nicht weiter im Modell benötigt werden, die Drücke am Auslass der Anode bestimmt werden. Für den Partialdruck von Wasser gilt analog zu Gleichung 4.29 am Auslass:

$$p_{H_2O,an,out} = p_{sat}(T_{An,out}) * \varphi_{an,out} \quad (4.34)$$

Durch den Zusammenhang von Stoffmengenstrom zu Partialdruck von idealen Gasen gilt für den Druck am Auslass der Anode:

$$p_{an,out} = p_{H_2O,an,out} * \frac{\dot{n}_{an,out}}{\dot{n}_{H_2O,an,out}} \quad (4.35)$$

Der Partialdruck des Überschusswasserstoffes ergibt sich als Differenz aus dem Gesamtdruck und dem Wasserpartialdruck:

$$p_{H_2,an,out} = p_{an,out} - p_{H_2O,an,out} \quad (4.36)$$

4.5.3 Ansaugtrakt der Reaktionsluft

Um einen korrekten Betrieb der Brennstoffzelle gewährleisten zu können ist es von Bedeutung, die Kathode mit ausreichend Sauerstoff zu versorgen. Üblicherweise verwendet man, vor allem für automobiler Anwendungen, die Umgebungsluft als Sauerstoffträger. Dabei erfüllt der Ansaugtrakt nicht nur die Funktion der Zuführung von Reaktionsluft, sondern auch die ihrer Konditionierung. Neben dem Luftmassenstrom spielen daher die Temperatur und deren Gehalt an Wasserdampf eine wesentliche Rolle. Bei diesen Größen handelt es sich auch um die gängigen Regelgrößen in diesem Teilmodell. Das Zusammenspiel der erwähnten Größen führt zur ausreichenden Versorgung der Kathode mit Sauerstoff, der Aufrechterhaltung eines günstigen Betriebsdruckes sowie einer Befeuchtung der Membran und somit insgesamt zu einer hohen Effizienz. In diesem Kapitel sollen die Gleichungen, welche zur Umsetzung der Modellierung des Luftansaugtraktes verwendet werden, vorgestellt werden. Das Modell des Ansaugtraktes besteht aus drei Submodellen:

- Kompressor
- Ladeluftkühler
- Befeuchtung

Die einzelnen Submodelle sind wie in Abbildung 4.12 ersichtlich angeordnet. Die Abbildung gibt zudem Aufschluss über die in folgendem verwendeten Parameterbezeichnungen.

Kompressor

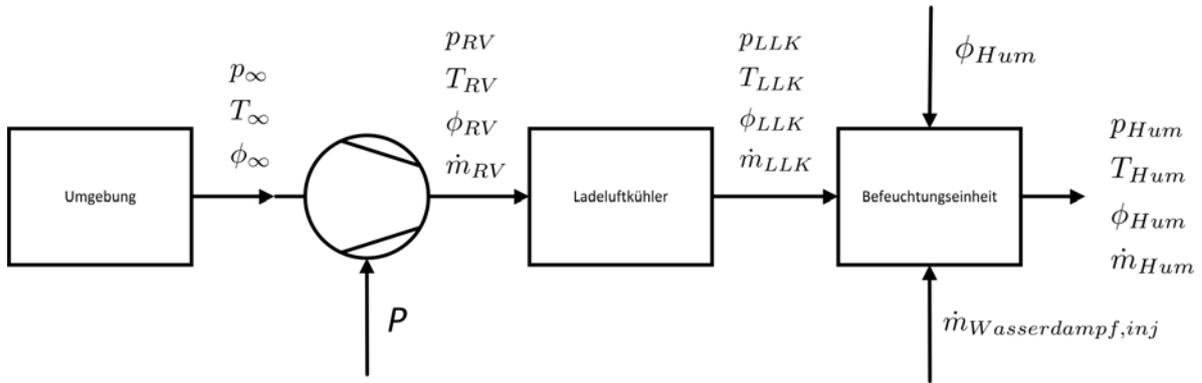


Abbildung 4.12: Ansaugtrakt der Brennstoffzelle

Die Berechnung des Kompressorteilmodells basiert auf Grundgleichungen der Thermodynamik sowie der Mechanik und Dynamik rotierender Massen, um einen dynamischen Effekt des Kompressors zu berücksichtigen. Der Kompressor wird von einem Elektromotor angetrieben. Die Versorgungsspannung des Elektromotors ist die Stellgröße des Submodells.

Um einen Kompressor und dessen Antrieb modellieren zu können, muss er zunächst charakterisiert werden. Eine Abschätzung der benötigten Kompressorleistung wird in [HA08] mit $k = 15 - 20\%$ der Brennstoffzellenstackleistung angegeben. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit System zur Anwendung im Modell-Kraftfahrzeug liegt die Leistung der Brennstoffzellenstacks im Bereich von $P_{FC} = 50\text{kW}$. Folglich lässt sich die Größenordnung der Kompressorleistung abschätzen. Diese liegt im Bereich von $P_{Kompressor} = 7,5 - 10\text{kW}$. Im Kapitel 4.5.6 wird nochmals auf diesen Zusammenhang eingegangen. In Fahrzeuganwendungen kommen zur Verdichtung der Ansaugluft bei Brennstoffzellenfahrzeugen genauso wie bei Antrieben mit aufgeladenen Verbrennungsmotoren Radialverdichter (in folgendem Abgekürzt mit dem Indize RV) zum Einsatz, deren Kennfeld für Brennstoffzellen jedoch im Bereich kleinerer Massendurchsätze liegt [DD14]. Im Rahmen dieser Erstmodellierung des Brennstoffzellensystems wird ein Kompressor des Herstellers *AlliedSignal* verwendet, dessen Kompressorkennfeld nachfolgend abgebildet ist. In [CHMF99] sind die zugehörigen Kenndaten des Kompressors zu finden.

Häufig werden Kompressoren durch Kennfelder abgebildet. Bei diese Art der Modellierung muss zwischen Messdaten interpoliert oder weitere Kennfeldbereich extrapoliert werden. Es wird daher vorgeschlagen die Kennfelder durch nicht-lineare Kurvenanpassung abzubilden. In [Moraal] werden Methoden aufgezeigt, welche dieses Vorgehen genauer beschreiben. Eine dieser Methoden ist das Verfahren nach Jensen und Kristensen, welches in [PSP05] auf das abgebildete Kompressorkennfeld angewandt wurde. In der Arbeit finden sich ebenfalls die Koeffizienten aus der nichtlinearen Regression, welche auch in dieser Arbeit verwendet wurden. Eine Modellierung nach dieser Art ist nicht zwingend erforderlich, alternativ führt auch die Integration des Kennfeldes als Lookup-Table Objekt in diesem Zusammenhang zu zufriedenstellenden Ergebnisse. Bei einer späteren Parametrisierung auf das Prüfstandssystem sind beide Varianten denkbar. Eine weitere Möglichkeit wäre die Verwendung des „Compressor“ innerhalb von Simulink, welcher beispielsweise in der „Powertrain“ Bibliothek enthalten ist. Der Block bietet die Möglichkeit Kennfelddaten einzulesen und so den gewünschten Kompressor abzubilden. Außerdem sind alle Gleichungen, welche in folgendem beschrieben werden, bereits enthalten. Im Kennfeld sind die Drehzahlen aufsteigend abgebildet. Bei den Drehzahlkurven sowie dem Massenstrom handelt es sich jeweils um korrigierte Größen. Es gilt für den Massenstrom

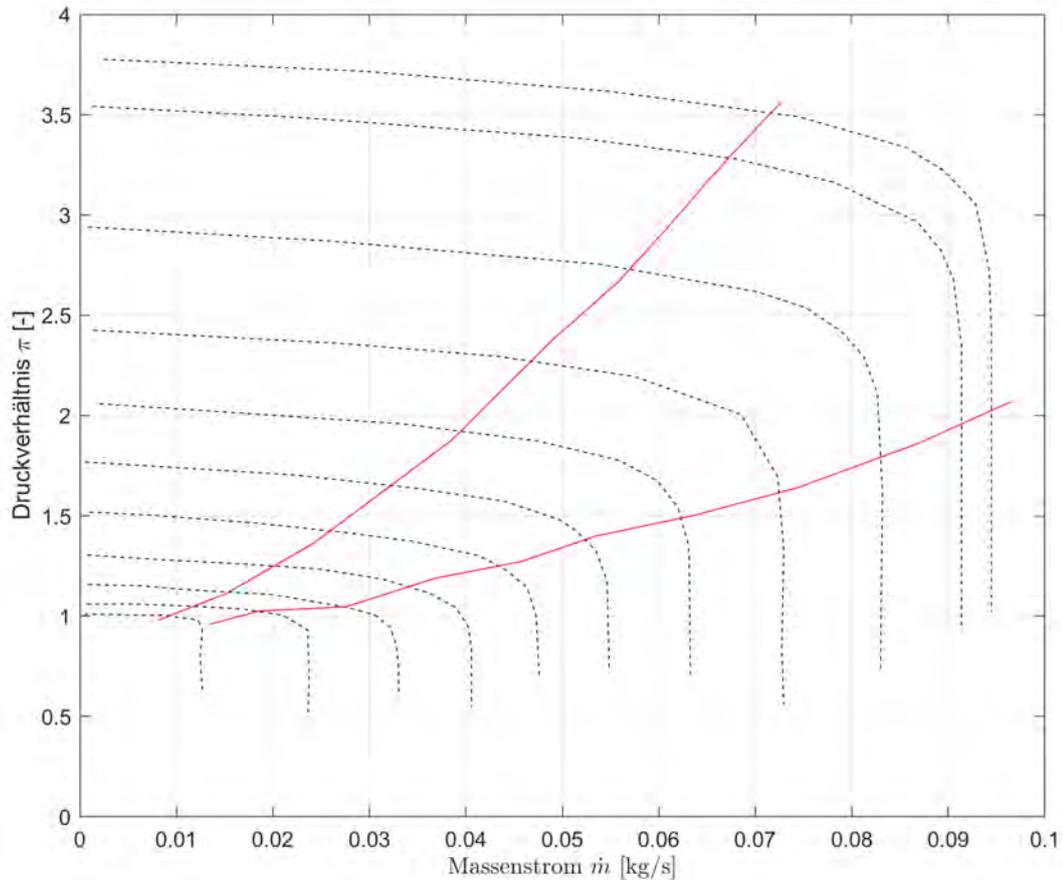


Abbildung 4.13: Kennfeld des Allied Signal Kompressors nach [CLGA⁺17]

$\dot{m}_{in,cor} = \dot{m} * \sqrt{\Theta}/\delta$, worin $\Theta = T_{in}/T_{Referenz}$ die zur Kennfeld-Referenztemperatur korrigierte Temperatur und $\delta = p_{in}/p_{Referenz}$ der korrigierte Druck ist. Die korrigierte Drehzahl ist definiert als $n_{cor} = n_{Kompressor}/\sqrt{\Theta}$. Um den jeweiligen Massenstrom aus dem Kennfeld bestimmen zu können, werden die Drehzahl sowie das Druckverhältnis π benötigt. Die Drehzahl lässt sich durch die später in diesem Kapitel aufgeführte Differentialgleichung 4.43 bestimmen. Unter Verwendung von Massenerhaltungsgleichungen für die jeweiligen Einzelkomponenten im Kathodenansaugtrakt und dem Strömungskanal der Kathode selbst sowie der Berücksichtigung von Druckänderungen kann man das zum jeweiligen Lastzustand benötigte Druckverhältnis bestimmen. In diesem Zusammenhang werden weitergehende Kenntnisse über die Geometrie der Komponenten benötigt und es müssen Differentialgleichungen für die Erhaltungssätze der einzelnen Komponenten gelöst werden. Über das Zusammenfassen der Einzelkomponenten zu einem Kontrollvolumen vereinfacht sich diese Berechnung. Ein wesentlicher Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass dadurch die Gasdynamik berücksichtigt wird. Die notwendigen Gleichungen um diese Effekte mit einzubeziehen sind Massenerhaltungs- sowie Energieerhaltungssätze und die ideale Gasgleichung. In [GBM13] werden die Gleichungen für den Anwendungsfall zusammengestellt und auch beispielhaft für ein *NEXA* Brennstoffzellensystem angewendet. Im Rahmen dieser Erstmodellierung soll jedoch auf dieses Vorgehen verzichtet werden, da es auf Grund der unbekanntenen Systemeigenschaften des Zielsystems nicht gewinnbringend ist bzw. die Anzahl der ohnehin schon vielen zu treffenden Annahmen noch weiter erhöht. Um den Aufwand zu reduzieren soll

an dieser Stelle eine Vereinfachung entwickelt werden. Problematisch bei der Vernachlässigung dieser Effekte ist jedoch, dass das Druckverhältnis über den Kompressor zu einer Eingangsgröße des Modells wird. Folglich muss das Druckverhältnis π bestimmt werden. Zu diesem Zweck sind mehrere Varianten denkbar. Die einfachste Möglichkeit ist die Vorgabe eines konstanten Druckverhältnisses, sodass man davon ausgehen kann, dass der Kompressor immer einen ausreichend hohen Sauerstoffmassenstrom bereitstellt. Das führt dazu, dass die elektrochemische Reaktion nicht durch mangelnden Sauerstoff beschränkt wird. Wesentliche Nachteile sind allerdings, dass die gesamte Dynamik des Kompressor selbst verloren geht, sodass die Modellierung desselben letztlich nicht notwendig ist. Außerdem handelt es sich beim Kompressor um den größten Nebenverbraucher eines Brennstoffzellensystems, sodass unnötig viel Energie für dessen Betrieb aufgewendet werden muss, wenn man diese hohen Massenströme bzw. Druckverhältnisse auch in Bereichen niedriger Last anfordert. Eine Alternative wäre die Integration einer Lambdaregelung, durch welche das Druckverhältnis so geregelt wird, dass sich ein konstanter vorgegebener Sauerstoffüberschussfaktor λ_{O_2} einstellt. Eine weitere Möglichkeit, welche auch im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt wird, ist ein von der Stromstärke abhängiges Druckverhältnis. Es wird durch ein 1-D-Lookup Table Objekt ausgegeben, sodass es im Kennfeld innerhalb der Pump- und Schluckgrenzen bleibt. Da der Massenstrom proportional mit der Stromstärke steigt, verläuft auch das Druckverhältnis proportional zum Strom. Nachfolgend ist der gewählte Verlauf des Druckverhältnisses über der Stromstärke in Abbildung 4.14 dargestellt. Auf diese Weise kann ein übermäßiger Leistungsbedarf des Kompressors vermieden und trotzdem eine ausreichende Versorgung der Kathode mit Sauerstoff gewährleistet werden. Allerdings wird so noch kein dynamischer Effekte auf Grund der Massenträgheit der Luft berücksichtigt. Bei einer abrupten Laständerung, einem Sprung der Stromstärke, ändert sich sofort die Versorgungsspannung des Kompressormotors. Auf Grund dessen Trägheit stellt sich der neue Massenstrom erst verspätet ein. Das Gleiche gilt für das Druckverhältnis. Durch das Lookup-Table Objekt erfolgt die Einstellung jedoch unmittelbar. Um an dieser Stelle ebenfalls die Verzögerung zu berücksichtigen, wird eine Übertragungsfunktion zwischengeschaltet, sodass sich eine Änderung in der selben zeitlichen Verzögerung für das Druckverhältnis einstellt, die auch der Massenstrom benötigt um seinen neuen angepassten Betrag zu erreichen.

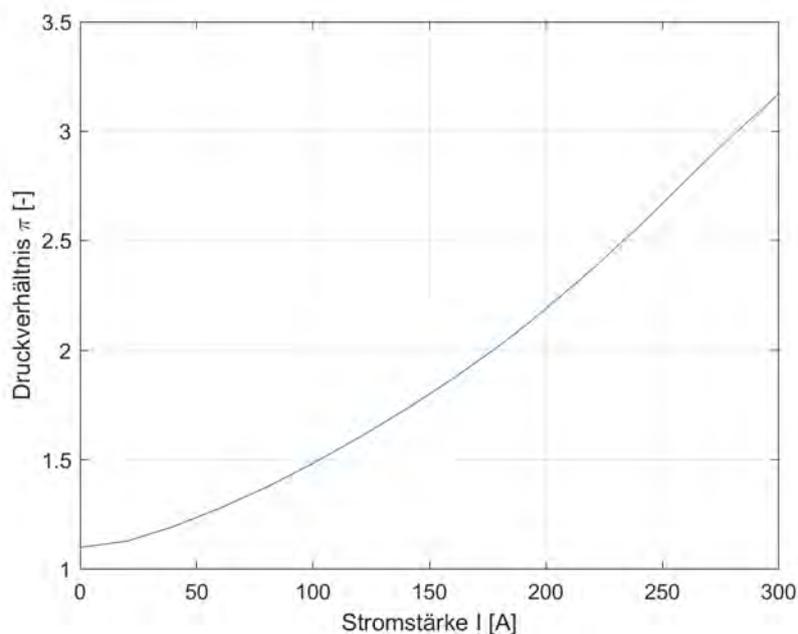


Abbildung 4.14: Druckverhältnis in Abhängigkeit der Stromstärke

Neben dem Kompressorkennfeld ist das zugehörige Wirkungsgradkennfeld aus [CLGA⁺17] bekannt. Es ist in Abbildung 4.15 ersichtlich und in dieser Weise in das Simulationsmodell als Lookup-Table Objekt integriert. Die Eingangsparameter sind der Massenstrom, welcher zuvor aus dem Kompressorkennfeld bestimmt wurde und das Druckverhältnis π über den Kompressor.

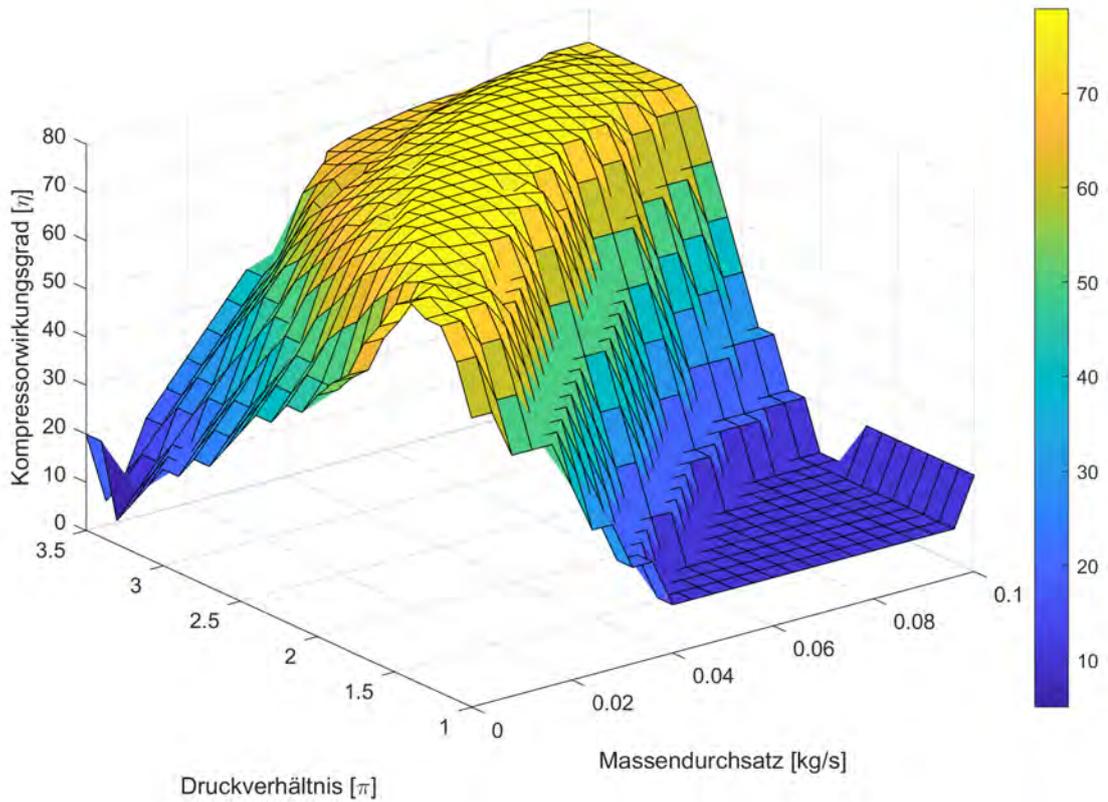


Abbildung 4.15: Wirkungsgradkennfeld des Allied Signal Kompressors nach [CLGA⁺17]

Unter Verwendung des Kompressorwirkungsgrades aus dem Kennfeld $\eta_{comp,s}$ sowie dessen Definition über den isentropen Wirkungsgrad

$$\eta_{comp,s} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (4.37)$$

und der Beziehung für die isentrope Verdichtung:

$$T_{2s} = T_1 * \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (4.38)$$

lässt sich durch Kombination und Umformung die Gleichung zur Bestimmung der Kompresso-raustrittstemperatur aufstellen $T_2 = T_{RV}$. Sie lautet folglich:

$$T_2 = \frac{T_1}{\eta_{comp,s}} * \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} + T_1 \quad (4.39)$$

Neben der Austrittstemperatur lässt sich weiterhin die zum Antrieb des Kompressors benötigte Leistung bestimmen. Der Zusammenhang zwischen der benötigten Leistung P zur Verrichtung der Arbeit w ist:

$$P = \dot{m} * w_{12} \quad (4.40)$$

Für einen Kompressor lässt sich die verrichtete Arbeit nach:

$$w_{comp,12} = c_p * \frac{T_1}{\eta_{comp,s}} * \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \quad (4.41)$$

bestimmen. Aus dem Gleichungen 4.40 sowie 4.41 sowie dem Zusammenhang von Leistung, Drehzahl und Drehmoment

$$P = 2\pi * n * M = M * \omega \quad (4.42)$$

lässt sich somit das zum Antrieb des Kompressors benötigte Drehmoment bestimmen. Und daraus über den mechanischen Wirkungsgrad $\eta_{mech} = 0,9$ auch die benötigte Leistung des Antriebsmotors. Um den dynamischen Effekt des Subsystems mit zu berücksichtigen wird der Zusammenhang zwischen den Antriebsmoment und der Änderung der Drehzahl über die nachstehende Differentialgleichung 4.43 berücksichtigt. Dabei handelt es sich um eine Grundgleichung aus dem Bereich elektrischer Antriebe. In der Gleichung ist ω die Winkelgeschwindigkeit und J das kombinierte Massenträgheitsmoment aus Motor, Welle und Kompressor.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} * (M_{Motor} - M_{Kompressor}) \quad (4.43)$$

Das Moment, welches vom Kompressor benötigt wird, kann durch die Gleichungen 4.40, 4.41 sowie 4.42 ermittelt werden. Das Antriebsmoment M_{Motor} kann nach [PSP04] durch eine Abhängigkeit der dem Motor zur Verfügung gestellten Spannung bestimmt werden.

$$M_{Motor} = \eta_{mech} * \frac{k_t}{R_{Motor}} * (U_{Motor} - k_v * \omega) \quad (4.44)$$

Die Versorgungsspannung des Kompressormotors ist eine Regelgröße des Brennstoffzellensystems, ebenso wie das Druckverhältnis π (vgl. 4.14). Sie wird im Rahmen dieser Erstmodellierung ebenfalls über einen linearen Zusammenhang abgebildet solange noch keine konkrete Regelungsstrategie für das Kompressorsystem implementiert ist. Der Zusammenhang von Stromstärke und der Kompressormotorspannung wird zu:

$$U_{Motor} = I_{FC} * 0.6 + 30 \quad (4.45)$$

gewählt. Die Größen k_t , R_{Motor} und k_v sind Konstanten des zum Einsatz kommenden Motors. Im Falle dieser Erstmodellierung werden die Parameter aus [PSP04] verwendet, diese sind in nachstehender Tabelle zu finden.

Tabelle 4.5: Kenngrößen des Kompressormotors

Parameter	Wert	Einheit
k_v	0,0153	$\frac{V}{\text{rad/s}}$
k_t	0,0153	$\frac{\text{Nm}}{A}$
R_{Motor}	0,82	Ω
η_{mech}	0,9	%
J	$5 * 10^{-5}$	kg m^2
M_{max}	1,5	Nm

Durch die Änderung von Temperatur und Druck durch die Kompression ändert sich auch die relative Luftfeuchtigkeit. Die Temperaturänderung führt zunächst zur Veränderung des Sättigungsdampfdruckes. Dieser lässt sich durch ein Näherungspolynom nach [HLB17] in Abhängigkeit des Betriebsdruckes p_{op} sowie der Temperatur bestimmen. Es lautet:

$$p_{sat} = p_{op} * 10^{c_1 + c_2 * (T - 273,15K) + c_3 * (T - 273,15K)^2 + c_4 * (T - 273,15K)^3} \quad (4.46)$$

Die zugehörigen empirischen Faktoren sind in Tabelle 4.6 ersichtlich.

Tabelle 4.6: empirische Konstanten Sättigungsdampfdruck

Parameter	Wert	Einheit
c_1	-2,1794	-
c_2	$2,953 * 10^2$	1/K
c_3	$-9,1837^{-5}$	1/K ²
c_4	$1,4454 * 10^{-7}$	1/K ³

Auf Grund der Annahme idealer Gase gilt, dass das Druckverhältnis $\pi_i = \frac{p_i}{p_{total}} = \frac{p_{H_2O,env}}{p_{env}} = \frac{p_{H_2O,RV}}{p_{RV}}$ über den Kompressor unverändert bleibt. Der Partialdruck des Wasserdampfes am Kompressoraustritt beträgt folglich:

$$p_{H_2O,RV} = p_{H_2O,env} * \frac{p_{env}}{p_{RV}} \quad (4.47)$$

setzt man in 4.47 die Definition des Sättigungsdampfdruckes, $\varphi = \frac{p_{H_2O}}{p_{sat}}$, ein und formt nach der relativen Luftfeuchtigkeit der Austrittsluft um ergibt sich diese zu:

$$\varphi_{RV} = \varphi_{env} * \frac{p_{env}}{p_{RV}} * \frac{p_{H_2O,RV}}{p_{H_2O,env}} \quad (4.48)$$

Die auf diese Weise berechneten Größen werden an das nächste Submodell, die Ladeluftkühlung, übergeben.

Ladeluftkühlung

Die Luft, welche den Kompressor verlässt, nimmt die nach Gleichung 4.39 berechnete Temperatur an. Diese ist zu hoch um die Brennstoffzelle direkt zu versorgen. Bei Temperaturen über 100°C drohen starke Schädigungen der Membran durch das Austrocknen derselben. Aus diesem Grund muss die Temperatur der Luft wieder abgesenkt werden. Hierfür wird ein Ladeluftkühler verwendet, der verschiedenste Bauformen annehmen kann. Da zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch keine Informationen über die Ausführung des Ladeluftkühlers vorliegen wird seine Funktion als Platzhaltermodell in das Gesamtsystem integriert. Die Eingangsgrößen in die Blackbox sind die Eigenschaften des Luftmassenstroms welcher aus dem Kompressor kommt und die angeforderte Temperatur, welche die Luft am Eintritt in die Kathode erreichen soll. Die Ausgangsgrößen des Ladeluftkühlers sind die Eigenschaften der Luft an dessen Austritt bzw. dem Einlass zur Befeuchtungseinheit. Durch die Änderung der Temperatur über den Ladeluftkühler ändert sich neben der Temperatur selbst ausschließlich die relative Feuchtigkeit der Luft. Die weiteren Größen wie der Massenstrom oder der Ein- und Auslassdruck bleiben unverändert. Das unveränderte Druckverhältnis beruht auf der Annahme, dass kein Druckverlust über den Kühler stattfindet. Dieser Druckverlust ist in einer Modellerweiterung um einen spezifischen Ladeluftkühler zu berücksichtigen. Die Berechnung der relativen Luftfeuchtigkeit erfolgt analog zu Gleichung 4.48.

Befeuchtung

Die Befeuchtung der Luft erfolgt in dieser Arbeit ebenfalls zunächst über ein Platzhaltermodell. Die Eingangsgrößen sind in diesem Fall die Eigenschaften der Luft, welche den Ladeluftkühler verlassen und die angeforderte relative Luftfeuchtigkeit der Luft am Eingang der Brennstoffzelle (Eingabeparameter). Die Ausgangsgrößen der Befeuchtungseinheit sind die Eigenschaften der in die Brennstoffzelle einströmenden Luft. Es wird die Annahme getroffen, dass kein Wärmeübergang stattfindet $T_{LLK} = T_{Hum}$ und keine Druckverluste durch Strömungseigenschaften auftreten. Durch die Befeuchtung ändern sich neben dem primären Ziel der Bereitstellung einer vorgegeben relativen Luftfeuchtigkeit φ_{Hum} weitere

Eigenschaften der Luft. Zunächst handelt es sich bei einer Befeuchtung um das gezielte hinzufügen von Wasserdampf. Hinzugefügter Wasserdampf wird in folgendem mit dem Subskript *inj* für „injiziert“ gekennzeichnet. Die in die Befeuchtungseinheit einströmende Luft ist bereits ein Gemisch aus trockener Luft und Wasser. Es gilt daher für den ausströmenden Massenstrom:

$$\dot{m}_{Hum} = \dot{m}_{LLK} + \dot{m}_{H_2O, inj} = \dot{m}_{Luft, ein} + \dot{m}_{H_2O, LLK} + \dot{m}_{H_2O, inj} \quad (4.49)$$

Um den Betrag des hinzugefügten Wasserdampfes bestimmen zu können, werden die auftretenden Massenströme in ihren Bestandteilen aufgeschlüsselt. Der in die Befeuchtungseinheit einströmende Massenstrom \dot{m}_{LLK} ist ein Gemisch aus Wasserdampf und trockener Luft. Dieser \dot{m}_{Luft} ändert sich über die Befeuchtungseinheit nicht und ist dementsprechend am Eingang und Auslass der Befeuchtung gleich.

$$\dot{m}_{LLK} = \dot{m}_{H_2O, LLK} + \dot{m}_{Luft} \quad (4.50)$$

Der Wassergehalt der Luft x_W ist

$$x_{W, LLK} = \frac{\dot{m}_{H_2O, LLK}}{\dot{m}_{Luft, LLK}} \quad (4.51)$$

beziehungsweise nach [Sch19] für ideale Gase und einer Molaren Masse von Luft mit $M_{Luft} = 28,9656 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$:

$$x_W = 0,622 * \frac{p_{H_2O, LLK}}{p_{LLK} - p_{H_2O, LLK}} \quad (4.52)$$

Aus den Gleichungen 4.50 und 4.51 folgt für den Massenstrom trockener Luft:

$$\dot{m}_{Luft} = \frac{1}{x_W} * \dot{m}_{H_2O, LLK} = \frac{1}{x_W} * (\dot{m}_{LLK} - \dot{m}_{Luft}) = \frac{1}{x_W + 1} * \dot{m}_{LLK} \quad (4.53)$$

Anders als beim Luftmassenstrom ändert sich der Massenstrom des Wasserdampfes durch das Einbringen von weiterem Wasser. Es gilt:

$$\dot{m}_{H_2O, Hum} = \dot{m}_{H_2O, LLK} + \dot{m}_{H_2O, inj} \quad (4.54)$$

Da die relative Luftfeuchtigkeit der aus der Befeuchtungseinheit ausströmenden Luft bekannt ist (Eingangsgröße) kann der Wasserdampf Massenstrom analog nach Gleichung 4.51 bestimmt werden. Für den ausströmenden Wasserdampf gilt:

$$\dot{m}_{H_2O, Hum} = \dot{m}_{Luft, Hum} * x_{W, Hum} \quad (4.55)$$

darin ist $x_{W, Hum}$ der Wassergehalt der ausströmenden Luft. Dieser lässt sich analog zu Gleichung 4.52 bestimmen indem man den Partialdruck von Wasser mit der angeforderten relativen Luftfeuchtigkeit und dem Sättigungsdampfdruck nach Gleichung 4.46 bestimmt:

$$p_{H_2O, Hum} = \varphi_{Hum} * p_{sat} \quad (4.56)$$

Durch Kombination der Gleichungen erhält man letztlich:

$$\dot{m}_{H_2O, Hum} = \dot{m}_{Luft, Hum} * x_{W, Hum} = \dot{m}_{Luft, Hum} * 0,622 * \frac{\varphi_{Hum} * p_{sat}}{p_{Luft}} \quad (4.57)$$

Neben dem Massenstrom ändert sich durch das hinzufügen von weiterem Wasserdampf auch der Druck des Gasgemisches am Auslass der Befeuchtungseinheit p_{Hum} . Dieser setzt sich nach Daltons

Gesetz zusammen nach:

$$p_{Hum} = p_{Luft, Hum} + p_{H_2O, Hum} = p_{Luft, LLK} + p_{H_2O, Hum} \quad (4.58)$$

Für den mit der Luft in die Befeuchtungseinheit einströmenden Wasserdampf gilt wieder der Zusammenhang über die relative Feuchtigkeit und den Sättigungsdampfdruck.

Der Partialdruck der trockenen Luft ändert sich, genauso wie der Massenstrom, über die Befeuchtungseinheit nicht $p_{Luft, Hum} = p_{Luft, LLK}$ es gilt daher analog zu Gleichung 4.56:

$$p_{Luft, Hum} = p_{LLK} - p_{H_2O, LLK} = p_{LLK} - \varphi_{LLK} * p_{sat} \quad (4.59)$$

Mit den in 4.49 bis 4.59 hergeleiteten Gleichungen, welche alle auf thermodynamischen Grundgleichungen für feuchte Luft beruhen wie sie zum Beispiel in [Sch19] zu finden sind, lassen sich somit alle Eigenschaften der Luft am Ausgang des Strömungskanals bestimmen.

Diese Eigenschaften entsprechen wiederum denen am Eingang der Kathode. Um z.B. das Temperaturmodell in 4.5.5 mit den benötigten ein- und austretenden Stoffmengenströmen zu versorgen, müssen diese noch über die Kathode bilanziert werden. Dies geschieht analog zu dem binären Gasgemisch aus Wasser und Wasserstoff wie es in vorigen Kapitel 4.5.2 für die Anode besprochen wurde. Der Unterschied besteht in der Zusammensetzung des Gasgemisches, welches in diesem Fall Luft ist und der Tatsache, dass auf Grund der Entstehung von Produktwasser nicht mehr davon ausgegangen werden kann, dass Wasser nur noch in Form von Dampf vorliegt. Die Annahme, dass das austretende Gasgemisch die Temperatur der Brennstoffzelle angenommen hat gilt jedoch weiterhin $T_{Ca, out} = T_{FC}$. Die nachstehende Abbildung gibt Aufschluss über die vorkommenden Größen im Rahmen der Bilanzierung:

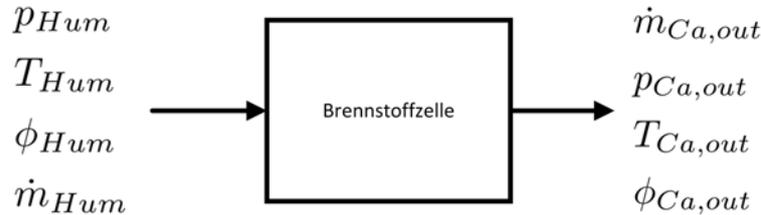


Abbildung 4.16: Bilanzierungsgrößen der Kathode

Zuvor wurden bereits die Massenströme von Wasser $\dot{m}_{H_2O, Hum}$ und Luft \dot{m}_{Luft} die in die Kathode einströmen definiert. Die zugehörigen Stoffmengenströme können über die molare Masse der jeweiligen Komponente umgerechnet werden.

$$\dot{n}_i = M_i * \dot{m}_i \quad (4.60)$$

Über die stöchiometrischen Faktoren, lässt sich der eintretende Luftmassenstrom in seine Bestandteile aufschlüsseln:

$$\dot{n}_i = x_i * \dot{n}_{air, ca, in} \quad (4.61)$$

Für den in die Kathode eintretenden Sauerstoffstoffmengenstrom gilt somit:

$$\dot{n}_{O_2, ca, in} = x_{O_2} * \dot{n}_{air, ca, in} \quad (4.62)$$

Über das Faradaygesetz lässt sich der für den zu liefernden Strom umgesetzte Sauerstoff unter Berücksichtigung der Zellanzahl berechnen:

$$\dot{n}_{O_2, ca, used} = \frac{N * I}{z * F} = \frac{N * I}{4 * F} \quad (4.63)$$

Die Differenz aus Einströmendem und umgesetzttem Sauerstoff entspricht dem ausströmenden Sauerstoff:

$$\dot{n}_{O_2,ca,out} = \dot{n}_{O_2,ca,in} - \dot{n}_{O_2,ca,used} \quad (4.64)$$

Das Sauerstoff-Überschussverhältnis λ_{O_2} ist definiert nach:

$$\lambda_{O_2} = \frac{\dot{n}_{O_2,ca,in}}{\dot{n}_{O_2,ca,used}} \quad (4.65)$$

Da der in der Luft enthaltene Stickstoff und das Kohlenstoffdioxid nicht an der Reaktion beteiligt sind entsprechen deren eintretende Stoffmengenströme den austretenden:

$$\dot{n}_{N_2,ca,in} = \dot{n}_{N_2,ca,out} = x_{N_2} * \dot{n}_{air,ca,in} \quad (4.66)$$

und

$$\dot{n}_{CO_2,ca,in} = \dot{n}_{CO_2,ca,out} = x_{CO_2} * \dot{n}_{air,ca,in} \quad (4.67)$$

Damit sind die einzelnen austretenden Stoffmengenströme von trockener Luft bekannt, deren Summe den gesamten austretenden Stoffmengenstrom von Luft entspricht. Das durch die Reaktion entstehende Wasser entspricht derselben Stoffmenge des umgesetzten Wasserstoffes. Das produzierte Wasser lässt sich daher ebenfalls über das Faradaygesetz und somit der Stromstärke und der Zellanzahl bestimmen:

$$\dot{n}_{H_2O,ca,prod} = \dot{n}_{H_2,an,used} = \frac{N * I}{2 * F} \quad (4.68)$$

Der gesamte aus der Kathode ausströmende Wasser-Stoffmengenstrom ergibt sich aus dem eintretendem und dem produzierten Wasser, da keine Diffusion von Wasser durch die Membran berücksichtigt wird:

$$\dot{n}_{H_2O,ca,out} = \dot{n}_{H_2O,ca,prod} + \dot{n}_{H_2O,ca,in} \quad (4.69)$$

Durch die austretenden Stoffmengenströme, welche durch die Gleichungen 4.64 bis 4.69 bekannt sind kann durch Summation der einzelnen Stoffmengenströme der insgesamt die Kathode verlassende Stoffmengenstrom ermittelt werden. Da durch die Reaktion zusätzliches Wasser gebildet wird, kann man nicht mehr davon ausgehen, dass der gesamte Anteil dampfförmig vorliegt. Um den flüssigen Teil des Wasser am Ausgang der Kathode zu bestimmen wird zunächst der Sättigungsdampfdruck für die Temperatur des Gasgemisches am Ausgang bestimmt:

$$p_{sat,ca,out} = f(T_{FC}) \quad (4.70)$$

Der Wasserpartialdruck lässt sich wieder über den Zusammenhang von Partialdruck zu Stoffmengenstrom von idealen Gasen bestimmen:

$$p_{H_2O,ca,out} = p_{ca,out} * \frac{\dot{n}_{H_2O,ca,out}}{\dot{n}_{ca,out}} \quad (4.71)$$

Es folgt eine Fallunterscheidung für die Fälle ungesättigter und übersättigter Luft und somit dem Vorhandensein flüssigen Wassers. Zur Vereinfachung wird an dieser Stelle die Annahme getroffen, dass der Gesamtdruck am Auslass der Brennstoffzelle dem Gesamtdruck am Einlass entspricht $p_{ca,out} = p_{FC} = p_{Hum}$. In der Realität, hat diese Annahme keine Berechtigung, da sich durch den Verbrauch des Sauerstoffes, der Produktion und Diffusion von Wasser die Zusammensetzung des Gasgemisches ändert. Trotzdem wird diese Annahme im Rahmen dieser Erstmodellierung als hinreichend betrachtet, da sie lediglich zur Aufteilung des Wassers in seine Aggregatzustände dient, welche nur im

Temperaturmodell weiterverwendet werden. Da außerdem eine Temperaturregelung eingesetzt wird, verliert die Annahme an Bedeutung. Wird in einer Fortsetzung der Arbeit eine Membranfeuchtigkeitssimulation umgesetzt, was sich empfiehlt, so finden liegen außerdem noch weitere Stoffströme von Wasser vor. Im Rahmen dieser fortführenden Arbeit erfolgt somit zwingend eine Überarbeitung der Massenbilanzierung, in welcher es sich dann anbietet, die hier getroffene Annahme zu ersetzen und die tatsächlichen Druck- und Stoffmengenverhältnisse zu berücksichtigen. In dieser Arbeit gilt jedoch der Annahme entsprechend für den Fall, dass

$$p_{sat}(T_{FC}) > p_{H_2O,ca,out} \quad (4.72)$$

das gesamte Wasser dampfförmig vorliegt. Somit entspricht der flüssige Anteil:

$$\dot{n}_{H_2O,ca,out,l} = 0 \quad (4.73)$$

und der gesamte austretende Stoffmengenstrom von Wasser ist gasförmig:

$$\dot{n}_{H_2O,ca,out,v} = \dot{n}_{H_2O,ca,out} \quad (4.74)$$

Ist der Partialdruck des Wassers größer als der Sättigungsdampfdruck,

$$p_{sat}(T_{FC}) < p_{H_2O,ca,out} \quad (4.75)$$

liegt ein Teil des Wassers in flüssiger Form vor. Der flüssige Anteil beträgt in diesem Fall:

$$\dot{n}_{H_2O,ca,out,l} = \dot{n}_{H_2O,ca,out} - \dot{n}_{H_2O,ca,out,g} = \dot{n}_{H_2O,ca,out} - \frac{p_{sat}(T_{FC})}{p_{ca,ou}} \quad (4.76)$$

Durch die in diesem Kapitel aufgezeigten Gleichungen lassen sich die notwendigen Größen bestimmen, um das Im Kapitel 4.5.5 beschriebene Temperaturmodell anwenden zu können.

4.5.4 Gasdiffusion - Partialdruckberechnung

Eine der essentiellen Zielgrößen in der Simulation von Brennstoffzellen ist die Zellspannung. In Gleichung 2.6, der Nernst-Gleichung, wird die Abhängigkeit der Zellspannung von den Prozessparametern deutlich. Dabei spielt der Betrag der Partialdrücke von den an der Reaktion teilnehmenden Gase eine wesentliche Rolle. Von Bedeutung ist der Druck, welcher direkt an den Elektroden anliegt. Dieser unterscheidet sich von den dem System zur Verfügung gestellten Arbeitsdrücken im Anoden- und Kathodenkanal, da das Gas zunächst durch die Gasdiffusionsschicht, ersichtlich in Abbildung 4.17, diffundieren muss. Damit unterscheiden sich die Partialdrücke von Sauerstoff und Wasserstoff, welche zur Bestimmung der Nernstspannung verwendet werden von den Partialdrücken wie sie bereits im vorherigen Kapitel zur Bilanzierung in den Strömungskanälen verwendet und berechnet wurden. Durch die Gasdiffusionsschicht wird die aktive Zelloberfläche/Katalysatorschicht mit Reaktanten aus den Strömungskanälen versorgt. Gleichzeitig wird Produktwasser abtransportiert. Dazu besteht die GDL häufig aus hydrophobiertem Kohlepapier [Kur16]. Es sind mehrere Ansätze zur Simulation dieses Diffusionseffektes bekannt. Die wichtigsten und am häufigsten vorkommenden sind die Fick'schen und Max-Well'schen Diffusionsgleichungen. Die einfachste Variante zur Bestimmung der Partialdrücke ist die einfache Bilanzierung der Stoffmengenströme, welche sich für den momentanen Lastzustand einstellen um dann über den Zusammenhang von Stoffmengenstrom zu den Partialdrücken die benötigten Drücke zu ermitteln. Dies entspricht der Verwendung der Drücke wie sie in den beiden vorherigen Kapiteln bestimmt wurden. Diese Art der Partialdruckberechnung erfolgt ebenfalls in der vorangehenden

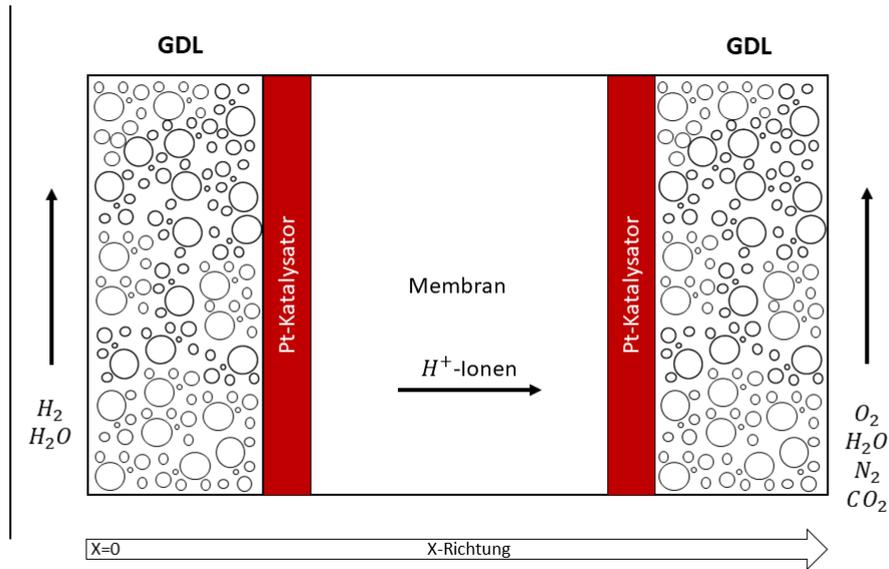


Abbildung 4.17: Aufbau einer PEM-Zelle

Arbeit [EZ19]. Im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch eine genauere Berechnung implementiert werden. Dazu wird die Stefan-Maxwell-Gleichung in Betracht gezogen. Eine Anwendung dieser Gleichung wird beispielsweise in [Amp95] oder [WNS05] vorgestellt. Die Stefan-Maxwell-Gleichung lautet:

$$\nabla x_i = \frac{RT}{p} * \sum_{j=1}^N \frac{x_i \dot{n}_j - x_j \dot{n}_i}{D_{i,j}} \quad (4.77)$$

Wendet man die Stefan-Maxwell-Gleichung für das Wasser-Wasserstoff-Gemisch der Anodenseite an gilt:

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{p_a} * \frac{x_{H_2O} * \dot{n}_{H_2} - x_{H_2} * \dot{n}_{H_2O}}{D_{H_2O,H_2}} \quad (4.78)$$

Es wird angenommen, dass kein Massenstrom von Wasser in x-Richtung vorliegt, $\dot{n}_{H_2O} = 0$, dadurch vereinfacht sich 4.78 zu:

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{P_a} * \frac{x_{H_2O} * \dot{n}_{H_2}}{D_{H_2O,H_2}} \quad (4.79)$$

Der molare Massenstrom von Wasserstoff lässt sich durch die Faradaysche Regel bestimmen.

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{i}{2 * F} \quad (4.80)$$

In 4.80 ist i die momentane Stromdichte und F die Faraday Konstante mit $96485 \frac{C}{mol}$. Kombiniert man die Gleichungen 4.79 und 4.80 und integriert diese in x-Richtung innerhalb der Grenzen Anodenkanal bis zur katalytischen Grenzfläche erhält man eine Gleichung zur Berechnung des effektiven Stoffmengenanteils von Wasser. Diese lautet wie folgt:

$$x_{H_2O} = x_{H_2O}^{channel} * \exp\left(\frac{R * T * i * l_a}{2 * F * p_a * D_{H_2O,H_2}}\right) \quad (4.81)$$

Darin ist l_a der Abstand in x-Richtung und $x_{H_2O}^{channel}$ der molare Anteil von Wasser im Gasgemisch des Anodenströmungskanals.

Auf Grund der Annahme, dass es sich um ideale Gase handelt, gilt der Zusammenhang $x_{H_2O} + x_{H_2} = 1$ sowie $x_i = \frac{p_i}{p_{total}}$. Durch Kombination und Umformung ergibt sich somit für den Partialdruck von Wasserstoff:

$$p_{H_2} = \frac{p_{H_2O}}{x_{H_2O}} * (1 - x_{H_2O}) = p_{H_2O} * \left(\frac{1}{x_{H_2O}} - 1 \right) \quad (4.82)$$

Setzt man nun für x_{H_2O} in 4.82 Gleichung 4.81 ein ergibt sich für den Partialdruck von Wasserstoff folglich:

$$p_{H_2} = p_{H_2O} * \left(\frac{1}{x_{H_2O}^{channel} * \exp\left(\frac{R * T * i_0 * l_a}{2 * F * p_a * D_{H_2O, H_2}}\right)} - 1 \right) \quad (4.83)$$

In Gleichung 4.83 sind noch p_{H_2O} und $x_{H_2O}^{channel}$ festzulegen. In der Arbeit von [WNS05] wird für p_{H_2O} der Zusammenhang festgelegt, dass der Partialdruck des Wassers im Anodenkanal genau der Hälfte des Sättigungsdampfdruckes von Wasser unter den vorherrschenden Bedingungen entspricht. Diese Annahme soll in dieser Arbeit ausgehebelt werden. Stattdessen soll p_{H_2O} über den Zusammenhang der relativen Feuchte definiert werden, sodass diese als Eingangsgröße in das Modell zu berücksichtigen ist und die Möglichkeit besteht eine Regelung der Befeuchtung zu implementieren, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Membranfeuchtigkeit und somit auch auf den Innenwiderstand einer Brennstoffzelle hat. Die relative Feuchtigkeit ist das Verhältnis zwischen dem Partialdruck von Wasserdampf zum Sättigungsdampfdruck von Wasser $\varphi = \frac{p_{H_2O}}{p_{sat, H_2O}}$. Bei $x_{H_2O}^{channel}$ handelt es sich um das molare Verhältnis von Wasser unter den im Anodenkanal vorherrschenden Bedingungen. $x_{H_2O}^{channel}$ lässt sich also unter Annahme von idealen Gasen und der Definition der relativen Feuchtigkeit durch $x_{H_2O}^{channel} = \frac{\varphi * p_{sat, H_2O}}{p_a}$ ausdrücken. Damit lautet die in dieser Arbeit verwendete Formel zur Bestimmung des Partialdruckes von Wasserstoff:

$$p_{H_2} = \varphi_a * p_{sat, H_2O, a} * \left(\frac{1}{\frac{\varphi_a * p_{sat, H_2O}}{p_a} * \exp\left(\frac{R * T * i_0 * l_a}{2 * F * p_a * D_{H_2O, H_2}}\right)} - 1 \right) \quad (4.84)$$

Im Kathodenkanal liegt, vor allem wenn man die Brennstoffzelle mit Luft betreibt, kein binäres Gemisch mehr vor. Betrachtet man Luft in einer Zusammensetzung aus O_2, N_2, H_2O und CO_2 wird die Berechnung des Sauerstoffpartialdruckes vielschichtiger, wenn auch das prinzipielle Vorgehen dasselbe bleibt. Wendet man 4.77 für das Diffusionspaar Sauerstoff und Wasser an und legt man wiederum fest, dass keine Diffusion von Wasser in x-Richtung stattfindet, ergibt sich:

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{p_c} * \frac{x_{O_2} * \dot{n}_{H_2O} - x_{H_2O} * \dot{n}_{O_2}}{D_{H_2O, O_2}} = \frac{RT}{p_c} * \frac{-x_{H_2O} * \dot{n}_{O_2}}{D_{H_2O, O_2}} \quad (4.85)$$

Kombiniert mit dem Faraday Gesetz 4.80 für die Kathode $\dot{n}_{O_2} = \frac{i}{4 * F}$ und Integration in x-Richtung erhält man für das molare Verhältnis von Wasser:

$$x_{H_2O} = x_{H_2O}^{channel} * \exp\left(\frac{R * T * i * l_c}{4 * F * p_c * D_{H_2O, O_2}}\right) \quad (4.86)$$

Auf gleiche Weise erhält man die molaren Verhältnisse von Stickstoff und Kohlenstoffdioxid:

$$x_{N_2} = x_{N_2}^{channel} * \exp\left(\frac{R * T * i_0 * l_c}{4 * F * p_c * D_{N_2, O_2}}\right) \quad (4.87)$$

$$x_{CO_2} = x_{CO_2}^{channel} * \exp\left(\frac{R * T * i_0 * l_c}{4 * F * p_c * D_{CO_2, O_2}}\right) \quad (4.88)$$

Für die Zusammensetzung der Luft gilt weiterhin der Zusammenhang idealer Gase $x_{O_2} + x_{H_2O} + x_{N_2} + x_{CO_2} = 1$ und $x_i = \frac{p_i}{p_{total}}$, sodass sich durch Umformung und Kombination für den Partialdruck von Sauerstoff:

$$p_{O_2} = \frac{p_{H_2O}}{x_{H_2O}} * (1 - x_{H_2O} - x_{N_2} - x_{CO_2}) = p_{H_2O} * \left(\frac{1 - x_{N_2} - x_{CO_2}}{x_{H_2O}} - 1 \right) \quad (4.89)$$

ergibt. In Gleichung 4.89 lassen sich nun die Stoffmengenverhältnisse aus den Gleichungen 4.86 bis 4.88 ersetzen. Damit bleibt noch die grundsätzliche Zusammensetzung der Reaktionsluft sowie der Partialdruck des Wassers zu bestimmen. Die Reaktionsluft setzt sich nach den bekannten molaren Verhältnissen zusammen wie sie in der Literatur zu finden sind. Für den Partialdruck des Wassers gilt wieder abweichend von [WNS05] der Zusammenhang über die relative Feuchtigkeit. In 4.86 kann deshalb $x_{H_2O}^{channel}$ durch $\frac{\varphi_c * p_{sat,H_2O,c}}{p_c}$ ersetzt werden sowie p_{H_2O} in 4.89 durch $\varphi_c * p_{sat,H_2O,c}$. Die vollständige kombinierte Gleichung zur Berechnung des Sauerstoffpartialdrucks lautet damit:

$$p_{O_2} = \varphi_c * p_{sat,H_2O,c} * \left(\frac{1 - x_{N_2}^{channel} * \exp\left(\frac{R*T*i_0*l_c}{4*F*p_c*D_{N_2,O_2}}\right) - x_{CO_2}^{channel} * \exp\left(\frac{R*T*i_0*l_c}{4*F*p_c*D_{CO_2,O_2}}\right)}{\frac{\varphi_c * p_{sat,H_2O,c}}{p_c} * \exp\left(\frac{R*T*i_0*l_c}{4*F*p_c*D_{H_2O,O_2}}\right)} - 1 \right) \quad (4.90)$$

Die innerhalb dieses Kapitels vorkommenden Diffusionskoeffizienten $D_{i,j}$ gelten für die jeweilige Stoffpaarung aus i und j . Sie können durch das in [HB13] vorgestellte Tool unter Variation von Betriebsdruck und Temperatur bestimmt werden. Die Datengrundlage für diese Berechnung liegt in der Grundlagenarbeit von [BSL07] und den darin bestimmten „Lennard-Jones Parametern“. In [Bar13] sind tabellierte Eigenschaften von Gasdiffusionsschichten unterschiedlicher Hersteller zu finden. Diese Tabellen enthalten auch Angaben über die Porosität der Elektroden. Insgesamt stellt das Werk viele Brennstoffzelleneigenschaften bereit und kann als Datengrundlage für Modellerweiterungen herangezogen werden.

4.5.5 Temperaturmodell

Bei der Brennstoffzellenreaktion wird neben elektrischer Leistung auch Wärme freigesetzt. Diese muss durch ein Thermomanagement abgeführt werden um den Brennstoffzellenbetrieb unter effizienten Betriebsbedingungen zu gewährleisten. Dazu gehört die Stackkühlung um bei hohen Leistungsanforderungen thermische Limitierungen zu vermeiden. Die notwendige Kühlleistung kann wesentlich höher ausfallen als bei Verbrennungskraftmaschinen, da die Brennstoffzelle (Niedrigtemperaturbrennstoffzellen) unter 100°C betrieben wird und damit die Temperaturdifferenz zur Umgebung wesentlich geringer ist. Bei einer VKM kann diese Differenz mehrere hundert Grad erreichen, womit die Umgebung eine erheblich einflussreichere Wärmesenke darstellt. Das Thermomanagement hat zudem die Aufgabe gemeinsam mit einer Befeuchtungsregelung dafür zu sorgen, dass die Membran ausreichend befeuchtet ist aber zeitgleich auch kein Produktwasserstau entsteht. In einem Hybridverbund bietet die Abwärme der Brennstoffzelle auch die Möglichkeit bei geringen Temperaturen eine Heizleistung an die Batterie bereitzustellen, was einem Vorteil gegenüber einem reinem Batteriefahrzeug entspricht. Eine Herausforderung ist zudem, dass keine effektiven Kühlmittel verwendet werden können, da je nach nach Ausgestaltung, die Möglichkeit besteht, dass Kontakt zur Stackspannung besteht. Daher kommen Kühlmittel wie zum Beispiel De-Ionisiertes Wasser zum Einsatz, da es über eine geringe elektrische Leitfähigkeit verfügt [Kur16][Puk03]. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Thermomanagement eine wichtige und komplexe Funktion aufweist. Es wird im Rahmen dieser Arbeit keine aktive Regelung der Stacktemperatur stattfinden können. Diese soll in einer fortführender Arbeit unter Berücksichtigung der Quereinflüsse auf Membranfeuchtigkeit und Stackleistung entwickelt werden und in das Gesamtmodell integriert werden. Die Berechnung der Brennstoffzellentemperatur soll an

dieser Stelle dennoch Erwähnung finden. Sie wird über den ersten Hauptsatz der Thermodynamik bilanziert. Der erste Hauptsatz für instationäre Systeme lautet:

$$C_{FC} * \frac{dT_{FC}}{dt} = \sum P + \sum \dot{Q} + \sum \dot{H}_{input} - \sum \dot{H}_{output} \quad (4.91)$$

Die Änderung der Temperatur mit der Zeit hängt von der Wärmekapazität des betrachteten Körpers ab. Unter der Annahme, dass die Brennstoffzelle ein homogener Körper ist, ist die Wärmekapazität das Produkt aus der Brennstoffzellenmasse m_{FC} und der Massen-spezifischen Wärmekapazität c_{FC} nach Gleichung 4.92

$$C_{FC} = m_{FC} * c_{FC} \quad (4.92)$$

Diese Größen, vor allem aber die spezifische Wärmekapazität und der Wärmeübergangskoeffizient (Gleichung 4.93) sind für die modellierte Brennstoffzelle aus dem Automobilbereich nicht bekannt. Es müssen Annahmen getroffen werden um die Simulation durchführen zu können. Da das Modell über eine idealisierte Stackkühlung verfügt, spielt im Rahmen dieser Erstmodellierung die genaue Kenntnis über diese Größen jedoch eine untergeordnete Rolle. Es werden daher die Parameter aus der vorangegangenen Arbeit [EZ19] verwendet. Für den Wärmeübergangskoeffizient $k = 5 \frac{W}{m^2 K}$ und für die Massen-spezifischen Wärmekapazität $c_{FC} = 700 \frac{J}{kg K}$. Soll zu einem späteren Zeitpunkt das Modell auf ein Prüfstands-system parametrisiert werden, wird es notwendig sein, diese Größen erneut abzuschätzen. Die Brennstoffzellenmasse ist in der Regel aus dem Datenblatt bekannt bzw. trivial zu ermitteln.

Die Auftretende Leistung P ist die elektrische Leistung der Brennstoffzelle nach Gleichung 4.25. Der gesamte Wärmestrom setzt sich aus einem Strahlungs- und einem konvektiven Wärmestrom zusammen. Für letzteren gilt der Zusammenhang nach nachstehender Gleichung 4.93:

$$\dot{Q}_{conv} = k * A_{FC,Stack} * (T_{env} - T_{FC,Stack}) \quad (4.93)$$

Darin ist k der Wärmeübergangskoeffizient, der wie oben beschrieben festgelegt wurde, $A_{FC,Stack}$ die Außenfläche der Brennstoffzelle. Die vorkommenden Temperaturen bilden die Temperaturdifferenz zwischen Brennstoffzelle und Umgebung. Für die Außenfläche der modellierten Brennstoffzelle gilt die selbe Problematik wie bereits für die Brennstoffzellenmasse. Sie ist unbekannt für das modellierte System kann aber im Rahmen einer späteren Modellparametrisierung trivial festgestellt werden. Der Strahlungswärmestrom wird über das Stefan-Boltzmann'sche Gesetz nach Gleichung 4.95 bestimmt.

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon * \sigma * A_{FC,Stack} * (T_{env}^4 - T_{FC}^4) \quad (4.94)$$

Darin ist $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ die Stefan-Boltzmann Konstante, ϵ ist der Emissionsgrad des Brennstoffzellenstacks. Für diesen Körper wird vereinfachend angenommen, dass er in Aluminium gekapselt ist, weshalb für ihn der Emissionsgrad von Aluminium mit $\epsilon_{Al} = 0,09$ gilt. In den Kapiteln der Gasversorgung 4.5.3 und 4.5.2 wurden die auftretenden Massen- bzw. Stoffmengenströme charakterisiert und bilanziert. Durch diese Kenntnis können die zugehörigen Enthalpieströme \dot{H}_i bestimmt werden. Der Zusammenhang zwischen Stoffmengenstrom und Enthalpiestrom erfolgt über die mol-spezifische Enthalpie $h_{m,i}$ für die Komponente i .

$$\dot{H}_i = h_{m,i}(T) * \dot{n}_i \quad (4.95)$$

Zur Bestimmung der temperaturabhängigen mol-spezifischen Enthalpien liegt der Arbeitsgruppe des IEE (Institut für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen) ein Matlab Skript *AbsProp.m*

bereit. Bei der Berechnung gilt die Annahme, dass die austretenden Stoffströme die Temperatur der Brennstoffzelle angenommen haben.

Das beschriebene Temperaturmodell ist auf diese Weise in das Modell integriert. Da wie bereits erwähnt jedoch noch keine Regelung der Brennstoffzellentemperatur über ein Thermomanagement erfolgt wird die berechnete Temperatur nicht für weitere Berechnungen verwendet sondern konstant gehalten. Die konstante Temperatur kann frei gewählt werden. Durch die Integration des Temperaturmodells wird die Schnittstelle zur Verwirklichung des Thermo- und Feuchtigkeitsmanagements einer fortführender Arbeit bereits bereit gestellt. Außerdem ist zu Demonstrationszwecken die Möglichkeit vorgesehen einen konstanten Wärmestrom zur Stackkühlung zuzuschalten und so das Temperaturverhalten zu berücksichtigen. Dabei handelt es sich jedoch um kein effektives Thermomanagement.

4.5.6 Dimensionierung der Brennstoffzelle

An dieser Stelle soll die Brennstoffzelle für den Einsatz im modellierten Fahrzeug dimensioniert werden. Die Leistungsklasse der Brennstoffzelle soll im Bereich $P = 50\text{kW}$ liegen. Um das Brennstoffzellenmodell auf diese Leistung auszulegen, können vor allem die Anzahl der verschalteten Zellen sowie deren aktive Zellfläche herangezogen werden. Es gilt jedoch zu beachten, dass der Kompressor einen limitierenden Faktor darstellt. Es gilt der Zusammenhang zwischen der Versorgungsspannung des Kompressormotors und der Brennstoffzellenstromstärke nach Gleichung 4.45. Aus dem Betriebskennfeld des Kompressors ergibt sich eine maximale Stromstärke von $I_{FC,max} = 320\text{A}$. Da darüber hinaus das Motormoment des Kompressors zusammenbricht und die Brennstoffzelle nicht mehr mit ausreichend Sauerstoff versorgt wird. Somit ist die Stromstärke ein limitierender Faktor für den Betrieb des Kompressors und damit auch für das Gesamtsystem. Da höhere Stromstärken darüber hinaus dazu führen, dass der Anteil von Konzentrationsüberspannung ansteigt und der Brennstoffzellenwirkungsgrad abnimmt, stellt diese Limitierung kein Problem dar. In der nachstehenden Abbildung 4.18 ist eine Parametervariation für die Zellanzahl, sowie der aktiven Zellfläche gemeinsam mit der dazu aufgewendeten Kompressorleistung abgebildet. Der Wassergehalt der Membran wird konstant mit $MWC = 60\%$ angenommen, da noch kein Membranbefeuchtungsmodell hinterlegt ist.

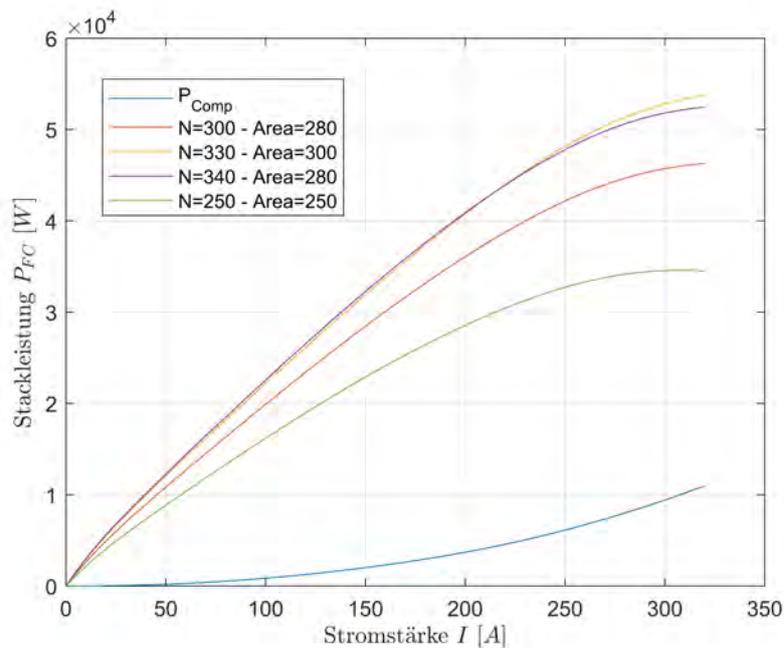


Abbildung 4.18: Parametervariation zur Leistungsdimensionierung des Brennstoffzellenstacks

Um zu überprüfen ob der Kompressor auch bei einem größer dimensionierten Brennstoffzellenstack noch ausreichend Sauerstoff bereitstellen kann bietet sich der Überschussfaktor λ_{O_2} an. Dieser liegt für alle in Abbildung 4.18 abgebildeten Parameterkombinationen in einem Bereich zwischen 1,4–2,3, was bedeutet, dass der Betrieb für jede Paarung möglich ist. Für die kleinste Paarung ($N = 250 - Area = 250$) ist der Überschussfaktor am höchsten und der Kompressor eigentlich überdimensioniert. Für die weitere Arbeit wird für das zu simulierende Fahrzeug die Parameterkombination von $N = 340$ Zellen mit einer aktiven Zellfläche von 280cm^2 gewählt, sodass die maximale Leistung, ohne Verluste durch Nebenaggregate, bei $P = 52,5\text{kW}$ liegt. Berücksichtigt man die Leistung, die der Kompressor für den Brennstoffzellenbetrieb benötigt erhält man die Netto Leistung des Brennstoffzellensystems. Bis zum Grenzstrom von 320A ergibt sich dafür der in 4.19 abgebildete Verlauf.

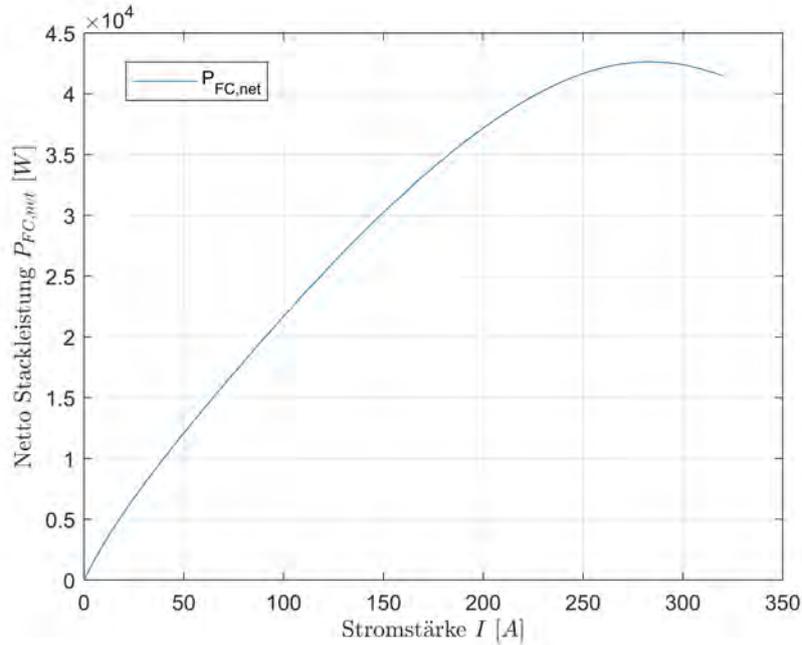


Abbildung 4.19: Nettoleistung des Brennstoffzellensystems für $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - MWC = 60\%$

4.5.7 Betriebsweisen im Fahrzeug

Um die Brennstoffzelle optimal zu betreiben, müssen die gewünschten Betriebspunkte effizient gewählt werden. Dabei ist nicht nur der Wirkungsgrad der Zellen selbst zu berücksichtigen sondern der des Gesamtsystems. In dieser Erstsimulation ist als Energieverbrauchendes Nebenaggregat im Brennstoffzellensystem lediglich der Kompressor modelliert. Die weiteren Systembestandteile wie die Leistungselektronik, die Kühlung des Stacks oder die Konditionierung der Reaktionsluft sind als Platzhaltermodelle ohne Leistungsaufnahme umgesetzt, sie werden im Rahmen dieser Betrachtung durch anteilige Faktor an der Leistung berücksichtigt. Der Systemwirkungsgrad lässt sich nach [Sch18]:

$$\eta_{System} = \frac{P_{FC} - P_{Nebenaggregate}}{H_{U,H_2} * \dot{n}_{H_2}} = \frac{P_{FC} - P_{Nebenaggregate}}{H_{U,H_2} * \dot{m}_{H_2}} \quad (4.96)$$

berechnen. Für die modellierte Brennstoffzelle ergibt sich der Verlauf wie in nachfolgender Abbildung 4.20 zu sehen. Neben dem Systemwirkungsgrad ist zudem der Spannungswirkungsgrad abgebildet. Dieser ergibt sich als Quotient der tatsächlichen Zellspannung und der reversiblen Zellspannung.

Das Verhalten des Brennstoffzellensystemwirkungsgrades deckt sich mit dem aus der Literatur zu entnehmenden Verhalten wie es in [Har05] oder [Kur16] zu finden ist. Es wird deutlich wo das

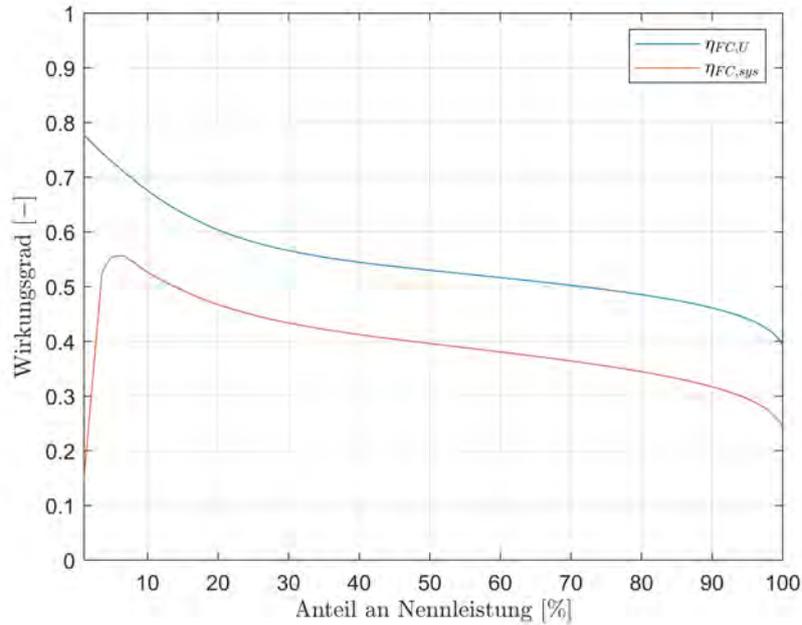


Abbildung 4.20: Verlauf des elektrischen und Systemwirkungsgrades der Brennstoffzelle

Betriebsoptimum der Brennstoffzelle liegt. Im Bereich um ca. 5% der Nennleistung und damit für das zuvor dimensionierte Brennstoffzellensystem bei $P_{FC,sys,opt} = 2,6\text{kW}$. Dieser Betriebspunkt spielt eine wesentliche Rolle in der Parametrisierung einer Wasserstoffverbrauchsoptimierten Betriebsstrategie.

4.6 Batteriemodell

Für die Modellierung der Traktionsbatterie im Rahmen dieser Arbeit wird ebenfalls ein elektrisches Ersatzschaltbild verwendet. Durch das ECM-Modell (engl. Electronic Circuit Model) kann das elektrische Verhalten der Batterie bei entsprechender Bedatung abgebildet werden. In Abbildung 4.21 ist das verwendete 5-Parameter-ECM-Modell abgebildet. Durch die RC-Glieder wird nicht nur das statische Verhalten der Spannungscharakteristik modelliert sondern auch das dynamische Spannungsverhalten als Antwort des Batteriesystems auf Änderungen des Lade bzw. Entladestroms. Die benötigten Parameter stammen aus Versuchsreihen und deren Auswertung. Die Bestimmung von ECM-Parametern erfolgt für elektrochemische Systeme in der Regel durch Stromsprunganalysen oder Impedanzspektroskopie. Auf die Ermittlung der Parameter soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Nähere Information zum Parametrisierungsverfahren von Batterien finden sich in der entsprechenden Fachliteratur. Die verwendeten Parameter und das Modell stammen aus dem Umfeld der Arbeitsgruppe des IEE und basieren auf der Auswertung einer Lithium-Ionen Zelle mit einer Kapazität von 5A h.

Die Spannungscharakteristik einer Batteriezelle ist in Abbildung 4.22 ersichtlich. Zum Zeitpunkt t_1 wird die Batteriezelle mit einem konstanten Entladestrom belastet und bei konstanter Temperatur entladen. Die Batterie reagiert auf die Last mit einem sofortigen Einbruch der Zellspannung (hergerufen durch Ohm'sche Verluste). Im weiteren Verlauf verringert sich der *SOC* der Zelle weiter und unterliegt dabei weiteren Überspannungen. Mit Erreichen der Entladeschlussspannung gilt die Batterie als komplett entladen. Für andere Temperaturen genauso wie andere Stromstärken stellt sich ein abweichender Verlauf der Spannungscharakteristik ein. [Sch18] [Gie19]

Die Spannungsverluste, Überspannungen, welchen die Batterien unterliegt sind:

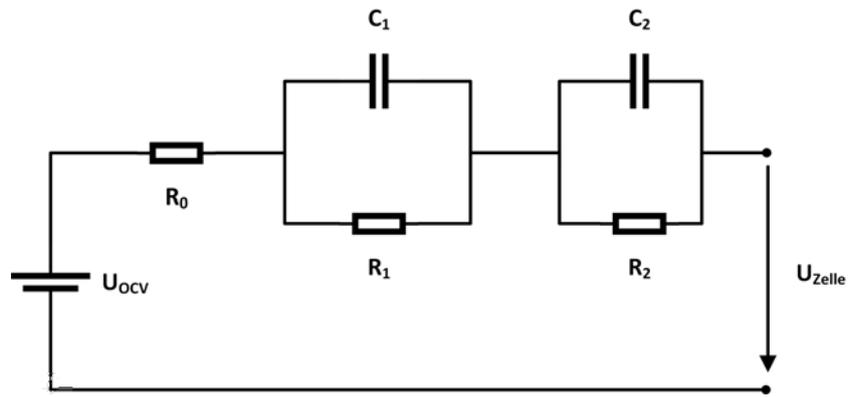


Abbildung 4.21: Verwendetes Fünf-Parameter Ersatzschaltbild zur Simulation des elektrischen Verhaltens einer Li-Ion Batterie

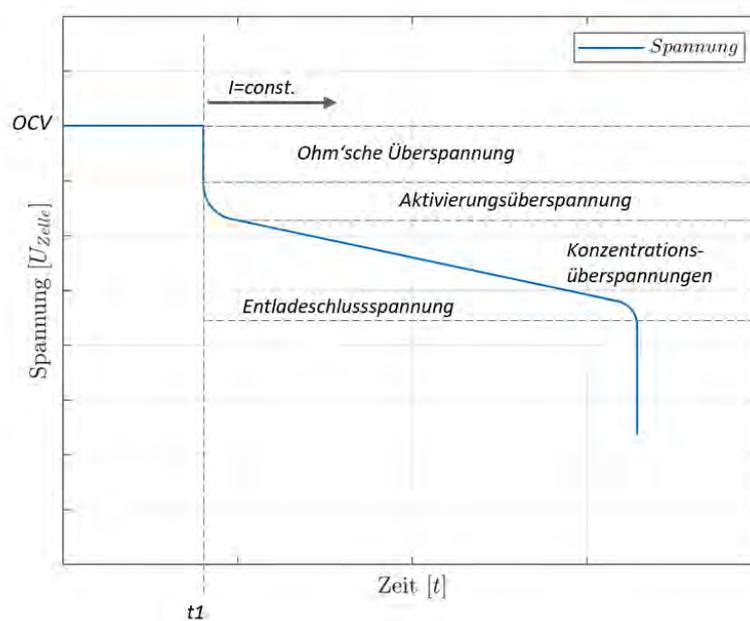


Abbildung 4.22: Veranschaulichung der Batterie-Entladecharakteristik nach [Sch18]

- **Aktivierungsüberspannungen**, hervorgerufen durch die Aktivierungsenergie die für die ablaufende Redoxreaktion benötigt wird. Der Verlauf der Aktivierungsüberspannung ist nichtlinear
- **Ohm'sche Überspannungen** die einen sofortigen Abfall der Spannung nach dem Ohm'schen Gesetz verursachen. Sie werden durch interne Widerstände der leitenden Bauteile hervorgerufen
- **Konzentrationsüberspannungen**, die durch die begrenzte Diffusion der Li-Ionen im Elektrolyten und durch die Membran hervorgerufen werden

Um die Batteriezelle unter sich ändernden Temperaturen und Ladezuständen, SOC (engl. State Of Charge), abbilden zu können bedarf es ausführlichen Messreihen um die ECM Parameter (Widerstände und Kapazitäten des Ersatzschaltbildes, *ECP* engl. Equivalent Circuit Parameters) zu bestimmen. Die Parameter sind demnach Funktionen dieser Größen

$$ECP_i = f(SOC_{Zelle}, T_{Zelle}) \quad (4.97)$$

Die entsprechenden Parameter sind im Modell als Kennfelder (Look-Up-Table Objekte) hinterlegt. Um Sie im Modell bestimmen zu können müssen der Ladezustand und die Temperatur der Zelle bekannt sein. Der Ladezustand SOC ist definiert als Quotient von vorhandener Batteriekapazität zur Nennkapazität der Zelle ($SOC = 100\%$):

$$SOC = \frac{Q_{ist}}{Q_{Nenn}} \quad (4.98)$$

Für die zugeführte bzw. entnommene Kapazität gilt der Zusammenhang über den Lade bzw. Entladestrom und der Zeit nach der „Coulombschen Zählung“:

$$Q = \int Idt \quad (4.99)$$

Mit der Kenntnis über den Ladezustand zu Beginn der Simulation kann der SOC unter Anwendungen der Gleichungen 4.98 und 4.99 berechnet werden. Auf die Bestimmung der Zelltemperatur wird in folgendem eingegangen.

Zur Bestimmung der Zelltemperatur muss zunächst der freigestzte Wärmestrom \dot{Q}_{Zelle} bestimmt werden. Dieser lässt sich in einen reversiblen und einen irreversiblen Teil aufteilen.

$$\dot{Q}_{Zelle} = \dot{Q}_{rev} + \dot{Q}_{irrev} \quad (4.100)$$

Der irreversible Wärmestrom wird durch die an den elektrischen Bauteilen durch interne Widerstände freigesetzte Wärme hervorgerufen. Der gesamte irreversible Wärmestrom beträgt folglich für das Ersetzschaltbild aus Abbildung 4.21:

$$\dot{Q}_{irrev} = \dot{Q}_{irrev,R0} + \dot{Q}_{irrev,RC1} + \dot{Q}_{irrev,RC2} \quad (4.101)$$

Das erste Joulesche Gesetz (Stromwärmegesetz) beschreibt den Zusammenhang von Strom durchflossenen elektrischen Bauteilen und der dabei freigesetzten Wärme. Nach dem Stromwärmegesetz ist die Wärmemenge die während der Zeit t frei wird:

$$Q_{irrev} = I^2 * R * t \quad (4.102)$$

Es gilt zudem der Zusammenhang von elektrischer Leistung zu Stromstärke und Spannung $P = U * I$. Im Gleichgewichtszustand entspricht die elektrische Leistung der freigesetzten Wärmeleistung. In Kombination mit dem Ohm'schen Gesetz lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt ausdrücken:

$$P = \dot{Q}_{irrev} = U * I = I^2 * R \quad (4.103)$$

Für den insgesamt freigesetzten, irreversiblen Wärmestrom gilt der Zusammenhang aus Gleichung 4.104. Darin müssen noch die Ströme die sich durch die Parallelschaltung am RC -Element aufteilen berücksichtigt werden. Für eine Parallele Verzweigung gelten die Kirchhoff'schen Regeln. Der Verlauf der Ströme und Spannungen in einem RC -Element wird auch in Abbildung 4.23 dargestellt.

$$\dot{Q}_{irrev} = R_0 * I^2 + R_1 * I_{R1}^2 + R_2 * I_{R2}^2 = R_0 * I^2 + \frac{U_{RC1}^2}{R_1} + \frac{U_{RC2}^2}{R_2} \quad (4.104)$$

Der reversible Wärmestrom kann unter Betrachtung der Gibbschen Energie G bzw. der freien Gibbs Enthalpie berechnet werden. Die Änderung der Gibbs Enthalpie ΔG eines Prozesses beschreibt wie viel Nicht-Volumenänderungsarbeit das System bei konstantem Druck und konstanter Temperatur

verrichten kann. Für eine Batterie entspricht diese Nicht-Volumenänderungsarbeit der elektrischen. Um diese zu bestimmen wird das Faraday Gesetz (F ist die Faraday Konstante, n die Stoffmenge die an der Reaktion teilnimmt und U_{OCV} die offene Klemmspannung) angewendet:

$$\Delta G = n * F * U_{OCV} \quad (4.105)$$

Leitet man Gleichung 4.105 nach der Systemtemperatur T ab ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\frac{\Delta G}{dT} = n * F * \frac{U_{OCV}}{dT} \quad (4.106)$$

Durch thermodynamische Betrachtungen kann gezeigt werden (siehe z.B.[Sch18]), dass ein Zusammenhang zwischen der temperaturbedingten Änderung der Gibbs Enthalpie zur Änderung der Entropie besteht. Der Zusammenhang lautet:

$$\frac{\Delta G}{dT} = -\Delta S \quad (4.107)$$

Die Kombination der Gleichungen 4.106 und 4.107 liefert:

$$\Delta S = -n * F * \frac{U_{OCV}}{dT} \quad (4.108)$$

Für einen reversiblen Prozess bei konstanter Temperatur gilt nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik für die Änderung der Entropie eines Systems:

$$\Delta S = \delta S_i + \delta S_a = \int \frac{\delta \Psi}{T} + \frac{\delta Q_{rev}}{T} = \frac{Q_{rev}}{T} \quad (4.109)$$

Durch die Kombination der Gleichungen 4.108 und 4.109 erhält man letztlich für die reversible Wärme:

$$Q_{rev} = n * F * T * \frac{U_{OCV}}{dT} \quad (4.110)$$

Durch Ableiten nach der Zeit und das Faradaygesetz $I = \dot{n} * F$ ergibt sich der Wärmestrom:

$$\dot{Q}_{rev} = -\dot{n} * F * T * \frac{U_{OCV}}{dT} = -T * I * \frac{U_{OCV}}{dT} \quad (4.111)$$

Der insgesamt von der Reaktion freigesetzte Wärmestrom aus Gleichung 4.100 lautet somit:

$$\dot{Q}_{Zelle} = \dot{Q}_{rev} + \dot{Q}_{irrev} = -T * I * \frac{U_{OCV}}{dT} + R_0 * I^2 + \frac{U_{RC1}^2}{R_1} + \frac{U_{RC2}^2}{R_2} \quad (4.112)$$

Der Term $\frac{U_{OCV}}{dT}$ kann nicht weiter differenziert werden. Er wird durch Messreihen in Abhängigkeit des SOC bestimmt und gehört damit auch zu den ECP und ist im Modell als Lookup-Table Objekt integriert. Der auf diese Weise berechnete Wärmestrom muss vom Batteriemangement verarbeitet werden um die Batteriezelle in effizienten Temperaturbereichen zu halten. Im Rahmen der Arbeit „Numerische Untersuchung des thermischen Verhaltens von Antriebsbatterien“ [Gie19] wurde eine Simulink Bibliothek entwickelt, die die Möglichkeit zum modularen Aufbau eines vollständigen Batteriemagements bereit stellt. Neben dem Batteriemodell wie es auch hier beschrieben wurde enthält die im Rahmen der Arbeit von Gies [Gie19] entwickelte Bibliothek die folgenden Komponenten:

- Batterie
- Kühlplatte
- Kühlwasserkreislauf

- Pumpe
- Ventilator
- Wärmetauscher
- Steuergerät

Die Modellierung der Zellspannung erfolgt durch die mathematische Umsetzung des in 4.21 abgebildeten elektrischen Ersatzschaltbildes. Wird der Stromkreis geschlossen fließt der Strom I über den linearen Widerstand R_0 . Der Spannungseinbruch lässt sich über das Ohm'sche Gesetz bestimmen:

$$U_{R_0} = R_0 * I \quad (4.113)$$

Ändert sich die Stromstärke ändert sich auch die Verlustspannung über den Widerstand sofort. Der sich im ECM in Serie geschaltete Widerstand hat also keinen Einfluss auf die Dynamik des Modells. Auf den Widerstand R_0 folgt das erste RC -Glied. Durch die Parallelschaltung des Kondensators C_1 zum Widerstand R_1 verfügt das RC -Glied über ein Zeitverhalten. Ein RC -Glied lässt sich mathematisch durch eine Differentialgleichung beschreiben. In Abbildung 4.23 ist ein RC -Element abgebildet und die auftretenden Ströme und Spannungen über den elektrischen Bauteilen ersichtlich.

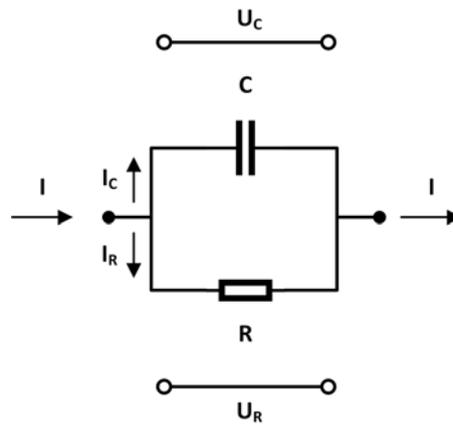


Abbildung 4.23: Veranschaulichung der im RC -Element auftretenden Ströme und Spannungen [EZ19]

Die Herleitung der Differentialgleichung über ein RC -Element beruht auf den Kirchhoff'schen Regeln, dem Ohm'schen Gesetz und dem Zusammenhang von der Ladung eines Kondensators zum Strom. Die beispielsweise in [EZ19] oder [Gie19] hergeleitete Differentialgleichung für ein RC -Glied lautet:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} * (I - \frac{U_R}{R}) \quad (4.114)$$

Für das zweite RC -Element des ECM-Modells gilt diese Differentialgleichung entsprechend genauso.

Für die Spannung der Batteriezelle gilt letztlich:

$$U_{Zelle} = U_{OCV} - U_{R_0} - U_{RC_1} - U_{RC_2} \quad (4.115)$$

Dimensionierung der Traktionsbatterie für das modellierte Fahrzeug

Das im Rahmen dieser Erstmodellierung erstellte Fahrzeugmodell, das sich an einem *BMW i3* orientiert, soll auch über eine Traktionsbatterie mit ähnlichen Eigenschaften zum realen Fahrzeug verfügen. Die zum Einsatz kommende Batterie ist eine Lithium-Ionen Batterie. Über sie ist bekannt, dass es sich

um eine serielle Verschaltung von $n = 96$ Zellen handelt. Diese sind auf acht Module aufgeteilt, die unterflurig im Fahrzeugboden verbaut sind und ein Gesamtgewicht von 230kg aufweisen. Die Batterie verfügt über eine Gesamtkapazität von 94Ah . Die Nennspannung liegt bei 353V [BMW17]. Das thermische Batteriemanagement des Stacks erfolgt über einen Kältemittelkreislauf der auch über einen elektrischen Heizer verfügt [Shi]. Die Modellierung dieser Arbeit beschränkt sich auf die Abbildung des elektrischen Betriebsverhaltens. Das Thermische Verhalten, das durch das Batteriemanagement geregelt wird, wird zunächst ausgeblendet indem die Zelltemperatur konstant gehalten wird. Durch diese Umsetzung wird ein ideales Thermomanagement angenommen und im Modell integriert. Das Batteriemanagement ist demnach ein weiteres Platzhaltermodell, das zu einem späteren Zeitpunkt weiter verfeinert werden kann. Durch die vorhandene Bibliothek, müssen die Funktionsblöcke des Batterimanagements nicht mehr entwickelt sondern lediglich auf die eingesetzte Traktionsbatterie parametrisiert werden und im Modell integriert werden. Die notwendigen Schnittstellen sind bereits in den Funktionsblöcken der Bibliothek vorhanden.

4.7 Steuergerät ECU

4.7.1 Umsetzung Fahrerwunsch

In Kapitel 4.2 wurde der Fahrer als Regler des Fahrzeugmodells beschrieben. Die vom Fahrermodell ausgehenden Größen sind die Gas- sowie Bremspedalstellung. Um diese im Fahrzeug weiter zu verarbeiten werden sie im Steuergerät zunächst in Drehmoment bzw. Bremskraftanforderungen umgesetzt. Die Gaspedalstellung, in Prozent, wird mit dem maximalen momentan zur Verfügung stehendem Drehmoment multipliziert um das vom Motor am Motorausgang angeforderte Drehmoment M_{dem} zu bestimmen.

$$M_{dem} = Acc_{Pedal} * M_{max}(n) \quad (4.116)$$

In 4.116 ist M_{max} , das bei der aktuellen Drehzahl maximal zur Verfügung stehende Drehmoment. Es kann aus den Kennfeldern des Elektromotors auf zwei Weisen bestimmt werden. Die erste Möglichkeit ist, es in Abhängigkeit der Drehzahl aus dem Drehmomentverlauf zu entnehmen. Für die zweite Möglichkeit wird in Abhängigkeit der Drehzahl die entsprechende Leistung aus der Vollastkurve ermittelt und diese durch die Drehzahl geteilt um ein Drehmoment zu bestimmen. Das kleinere der auf die beiden Möglichkeiten bestimmten Drehmomente entspricht dem Begrenzenden Drehmoment M_{max} . Auf die selbe Weise wird aus dem Leistungs- bzw. Drehmomentverlauf das maximal rekuperierbare Drehmoment $M_{rek,max}$ bestimmt. Es wird nach Gleichung 4.117 berechnet. Das rekuperierbare Drehmoment ist negativ und wird mit 0,5 (Annahme) faktorisiert um Verluste im Antriebsstrang pauschal zu berücksichtigen.

$$M_{rek,max} = -0,5 * M_{max}(n) \quad (4.117)$$

Dieses rekuperierbare Drehmoment wird im nächsten Schritt genutzt um aus der Bremspedalstellung die Bremskraft zwischen generatorischem Bremsen und Reibbremsen aufzuteilen. Zunächst wird die Bremspedalstellung in Prozent mit der maximalen Bremskraft $F_{Br,max} = 10\text{kN}$ multipliziert um die angeforderte Bremskraft zu ermitteln.

$$F_{Br,dem} = Br_{Pedal} * F_{Br,max} \quad (4.118)$$

Die nach 4.118 ermittelte Bremskraft wird über einen Aufteilungsschlüssel $Br_{rek_fr} = 0,55$ faktorisiert, sodass im Rahmen dieser Erstmodellierung 55% der Bremskraft aus der Rekuperation stammen. Die Bremskraft die am Rad wirken soll wird nach 4.119 über die Getriebeübersetzung und den Roll-

radius in eine Drehmomentanforderung des Generators umgewandelt:

$$M_{Br,reg,dem} = F_{Br,reg,dem} * \frac{\pi * r_{tyre}}{G} \quad (4.119)$$

Das in Gleichung 4.117 berechnete Drehmoment begrenzt die Drehmomentanforderung. Die verbleibende Bremskraft wird als Bremskraftanforderung an die Reibbremse übermittelt. Zudem wird berücksichtigt, dass generatorisches Bremsen nur dann möglich ist, wenn auch freie Kapazität der Traktionsbatterie vorhanden ist. Die Bremskraftanforderung an die Reibbremse wird im Teilmodell des Antriebsstranges weiterverwendet und die Drehmomentanforderung zum Abbremsen durch ein gegenstehendes Generatormoment wird an den Elektromotor/Generator weitergegeben.

4.7.2 Hybridstrategie

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine heuristische Hybridbetriebsstrategie umgesetzt. Der Anwendungsgrund solcher Betriebsstrategien liegt wie bereits im Grundlagenkapitel 2.3 erläutert wurde in der effizienten Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen. Eine heuristische Betriebsstrategie wurde in diesem Fall gewählt, da sie verhältnismäßig einfach nachzuvollziehen ist. Andere, komplexere Strategien, bedürfen einem deutlich höherem Entwicklungsaufwand bzw. einer breiten Datenbasis. Die Hybridstrategie wird in Simulink durch ein Stateflow Chart realisiert. Bei Stateflow handelt es sich um ein in Simulink eingebettetes Simulationstool zur Beschreibung von Ereignissen die ein System betreffen. Dabei werden verschiedene Zustände (hier: Hybrid-Betriebsmodi) grafisch und hierarchisch dargestellt. Die Übergänge zwischen den einzelnen Zuständen werden Transitionen genannt. Sie definieren in welchen Fällen von einem Zustand in den nächsten übergegangen wird. Beim Erreichen oder Verlassen eines Zustands können Variablen neu definiert werden. Im Falle dieser Arbeit handelt es sich dabei um Bits (0 oder 1) die beispielsweise definieren wie im aktuellen Zustand der Energiefluss zu erfolgen hat. Die Zusammengefassten Zustandsbits werden zu so genannten Bitmasken zusammengefasst. Das Stateflowchart auf dessen Zustände und Transitionen in diesem Kapitel eingegangen wird ist in der nachfolgenden Abbildung 8.4 exemplarisch dargestellt. Im Anhang befindet sich die selbe Darstellung noch in vergrößerter Form.

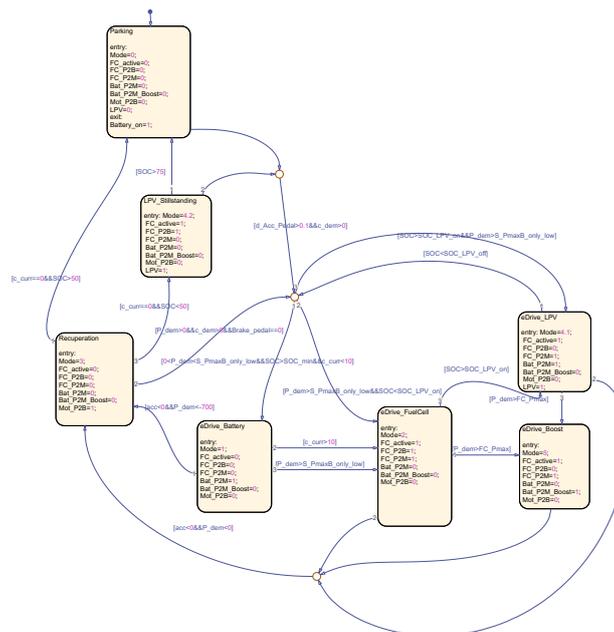


Abbildung 4.24: Screenshot der Hybridstrategie aus Stateflow

Nachfolgend werden die einzelnen Betriebsmodi charakterisiert und deren Ein- Ausgangs- sowie Transitionsbedingungen erläutert. In Abbildung 4.25 sind die Betriebsmodi ähnlich wie es in *Stateflow* umgesetzt ist, abgebildet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden, die Transitionsbedingungen zwischen den Betriebsarten nicht in der Grafik berücksichtigt. Ersichtlich ist jedoch, auf welche Weisen die Betriebsstrategie zwischen den Betriebsarten wechseln kann.

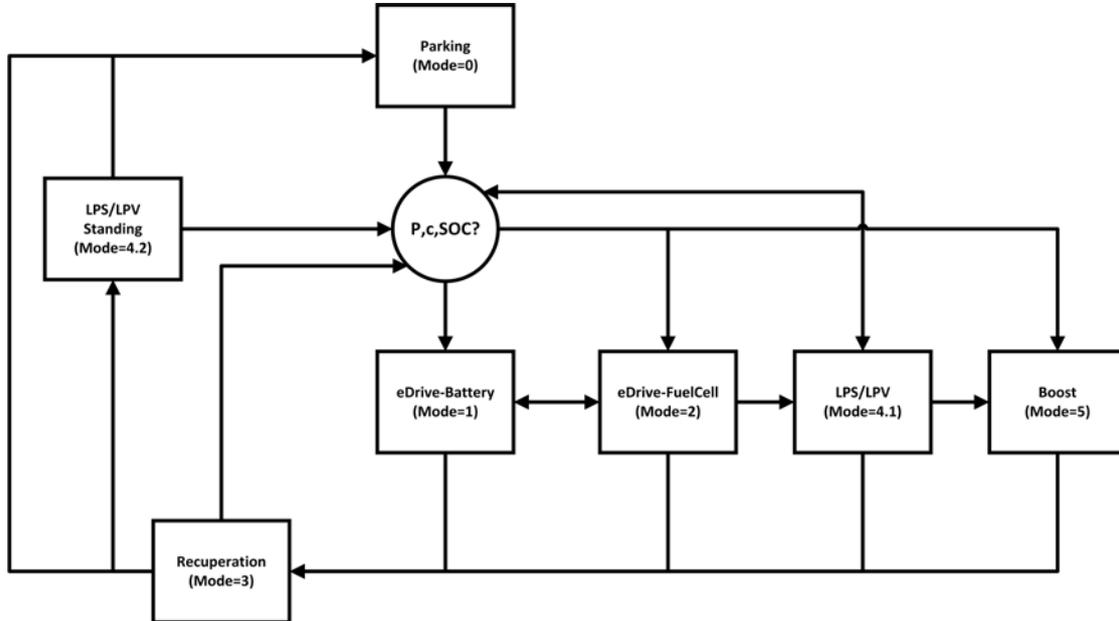


Abbildung 4.25: Veranschaulichung der Betriebsmodi und möglicher Übergänge

Der initiale Betriebszustand für jeden Fahrzyklus ist der Stillstand bzw. Parkbetrieb.

Parking: Mode=0

Im Parkbetrieb steht das Fahrzeug und es wird auch keine Leistung abverlangt. Um den Zustand zu verlassen, muss vom Fahrer die Anforderung vorhanden sein zu beschleunigen. Damit ist die Transitionsbedingung eindeutig definierbar. Für $Acc_pedal > 0,01$ verlässt die Betriebsstrategie den Parkbetrieb zu einem Entscheidungsknoten über welchen die Entscheidung für den nächsten Betriebsmodus gefällt wird. Die Bitmaske für den Parkmodus wird durch die nachstehende Tabelle ersichtlich. Bei den ersichtlichen Bits handelt es sich um Werte, welche bei Erreichen des Betriebszustandes gesetzt werden. Also zu Beginn der Simulation oder dem Ende eines Bremsvorgangs. Lediglich die Größe *Battery_on* wird erst beim Verlassen des Parkmodus gesetzt. Folgt vom Fahrer der Wunsch zu beschleunigen

Tabelle 4.7: Bitmaske für den initialen Parkbetrieb

Steuerbit	Wert
FC_active	0
FC_P2B	0
FC_P2M	0
Bat_P2M	0
Bat_P2M_Boost	0
Mot_P2B	0
Battery_on	exit:1

muss die Betriebsstrategie entscheiden welche Energiequelle die angeforderte Leistung bereitstellen soll. In der Grundapplikation dieses Modells erfolgt die Entscheidung anhand der Größen P_{dem} , was der angeforderten Leistung nach Gleichung 4.9 entspricht, der momentanen Fahrzeuggeschwindigkeit

sowie dem Ladezustand der Traktionsbatterie SOC . Unter der Bedingung, dass die Leistung positiv ist und einen definierbaren Schwellwert nicht überschreitet sowie die Grenzggeschwindigkeit für reines Batteriefahren eingehalten wird und der SOC ausreichend ist, erfolgt die Entscheidung für die nächste Betriebsart zugunsten des reinen Batteriebetriebs. Die Leistungsschwelle $S_PmaxB_only_low$ definiert diese Leistungsgrenze. Die Grenzggeschwindigkeit ist mit $c_Bat_max = 10 \frac{m}{s}$ definiert. Ein Wechsel in den batterieelektrischen Fahrbetrieb findet weiterhin auch nur dann statt wenn der SOC der Batterie höher ist als der mindestens notwendige SOC_min .

Werden diese Grenzen überschritten, fällt die Betriebsstrategie die Entscheidung in den Brennstoffzellenbetrieb zu wechseln. Ist die angeforderte Leistung noch höher, überschreitet sogar die maximale Leistung der Brennstoffzelle, wechselt die Betriebsstrategie ausgehend vom Brennstoffzellenbetrieb in den Boost-Zustand. In diesem Zustand decken dann Brennstoffzelle und Batterie gemeinsam den Bedarf.

eDrive Battery: Mode=1

Fällt die angeforderte Antriebsleistung in den Bereich des Batteriebetriebs und liegt auch die Fahrzeuggeschwindigkeit im passenden Bereich, werden die Steuergrößen der Bitmaske für den reinen batterieelektrischen Antrieb, wie in nachfolgender Tabelle dargestellt gesetzt: Folglich ist während

Tabelle 4.8: Bitmaske für den eDrive Battery Betriesmodus

Steuerbit	Wert
FC_active	0
FC_P2B	0
FC_P2M	0
Bat_P2M	1
Bat_P2M_Boost	0
Mot_P2B	0
LPV	0

diesem Betriebszustand der einzig vorhandene Energiefluss von der Batterie zum Elektromotor des Fahrzeugantriebs.

Auf Grund dreier Szenarien wird der reine Batteriebetrieb verlassen. Ein erhöhter Leistungsbedarf, welcher den Betrieb der Brennstoffzelle notwendig macht, führt in den zugehörigen Betriebszustand (Mode=2). Er wird ausgehend vom Batteriebetrieb aktiv wenn der obere Schwellwert für den reinen Batteriebetrieb überschritten wird $P_{dem} > S_PmaxB_only_up$. Ein Wechsel in den reinen Brennstoffzellenbetrieb wird außerdem dann vollzogen wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit den Grenzwert c_Bat_max überschreitet. Ein direkter Übergang vom Batteriegespeisten Fahren in den kombinierten Boost Betrieb (Mode=5) ist nicht vorgesehen. Die Aktivierung dessen findet immer zunächst über den Brennstoffzellenbetrieb statt. Sobald das Steuergerät einen Verzögerungswunsch des Fahrers, entweder durch Betätigung der Bremse oder durch Rücknahme der Gaspedalstellung, feststellt wechselt die Betriebsstrategie in den Rekuperationsbetrieb. Der Verzögerungswunsch wird durch negative Beschleunigungs- und Leistungsanforderungen am Elektromotor festgestellt.

eDrive Fuel Cell: Mode=2

Im reinen Brennstoffzellenbetrieb wird die angeforderte Motorleistung ausschließlich von der Brennstoffzelle zur Verfügung gestellt. Die Energiebereitstellung der Brennstoffzelle wird in Kapitel 4.5.7 betrachtet. Das Ergebnis ist, dass die Brennstoffzelle ihren optimalen Betriebspunkt bei ca. 5% der Nennleistung erreicht. Um Betriebspunkte in der wirkungsgradschwachen Leistungsregion unter 5% zu vermeiden, wird eine untere Leistungsanforderung bei dieser Grenze eingeführt. Die Brennstoff-

zellenleistung überschreitet dann die angeforderte Leistung. Die über die Anforderung heraus bereit gestellte Energie wird zum Laden der Batterie genutzt.

Der zum Betrieb des Brennstoffzellensystem zum Einsatz kommende Kompressormotor wird von der Batterie gespeist. Dies kann darin begründet werden, dass im dynamischen Betrieb die Leistung der Brennstoffzelle nacheilt. Dieser Effekt kann dadurch minimiert werden, dass die Kompressorleistung sofort durch die Batterie zur Verfügung gestellt wird. Die Bitmaske für den eDrive Fuel Cell ergibt sich folglich:

Tabelle 4.9: Bitmaske für den eDrive Fuel Cell

Steuerbit	Wert
FC_active	1
FC_P2B	1
FC_P2M	1
Bat_P2M	0
Bat_P2M_Boost	0
Mot_P2B	0
LPV	0

Der reine Brennstoffzellenbetrieb kann ebenfalls wie der Batteriebetrieb durch drei Szenarien beendet werden. Am naheliegendsten ist die Einleitung des Verzögerungsvorgangs durch $Brake_Pedal > 0$ oder wegen einer negativen Drehmomentanforderung durch die Rücknahme der Gaspedalstellung. Die Transition zur Einleitung der Rekuperation gleicht somit der aus dem reinem Batteriebetrieb. Wird die angeforderte Leistung nicht verringert sondern weiter erhöht, sodass die Brennstoffzelle an ihre Leistungsgrenze FC_Pmax kommt wird der Boost Modus aktiv. Hier ist eine Hysterese vorgesehen um einen ständigen Wechsel zwischen den Betriebsarten zu vermeiden. Dabei liegt die Eintrittsgrenze in den „Boost“ bei der maximalen Brennstoffzellenleistung. Die Austrittsgrenze, um wieder in den reinen Brennstoffzellenbetrieb zu gelangen, liegt um 1kW darunter.

Verfügt die Traktionsbatterie über einen ausreichend hohen Ladezustand $SOC > SOC_LPV_on = 60\%$ kann von der Betriebsstrategie die Lastpunktverschiebung aktiviert werden. Während dieser wird die Brennstoffzellenleistung abgesenkt, um näher am Betriebsoptimum und somit höheren Systemwirkungsgraden zu arbeiten.

Recuperation: Mode=3

Sollte der Fahrer eine Verzögerung wünschen, wird der Bremsvorgang und damit auch der Rekupe-rationsbetrieb erkannt. Bereits durch die Rücknahme des Gaspedals, was zu einer sofortigen negativen Beschleunigung des Fahrzeugs führt wird der Rekuperationsbetrieb eingeleitet. Während des Verzögerungsvorgangs kann kinetische Energie des Fahrzeugs durch den generatorischen Betrieb des Elektromotors zurückgewonnen, „rekupertiert“, werden. Der Elektromotor wird dabei durch die Räder angetrieben und bremst diese. Das dadurch anliegende negative Motormoment erzeugt elektrische Energie, welche in der Batterie gespeichert wird. Die Energieübertragung während der Rekuperation erfolgt demnach vom Elektromotor zur Batterie, die von der Betriebsstrategie gesetzten Steuerbits sind Tabelle 4.10 zu entnehmen.

Man spricht im Zusammenhang dieses Bremsengriffs durch den Elektromotor auch vom so genannten „One-Pedal-Drive“. Fahrzeuge in denen ein solcher Fahrstil angeboten wird, benötigen theoretisch kein Bremspedal. Die alleinige Rücknahme der Gaspedalstellung führt zum Bremsvorgang. Durch einerseits das generatorische, gegendrehende Bremsmoment des Motors und den aktiven Bremsengriff über die Reibbremse. In diesem Fahrzeugmodell führt die alleinige Rücknahme der Gaspedalstellung jedoch nicht zu einem aktivem Bremsengriff, sondern lediglich zum besagten gegendrehendem Moment im Generatorbetrieb des Elektromotors, sodass eine Bremswirkung entsteht.

Der Rekuperationsbetrieb wird verlassen, sollte das Fahrzeug zum Stillstand kommen. Die Grenze

Tabelle 4.10: Bitmaske für den Rekuperationsbetrieb

Steuerbit	Wert
FC_active	0
FC_P2B	0
FC_P2M	0
Bat_P2M	0
Bat_P2M_Boost	0
Mot_P2B	1
LPV	0

für diesen Zustand und damit die Transitionsbedingung für den Wechsel in den Parkmodus (Mode=0) ist $c_{veh} = 0 \frac{m}{s}$. Liegt der *SOC* am Ende des Bremsvorgangs allerdings unter $SOC < 50\%$ wird zunächst die Lastpunktverschiebung im Stillstand (Mode=4.2) aktiv. Wird der Rekuperationsbetrieb nicht bis zum Fahrzeugstillstand beibehalten sondern zuvor wieder beschleunigt, wechselt die Betriebsstrategie zu dem bereits erwähnten Entscheidungsknoten, der Leistungs-, Geschwindigkeits- und *SOC* abhängig wieder entscheidet welche Betriebsart aufgenommen werden soll.

Lastpunktverschiebung: Mode=4

Bei einem Hybridfahrzeug bestehend aus VKM und EMG treibt in der Lastpunktverschiebung der Verbrennungsmotor den Generator zur Stromerzeugung an [Hof14]. Da im Brennstoffzellenhybrid die Zwischenstufe über die Rotationsenergie der Kurbelwelle entfällt, kann die Batterie durch die Brennstoffzelle direkt geladen werden. Es muss lediglich ein geeigneter Betriebspunkt der Brennstoffzelle vorgegeben werden und die Leistungselektronik den Energiefluss entsprechend schalten und das Spannungsniveau regulieren.

Die Lastpunktverschiebung ist ein Betriebsmodus mit dem primären Ziel den Wasserstoffverbrauch zu minimieren. Dabei wird die angeforderte Leistung zum Antrieb des Fahrzeugs durch die Brennstoffzelle entweder erhöht oder verringert, um die Brennstoffzelle möglichst nahe an ihrem Verbrauchsoptimum zu betreiben. In 4.26 wird das Prinzip der Lastpunktverschiebung verdeutlicht. Innerhalb dieser Grundapplikation werden drei verschiedene Ausprägungen der Lastpunktverschiebung unterschieden. Die erste Art ist das Anheben der Leistung für Anforderungen unterhalb der optimalen Leistung $P_{FC,opt}$. Dieser Betriebsmodus ist bereits im reinen Brennstoffzellenbetrieb realisiert indem die Leistung auf diesen Wert angehoben wird und überschüssige Energie zum Laden der Batterie bereit gestellt wird. Er muss daher nicht gesondert erkannt und parametrisiert werden.

Lastpunktverschiebung: Last absenken: Mode=4.1

Die zweite Lastpunktverschiebungsart ist das Absenken der Brennstoffzellenleistung, das in Abbildung 4.26 durch „LPV-Last absenken“ gekennzeichnet ist. Um die verschiedenen Lastpunktverschiebungsmodi zu Kennzeichen wird das Last absenken mit $Mode=4.1$ definiert. Für das Absenken der Leistung wird mehr Energie aus der Batterie entnommen. Es stellen folglich die Brennstoffzelle und die Batterie die Leistung für den Antrieb gemeinsam bereit. Dementsprechend werden die Bits für die LPV gesetzt, wie es Tabelle 4.11 zu entnehmen ist. Das Last absenken unterliegt vor allem den Grenzen des Batterie-ladezustands. Es kann nur aktiv werden, wenn die Batterie auch ausreichend geladen ist. Die Grenze für die Aktivierung wird mit $SOC_{LPV_on} = 60\%$ gewählt. Liegt der *SOC* darüber wird ausgehend vom eDrive FuelCell (Mode=2) (oder dem Hauptentscheidungsknoten) die Lastpunktverschiebung aktiv. Während dieses Last Absenkens muss die Aufteilung der angeforderten Leistung definiert werden und von der Leistungselektronik dementsprechend geschaltet werden. Es gilt je höher der *SOC* der Batterie desto stärker kann die Brennstoffzellenleistung abgesenkt werden. Umgekehrt, soll bei einem *SOC* nahe der unteren *SOC*-Grenze für den LPV Betrieb, SOC_{LPV_off} , die Brennstoffzelle wieder

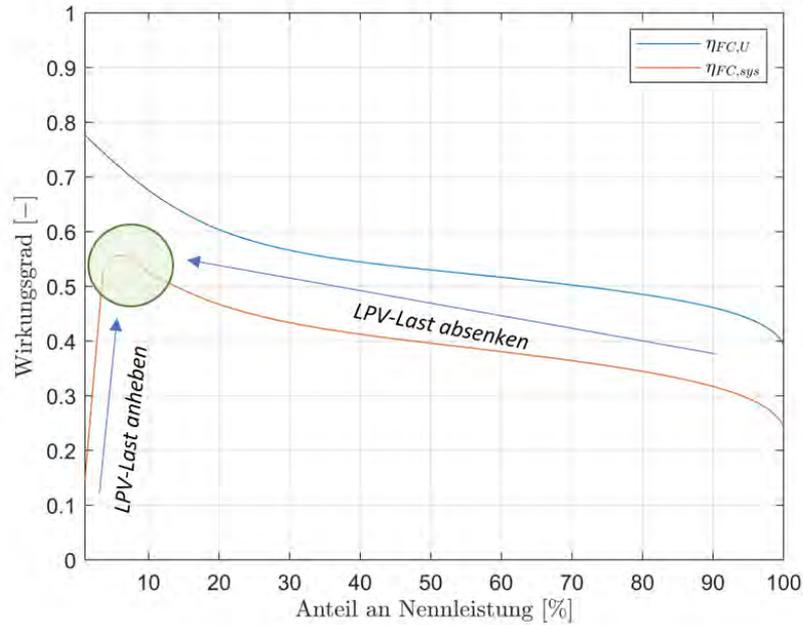


Abbildung 4.26: Visualisierung der Lastpunktverschiebung

Tabelle 4.11: Bitmaske für die Lastpunktverschiebung

Steuerbit	Wert
FC_active	1
FC_P2B	0
FC_P2M	1
Bat_P2M	1
Bat_P2M_Boost	0
Mot_P2B	0
LPV	1

höhere Anteile der Leistungsanforderung decken, sodass die Batterie weniger stark entladen wird. Es wird eine lineare Faktorisierung gewählt, sodass bei $SOC = 100\%$ die Brennstoffzelle wieder in ihrem optimalen Betriebspunkt arbeitet und bei $SOC = 50\%$ die Brennstoffzelle wieder die gesamte alleinige Energiebereitstellung übernimmt. Zwischen den beiden Punkten erfolgt die Aufteilung linear.

Die Lastpunktverschiebung wird beendet sollte der SOC die untere Grenze $SOC_{LPV_off} = 50\%$ erreichen. Übersteigt die Leistungsanforderung die Brennstoffzellenleistung wird in den Boost-Betrieb gewechselt und für eine Verzögerungsanforderung erfolgt die Einleitung der Rekuperation analog zu den anderen Betriebsarten.

Lastpunktverschiebung im Stillstand: Mode=4.2

Der dritte Zustand der Lastpunktverschiebung ist das Lastpunktverschieben im Stillstand. Es existiert keine Leistungsanforderung vom Antriebsstrang, trotzdem wird die Brennstoffzelle betrieben um die Batterie nachzuladen. Die von der Betriebsstrategie gesetzten Steuerungsbits sind Tabelle 4.12 zu entnehmen.

Der Zustand kann ebenso wie der reine Parkzustand nur über einen vorangegangenen Rekuperationsbetrieb erreicht werden, der bis zum Fahrzeugstillstand ($c = 0 \frac{m}{s}$) anhält. Für einen $SOC < 50\%$ wechselt die Betriebsstrategie nach der Rekuperation in den LPV Betrieb anstatt in den Parkbetrieb.

Idealerweise wird die Brennstoffzelle auch zum Laden der Batterie im Betriebsoptimum bei 5% der Nennleistung betrieben. Allerdings wird sie in diesem Betriebspunkt nur sehr langsam geladen.

Tabelle 4.12: Bitmaske für die Lastpunktverschiebung im Stillstand

Steuerbit	Wert
FC_active	1
FC_P2B	1
FC_P2M	0
Bat_P2M	0
Bat_P2M_Boost	0
Mot_P2B	0
LPV	1

Es wird daher eine Leistungskurve hinterlegt, bei welcher die Brennstoffzelle zunächst mit 60% ihrer Nennleistung betrieben wird. Die Leistung sinkt dann mit steigendem *SOC* bis zum Betriebsoptimum der Brennstoffzelle ab. Erreicht der *SOC* im Stillstand durch das nachladen aus der Brennstoffzelle den Grenzwert von $SOC > 75\%$ wird in den regulären Parkbetrieb gewechselt. Das Lastpunktverschieben im Stillstand wird auf die gleiche Weise, über einen Beschleunigungswunsch, beendet wie der Parkbetrieb.

Boost: Mode=5 Im Boost Betrieb kann die angeforderte Leistung weder von der Batterie, noch von der Brennstoffzelle allein bereitgestellt werden. Im Boost Betrieb wird daher die Leistung von beiden Energiequelle parallel bereitgestellt. Der eindeutige Indikator für diesen Betriebszustand ist das überschreiten der maximalen Brennstoffzellenleistung FC_P_max . Liegt die Leistungsanforderung darüber wird die Brennstoffzelle mit ihrer maximalen Leistung betrieben und der Restbedarf wird aus der Batterie entnommen, genauso die Kompressorleistung für den Betrieb der Brennstoffzelle. Im Boost Betrieb können also alle dem System zur Verfügung stehenden Energiequellen bis an ihre Leistungsgrenzen betrieben werden. Ein typisches Fahrmanöver ist eine Vollastbeschleunigung des Fahrzeugs aus dem Stillstand. Die folglich von der Betriebsstrategie gesetzten Steuerungsbits sind in der nachfolgenden Tabelle 4.13 entsprechend abgebildet.

Tabelle 4.13: Bitmaske für den Boost Betriesmodus

Steuerbit	Wert
FC_active	1
FC_P2B	0
FC_P2M	1
Bat_P2M	0
Bat_P2M_Boost	1
Mot_P2B	0
LPV	0

Mit der in diesem Kapitel beschriebenen Betriebsstrategie kann das Steuergerät situationsbedingt entscheiden, welche Betriebsart die momentan günstigste ist. Dabei werden vor allem die angeforderte Leistung, die Fahrzeuggeschwindigkeit und der Batterieladezustand verwendet um festzustellen welche Betriebsart das ist. Bei dieser heuristischen Betriebsstrategie werden feste Grenzwerte vorgegeben um beispielsweise die Grenzgeschwindigkeit zwischen reinem Fahren aus der Batterie und reinem Fahren aus der Brennstoffzelle zu definieren. Auch für andere Parameter werden Grenzwerte definiert und diese ggf. durch Hysteresegrenzen erweitert um ständige Wechsel zwischen zwei Betriebsarten zu vermeiden. In Kapitel 5.2 erfolgt eine Analyse der Gesamtfahrzeugsimulation die auch eine Betrachtung der entwickelten Betriebsstrategie beinhaltet. Bei den eingeführten Grenzen die im Rahmen dieser Basisbedatung gewählt wurden handelt es sich um grob angenommene Werte die im Rahmen der Simulation zu einem plausiblen Verhalten der Betriebsstrategie führen. Diese Parameter können im Rahmen von Folgearbeiten durch numerische Untersuchungen optimiert werden.

4.8 Leistungselektronik

Das Teilmodell der Leistungselektronik ist als Platzhaltermodell ausgeführt. Es erfüllt zwei Aufgaben:

1. Die Aufteilung der am Motoreingang benötigten Leistung in Abhängigkeit von der durch die Hybridbetriebsstrategie gewählten Betriebsart auf Batterie und Brennstoffzelle
2. Die Abbildung der Spannungswandler zwischen den Energiequelle

Die Umsetzung der Betriebsart, die von der Betriebsstrategie festgelegt wird findet in diesem Teilmodell durch eine Leistungsverzweigung statt. Die Eingangsgrößen sind die vom Elektromotor angeforderte Leistung am Eingang $P_{Mot,in}$ nach Gleichung 4.9 und alle Steuerungsgrößen der Hybridbetriebsstrategie. Außerdem erfolgt eine Rückmeldung der momentanen Brennstoffzellen - und Batterieeigenschaften über den jeweiligen Datenbus. Die Ausgangsgrößen des Teilmodells sind die Leistungsanforderungen an Batterie und Brennstoffzelle.

Um die Leistungsanforderung umzusetzen werden „If“-Vergleiche mit den Steuergrößen der Hybridbetriebsstrategie durchgeführt. Durch diese Steuerungsgrößen ist immer genau definiert wie die Energieflüsse zu erfolgen haben und ob sie ggf. noch skaliert werden, wie beispielsweise während der Lastpunktverschiebung. Die Skalierung erfolgt ebenfalls in diesem Teilmodell. Im Modell der Leistungselektronik wird dauerhaft die angeforderte Leistung für jede Betriebsart berechnet. Die Leistungsanforderung an die Brennstoffzelle ergibt sich als Summe der zuvor aufgeteilten und ggf. skalierten Leistung:

$$P_{FC,dem} = \sum P_i = P_{eDriveFC} + P_{LPV4.1} + P_{LPV4.2} + P_{BoostFC} \quad (4.120)$$

In Gleichung 4.120 ist durch die „If“-Vergleiche immer nur die Leistung größer Null, $P_i > 0$, die gerade von der Betriebsstrategie angefordert wird.

Für die Batterie erfolgt die Aufteilung der angeforderten Leistung analog. Es gilt, dass die Batterie die Leistung bereitstellen muss, welche nicht bereits durch die Brennstoffzelle gedeckt wird.

$$P_{Battery,dem} = P_{mot,in} - P_{FC} \quad (4.121)$$

Diese Leistungsanforderung wird dann, genauso wie bei der Brennstoffzelle, durch „If“-Vergleiche mit dem festgelegten Energiefluss der Betriebsstrategie, aufgeteilt.

$$P_{Battery} = \sum P_i = P_{M2B} + P_{B2M} + P_{B2M,Boost} + P_{FC2B} + P_{Comp} \quad (4.122)$$

Die Vorzeichenkonvention der Leistung ist $P_i < 0$ für das Entladen der Batterie und umgekehrt für das Laden, während der Rekuperation oder durch die Brennstoffzelle. Die Traktionsbatterie ist in diesem Modell zudem für die Bereitstellung der Kompressorleistung des Brennstoffzellensystems P_{comp} zuständig.

Spannungswandler haben in Hybridfahrzeugen die Aufgabe die elektrische Energie der Systemkomponenten an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen. Dazu gehört beispielsweise die Umwandlung der Gleichspannung aus Brennstoffzelle und/ oder Batterie in die vom Drehstrommotor benötigte Wechselspannung (DC/AC) mit der passenden Amplitude, Frequenz und Phasenlänge. In einem Brennstoffzellenfahrzeug kommen außerdem Gleichspannungswandler (DC/DC) zur Hochspannungsniveauregulierung zwischen Batterie und Brennstoffzelle zum Einsatz [Hof14]. Die im modellierten Brennstoffzellenfahrzeug vorkommenden Spannungswandler werden in 4.27 dargestellt. Es sei erwähnt, dass hier die unterschiedlichsten Kombinationsmöglichkeiten bestehen. Mit den abgebildeten Spannungswandlern DC/DC, DC/AC und AC/DC werden „standard“ Bauteile verwendet. Neben diesen existieren bereits

Module welche die einzelnen Aufgaben kombinieren. In [TKDH05] wird beispielsweise ein bidirektionaler Gleichspannungswandler mit mehreren Eingängen beschrieben. Bei Einsatz solcher Baugruppen verändert sich der Aufbau des Brennstoffzellenantriebs entsprechend. Im Umfang dieser Arbeit wer-

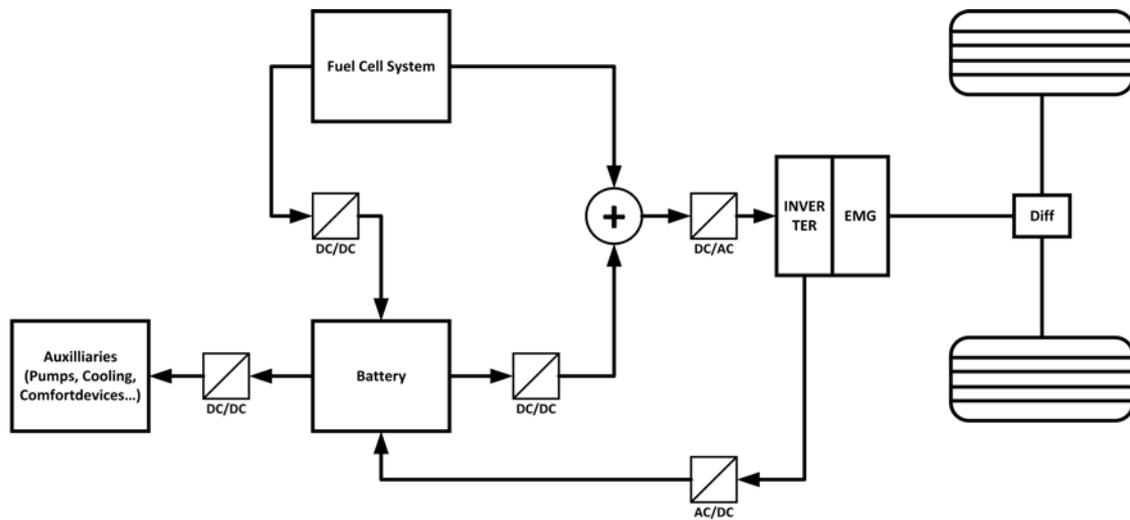


Abbildung 4.27: Aufbau des Brennstoffzellenantriebs mit Leistungselektronik

den die Spannungswandler nur als Platzhaltermodelle an den wie in Abbildung 4.27 dargestellten Positionen integriert. Sie sind aus Gründen der Vollständigkeit vorhanden, auch wenn die relevanten, charakteristischen Eigenschaften wie das elektrische Verhalten und die Eigendynamik der Komponenten nicht abgebildet werden. Die einzelnen Spannungswandler werden ausschließlich durch einen konstanten Wirkungsgrad berücksichtigt, der die Leistung reduziert. Heutige Spannungswandler haben sehr gute Wirkungsgrade im Bereich $> 98\%$, weshalb die angenommenen Wirkungsgrade auch in diesem Bereich liegen. Die Anpassung der Spannungsniveaus bei gleichzeitigem Betrieb aus Brennstoffzelle und Batterie wird durch diese Wirkungsgradreduzierende Modellierung nicht berücksichtigt. Das selbe gilt auch für den Inverter des Elektromotors oder den Gleichrichter, der für den Rekuperationsbetrieb benötigt wird. Die elektrotechnische Modellierung dieser Spannungswandler ist Gegenstand fortführender Arbeiten.

5 Analyse und Potential des Modells

An dieser Stelle erfolgt eine Plausibilisierung ausgewählter Systembestandteile und des gesamten Fahrzeugs. Auf eine Plausibilisierung des Energiespeichersmodells wird verzichtet, da dies bereits in der Arbeit von [Gie19] erfolgt und das Modell lediglich für den Gebrauch in dieser Arbeit umparametrisiert wurde. Da das Thermomanagement ebenfalls noch nicht implementiert ist empfiehlt es sich sobald ein reales Hybrid-Prüfstandsystem vorhanden ist das gesamte Modell auf dieses zu parametrisieren und dann auch anhand von realen Messdaten abzugleichen. Dieses Vorgehen gilt für alle im Modell integrierten Teilsysteme da für keines ein Abgleich mit realen Messdaten erfolgen kann. Die nachfolgenden Plausibilisierungen stützen sich allein auf das zu erwartende physikalische Verhalten und an zu erwartenden Größenordnungen auf Basis physikalischer Größen und den Ergebnissen anderer Arbeiten.

5.1 Brennstoffzelle (statisch, dynamisch)

Wie es bereits in Kapitel 2 verdeutlicht wurde basiert die Brennstoffzellenkennlinie, die Strom-Spannungskennlinie, auf Abweichungen der Zellspannung von ihrem maximal möglichen Potential. In Kapitel 2 wurden Gleichungen hergeleitet welche diese Abweichungen bzw. Überspannungen charakterisieren. Kapitel 4.5 beschreibt halb-empirische Gleichungen die eben dieses Verhalten durch ein elektrisches Ersatzschaltbild in Abhängigkeit der Systemparameter (vor allem Drücken und Temperatur) abbilden. Bei der Simulation wie auch Messdatenerfassung der Kennlinie handelt es sich um eine statische Simulation. Für die Erfassung am Prüfstand gilt es daher eine angemessene Einschwingdauer des Systems zu berücksichtigen bevor ein Messpunkt aufgenommen wird und ein nächster eingestellt wird. Durch dieses Vorgehen werden keine dynamischen Effekte auf die Kennlinie mehr berücksichtigt. Mit sich ändernden Stromstärken ändert sich auch die Temperatur der Brennstoffzelle. Erfolgt kein aktives Thermomanagement des Brennstoffzellenstacks muss beim Einschwingen des Betriebspunktes abgewartet werden bis sich auch die Temperatur komplett eingeschwungen hat, da sich diese ebenfalls auf die Zellspannung auswirkt. Verfügt das System über eine Temperaturregelung kann die Stacktemperatur über den gesamten Arbeitsbereich konstant gehalten werden. Die Berücksichtigung der Einschwingdauer muss auch bei der statischen Simulation der Kennlinie beachtet werden. Die Ergebnisse dieser Simulation sind für verschiedene, konstante Temperaturen in der nachfolgenden Abbildung 5.1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich mit steigender Temperatur auch die Stackspannung erhöht was im Einklang mit dem Verlauf der Nernstspannung aus Gleichung 2.6 steht. Weiterhin lässt sich der temperaturbedingte Einfluss auf die Überspannungen erkennen. Diese verlaufen für die dargestellten Temperaturen nicht parallel, was auf die temperaturabhängige Parametrisierung der Ersatzschaltbildparameter in Kapitel 4.5.1 zurückzuführen ist. Der Einfluss der Temperaturvariation auf die Ohm'schen Überspannung ist nur gering ausgeprägt. Im Bereich in denen sie überwiegen verlaufen die Spannungskennlinien ungefähr parallel. Die Begründung dafür liegt in der konstant gehaltenen Feuchtigkeit ($MWC = 60\%$) der Membran. Dies führt dazu, dass sich die Membranleitfähigkeit und damit auch der Ohm'sche Widerstand kaum ändern. Eine Variation des Feuchtigkeitsgehalts ist in nachstehender Abbildung 5.2 ersichtlich. Für diese Simulation wurde die Temperatur konstant bei $320K$ gehalten und die Membranfeuchtigkeit variiert. Hier zeigt sich der erhebliche Einfluss der Befeuchtung von Brennstoffzellen. In Bereichen unter $MWC = 50\%$ ist mit enormen Einbrüchen der Stackspannung durch hohe Ohm'sche Widerstände zu rechnen. Gleichzeitig bietet dieser Parameter dadurch hohes Optimierungspotential. Durch eine gute Regelung der Membranfeuchtigkeit lassen sich deutlich höhere Wirkungsgrade erzielen. Die Regelung der Membranfeuchtigkeit geht stets mit einer Temperaturregelung des Stacks einher da diese wesentlich die Membranfeuchtigkeit beeinflusst. Gemeinsam mit der Entwicklung dieser Regelungsstrategien sollte ein Wasserdiffusionsmodell der Membran Gegenstand

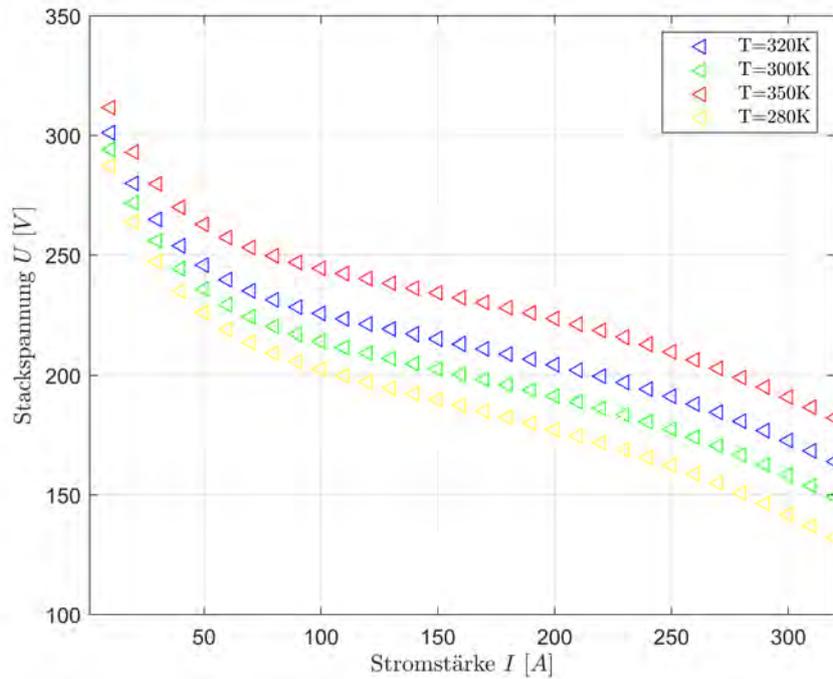


Abbildung 5.1: Strom-Spannungskennlinie unter Variation der Temperatur mit $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - MWC = 60\%$

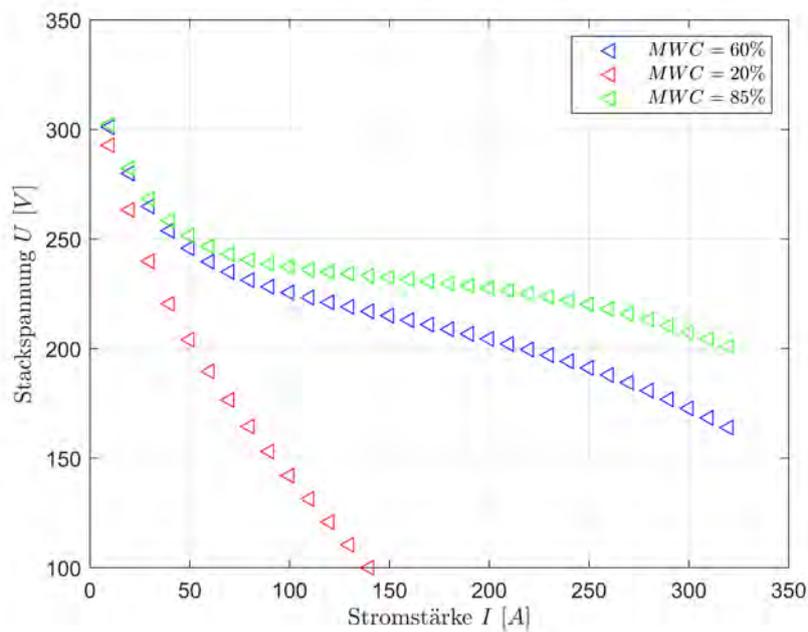


Abbildung 5.2: Strom-Spannungskennlinie unter Variation der Membranfeuchtigkeit mit $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - T_{FC} = 320\text{K}$

einer fortführenden Arbeit sein. Neben diesen beiden exemplarisch ausgewählten Parametervariation von Temperatur und Membranfeuchtigkeit können im erstellten Modell gezielt auch andere Parameter beeinflusst und im Rahmen von Parameterstudien optimiert werden. Derartige Optimierungsrechnungen sind eine mögliche Anwendung des entwickelten Modells. Die durchgeführten Rechnungen unter Variation von beteiligten Parametern führen zu plausiblen Verläufen in der Spannung des Brennstoff-

zellenstacks. Das statische Verhalten der Brennstoffzelle kann folglich durch das Modell für das ausgewählte (fiktive) Brennstoffzellensystem abgebildet werden. Wie robust die Modellierung tatsächlich ist kann sich erst im Rahmen einer Modellparametrisierung auf ein Zielsystem und Abgleich mit dessen Messdaten zeigen.

Neben dem statischen Verhalten wird auch die Dynamik der Brennstoffzelle untersucht. Das dynamische Verhalten wurde bereits im Kapitel 4.5.1 thematisiert und beschrieben. Dort wurden auch Messdaten eines realen Systems abgebildet die das dynamische Verhalten im lang- und kurzzeitigen Zeitbereich darstellen (Abbildungen 4.7 und 4.8). An dieser Stelle soll gezeigt werden, dass das dynamische Verhalten des modellierten System qualitativ mit dem realen Verhalten übereinstimmt. Die kurzzeitdynamische Spannungsantwort des modellierten Stacks auf einen negativen Stromimpuls ist in Abbildung 5.3 ersichtlich. Der Verlauf deckt sich mit dem erwartetem kapazitivem Verlauf. Zunächst steigt die Spannung auf Grund der nicht zeitrelevanten Ohm'schen Verluste abrupt an worauf sich anschließend das kapazitive Verhalten einstellt. Der langzeitdynamische Spannungsverlauf verfügt über wesentlich höhere Zeitkonstanten und ist daher in einer weiter Abbildung 5.4 dargestellt.

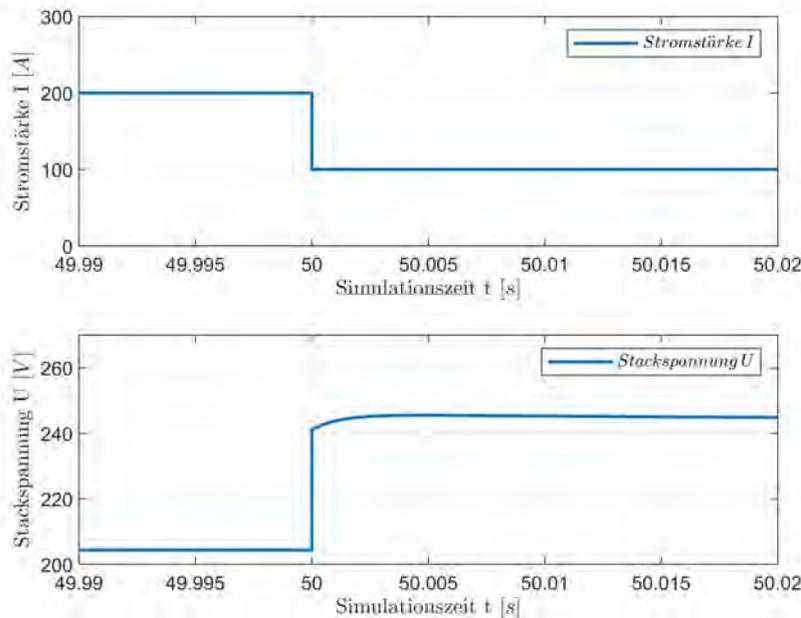


Abbildung 5.3: Spannungsantwort des Brennstoffzellensystems auf einen Stromsprung von 200A auf 100A für $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - MWC = 60\%$

Da die Temperatur durch eine idealisierte Temperaturregelung konstant gehalten wird ist der Einfluss dieser nicht in der Abbildung ersichtlich. Das Über bzw. Unterschwingen der Spannung auf die Stromimpulse resultiert aus der Trägheit der Reaktionsgase und der Bereitstellung dieser durch den Kompressor. Die in Betrag und Richtung variierenden Stromimpulse spiegeln das in [EZ19] und [Hau07] festgestellte Verhalten wieder, wonach hohe ΔI auch zu höherem Über- bzw. Unterschwingen der Spannung führen. Deaktiviert man die idealisierte Temperaturregelung zugunsten des Temperaturmodells, das in 4.5.5 beschrieben wird, stellt man auch den Einfluss dessen auf das dynamische Verhalten fest. Da eine Brennstoffzelle dieser Größenordnung allerdings ohne aktive Kühlung bzw. Temperaturmanagement überhitzt macht es keinen Sinn den Einfluss dessen weiter zu besprechen. Aktiviert man dennoch das Temperaturmodell erreicht die Brennstoffzelle ohne Kühlung durch die hohen Ströme schnell Temperaturen über 100°C , die im Betrieb wegen des Austrocknens der Membran

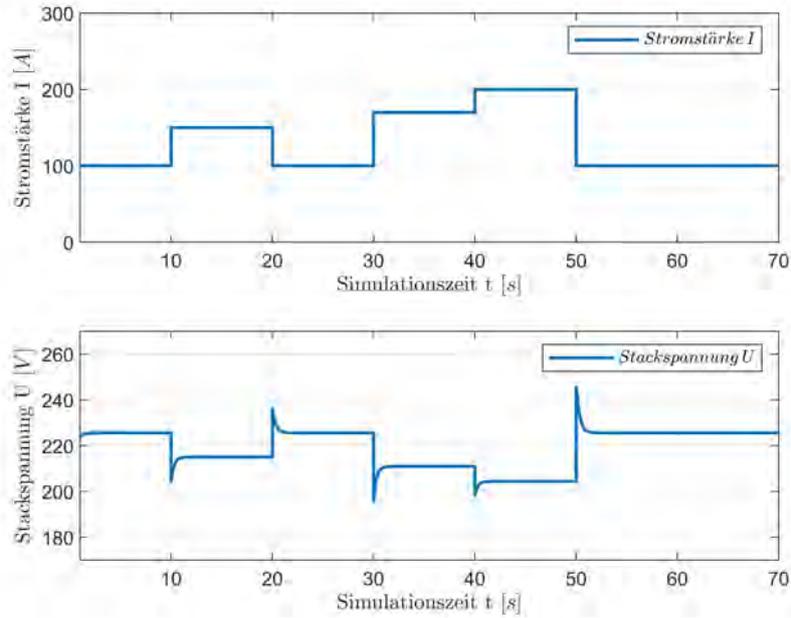


Abbildung 5.4: Spannungsantwort des Brennstoffzellensystems auf verschiedene Stromsprünge für $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - MWC = 60\%$

unerwünscht sind. Um aufzuzeigen, dass bei der späteren Integration einer Temperaturregelung eben dieses dynamische Verhalten mit berücksichtigt wird, wird zu Demonstrationszwecken ein konstanter Wärmestrom zur Kühlung des Stacks eingeführt. Trotz dieser Wärmeabfuhr erhöht sich die Temperatur konstant während der Simulationszeit um 10°C . Der Spannungsverlauf auf einen Stromimpuls von 150-100A ist in Abbildung 5.5 ersichtlich. Zu Erkennen ist, dass sich der Spannungsverlauf nach

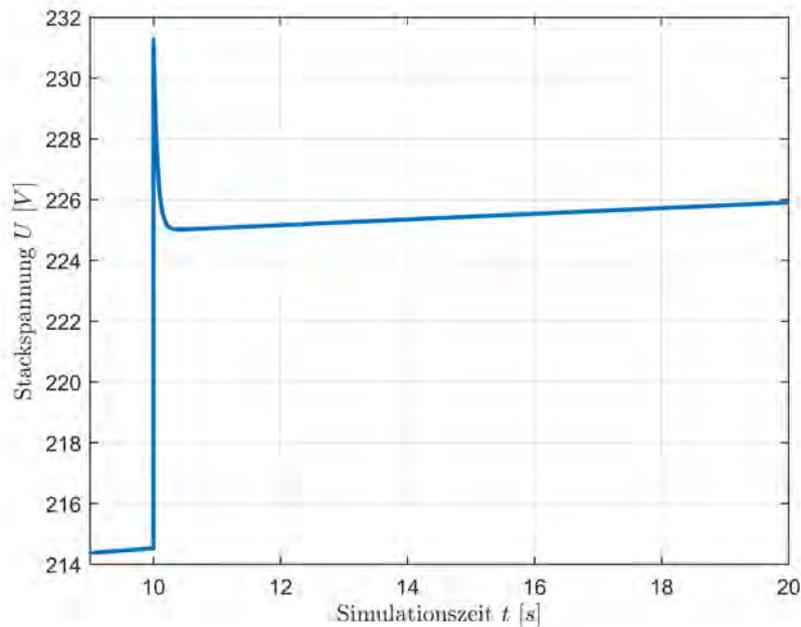


Abbildung 5.5: Spannungsantwort des Brennstoffzellensystems auf einen Stromsprung mit $\Delta I = -50\text{A}$ für $N = 340 - A = 280\text{cm}^2 - MWC = 60\%$ und aktivem Temperaturmodell

dem Überschwingen noch nicht auf die eingeschwungene Spannung eingependelt hat. Vielmehr steigt

die Spannung weiter an, was auf die weiter ansteigende Temperatur zurückzuführen ist. Nach dem Stromimpuls ist die Stromstärke geringer als zuvor, was eine geringere Wärmeentwicklung in der Zelle bewirkt. Wegen der nicht vorhandenen Temperaturregelung bzw. zu geringer konstanter Kühlleistung steigt diese daher trotzdem noch weiter an, wenn auch mit geringerer Steigerungsrate. Daraus lässt sich auch ableiten, dass die Temperatur sich zum Zeitpunkt des Stromsprunges noch nicht auf die Temperatur der Ausgangsstromstärke eingependelt hatte (auch ersichtlich im Gradienten vor $t = 10\text{s}$). Es lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass das langzeitdynamische Verhalten der Brennstoffzelle im Modell physikalisch korrekt abgebildet wird. Der Einfluss der Temperatur allerdings zunächst durch das integrierte ideale Thermomanagement (konstante Stacktemperatur) ausgeblendet bleibt. Es konnte gezeigt werden, dass wenn zu einem späteren Zeitpunkt ein Thermomanagement integriert wird auch die sich auf die Temperatur zurückzuführenden dynamischen Effekte berücksichtigt werden. Insgesamt gilt für das dynamische Verhalten genauso wie das statische Brennstoffzellenverhalten, dass eine Parametrisierung auf ein reales Zielsystem unerlässlich bleibt um auch quantitative Aussagen über die Modellgenauigkeit treffen zu können.

5.2 Gesamtfahrzeug - Betriebsstrategie

Da die heutige Gesetzgebung für Kraftfahrzeuge hohe Ansprüche an die Effizienz und Umweltfreundlichkeit stellt wurde zuletzt ein neues Zertifizierungsverfahren eingeführt. Das Verfahren mit der Bezeichnung *WLTP* (engl. Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) umfasst auch einen seinem Vorgänger *NEFZ* (Neuer europäischer Fahrzyklus) weitaus dynamischeren und leistungsintensiveren Fahrzyklus. Dieser *WLTC* (engl. Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) Fahrzyklus ist mittlerweile in Kombination mit der Messung von Emissionen und Verbrauch im realen Straßenverkehr (*RDE*, engl. Real Driving Emissions) Stand der Technik und die vom Gesetzgeber limitierten Grenzen zur Zertifizierung sind darin einzuhalten. Aus diesem Grund wird auch im Rahmen dieser Arbeit eine Fahrzeugsimulation im *WLTC* durchgeführt. Zudem finden innerhalb dieser Analyse auch Simulationen im *NEFZ* sowie einem selbst entwickelten Fahrprofil statt. Die Simulation im *NEFZ* lässt sich mit der höheren statistischen Datenlage für reale Fahrzeuge begründen. Da das *WLTP* Verfahren noch relativ neu ist existieren noch wenige Messdaten, was für allem für die aktuell ohnehin seltenen Brennstoffzellenfahrzeuge besonders gilt. Der im Rahmen der Arbeit entwickelte Testzyklus spiegelt kein reales Fahrprofil wieder. Er ist derart konzipiert, dass das Fahrzeug innerhalb einer Simulation in alle Betriebsmodi gezwungen wird. Um alle Zustände zu erreichen werden daher Bereiche mit hohen Lasten benötigt um den *SOC* zu reduzieren.

Zunächst soll auf das Gesamtfahrzeug eingegangen werden. Eine Simulation des FCHEV dieser Arbeit im *WLTC* Zyklus liefert zahlreiche Größen die zur Betrachtung herangezogen werden können. Zunächst kann festgehalten werden, dass das Fahrzeug alle angeforderten Leistungsbereiche abdecken kann. Dadurch ist es dem Fahrer möglich das gesamte Fahrprofil des *WLTC* nachzufahren. Das Soll- und Ist Fahrprofil sind in Abbildung 5.6 abgebildet. Die gewählten Parameter für den Fahrer, der als PID-Regler ausgeführt ist, führen zu einer sehr hohen Übereinstimmung von Soll-Geschwindigkeit (Fahrprofil aus Zyklus) und der Ist-Geschwindigkeit des Fahrzeugs (Reaktion des FCHEV auf den Fahrerwunsch). Die maximale Abweichung liegt bei $c_{Error,max} = 0,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Damit ist der Fahrer sehr gut und vermutlich deutlich besser als ein Mensch. Um näher am menschlichen Fahrverhalten zu liegen können die Reglerparameter im Fahrermodell bei Bedarf neu vergeben werden. Die Leistungsabdeckung kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden. Es werden darin die vom Motor angeforderte Leistung $P_{Motor,Demand}$ und die Brennstoffzellen sowie die Batterieleistung dargestellt. Die Summe aus Batterieleistung und Brennstoffzellenleistung deckt den Leistungsbedarf. Innerhalb dieses Zyklus kann zu jedem Zeitpunkt der Leistungsbedarf gedeckt wer-

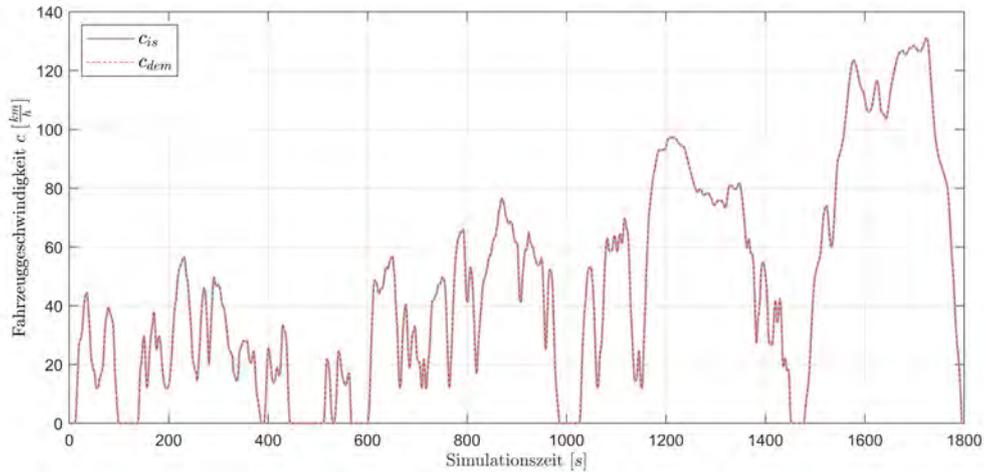


Abbildung 5.6: Soll- und Ist-Geschwindigkeit im WLTC

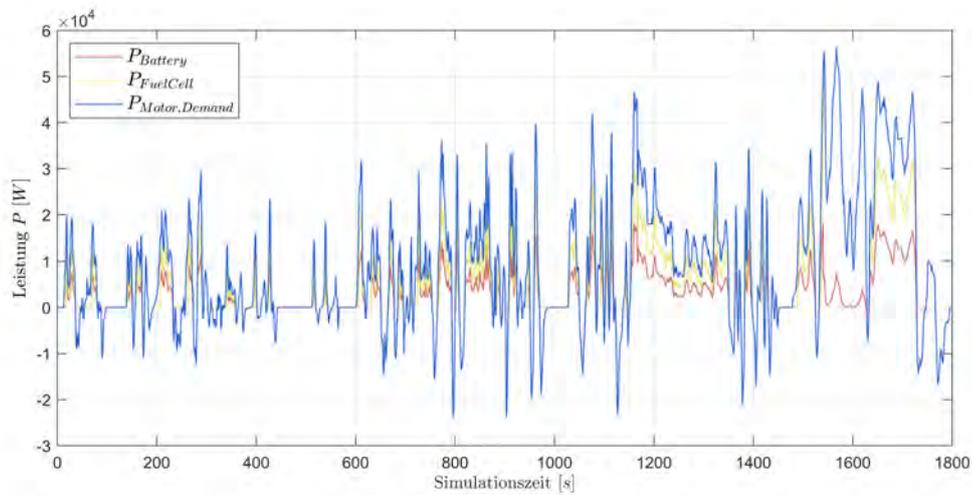
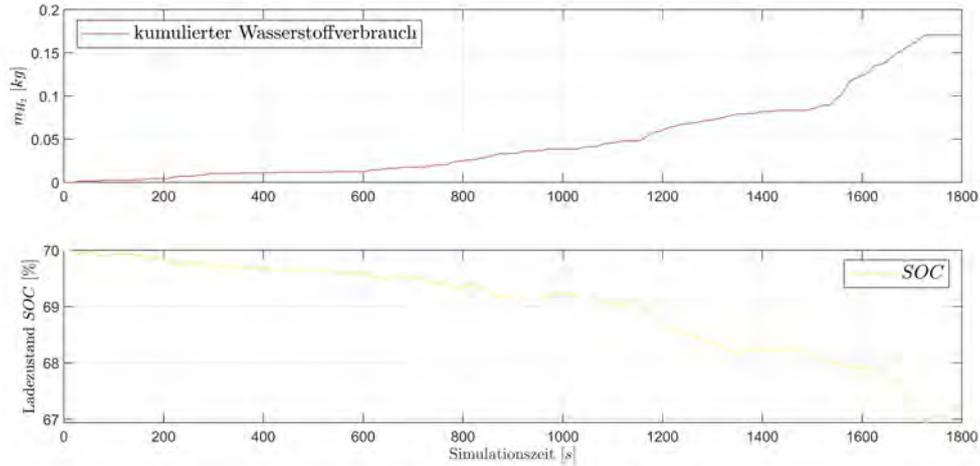
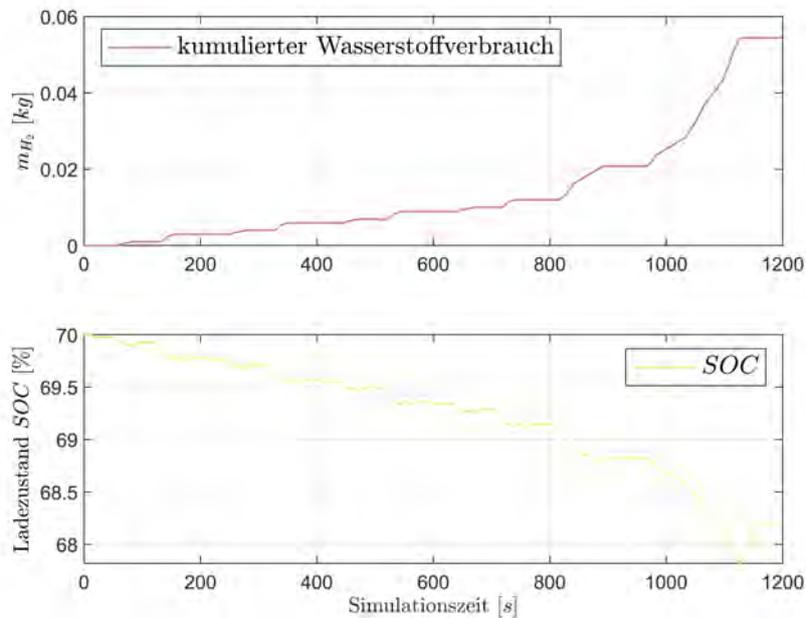


Abbildung 5.7: Leistungsverteilung im WLTC

den. Phasen mit negativen Batterieleistungen entsprechen Rekuperationsphasen in denen Energie zurückgewonnen wird. Die Aufteilung der angeforderten Leistung an Batterie und Brennstoffzelle erfolgt durch die Betriebsstrategie und kann sich beispielsweise für andere Start SOC verändern. Die Verbrauchswerte innerhalb des WLTC sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Der SOC verringert sich darin von anfangs $SOC = 70,0\%$ auf $SOC = 67,2\%$ und der gesamte Wasserstoffverbrauch beträgt $m_{H_2} = 0,17\text{kg}$.

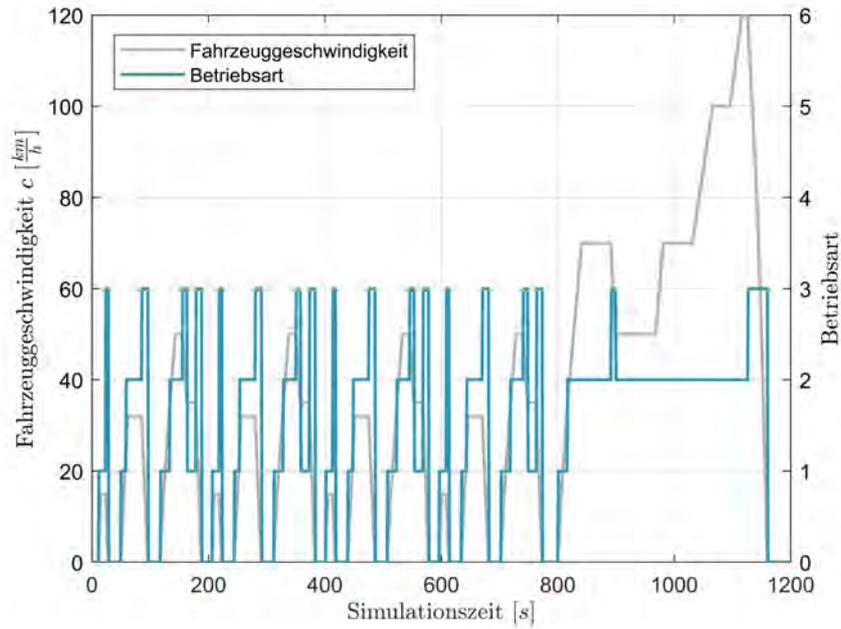
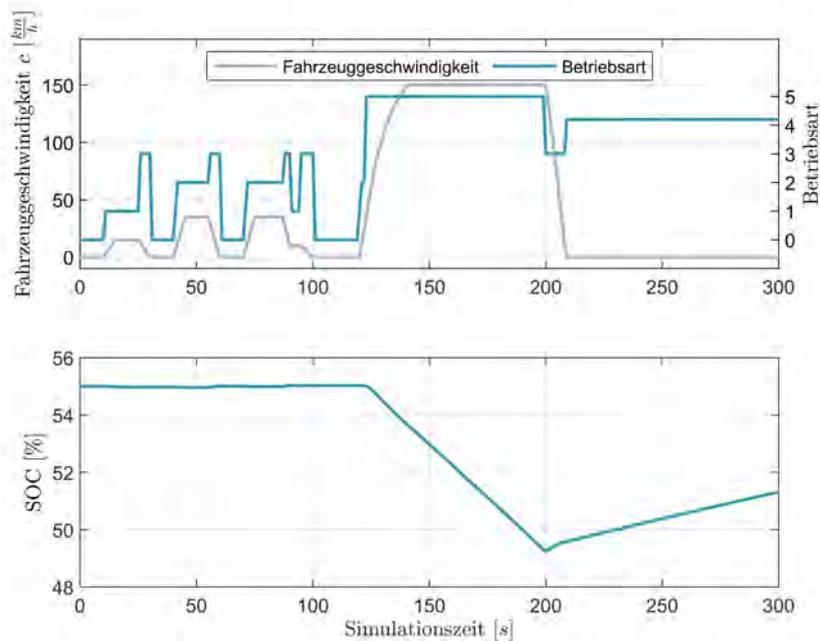
Im NEFZ ergibt sich die Abbildung des Verbrauchs und des SOC wie in Abbildung 5.9 dargestellt. Der Verbrauch im Zyklus liegt bei $m_{H_2} = 0,054\text{kg}$ und damit plausibel unter dem des WLTC da die zurückgelegte Zyklusstrecke mit $s_{NEFZ} = 11\text{km}$ auch kleiner ist als die des WLTC $s_{WLTC} = 23\text{km}$. Für den ungewichteten Wasserstoffverbrauch ergibt sich $m_{H_2,NEFZ} = 0,5\text{kg}/100\text{km}$. Für das in [Grü12] modellierte Brennstoffzellenhybridfahrzeug ergeben für den Wasserstoffverbrauch im NEFZ bei einer ebenfalls heuristischen Betriebsstrategie Verbrauchswerte von $m_{H_2,NEFZ} = 0,59\text{kg}/100\text{km}$. Da es sich um komplett unterschiedlich dimensionierte Fahrzeuge und Fahrzeugkomponenten handelt sowie die Betriebsstrategien sich in ihrer Parametrisierung mit Sicherheit unterscheiden, ist die genaue Übereinstimmung der Verbräuche überhaupt nicht erwünscht. Sie zeigt allerdings, dass sich mit dem entwickelten Modell Verbräuche in einer plausiblen Größenordnung einstellen.

Abbildung 5.8: Wasserstoffverbrauch und Ladezustand im *WLTC* $SOC_{Start} = 70\%$ Abbildung 5.9: Wasserstoffverbrauch und Ladezustand im *NEFZ* $SOC_{Start} = 70\%$

Die Betrachtung der Betriebsstrategie soll auf Grund der höheren Dynamik des *WLTC*, was zu mehr Wechseln der Betriebsmodi führt, anhand des veralteten *NEFZ* und des bereits erwähnten speziell für die Betriebsstrategie ausgelegten Zyklus erfolgen. Im *NEFZ* fällt die Hybridstrategie die Entscheidungen für die Betriebsarten wie in der folgenden Abbildung 5.10 ersichtlich.

Für den *NEFZ* Zyklus werden ausgehend von einem Ladezustand zu Beginn von $SOC = 55\%$ nur die Betriebsarten Parken, Batterie- und Brennstoffzellenfahren sowie Rekuperieren benötigt (Modes: 0,1,2,3). Die Leistungsanforderung für den Boost Betrieb wird zu keiner Zeit erreicht. Ebenso wenig werden die Ladezustände, welche eine Lastpunktverschiebung einleiten erreicht. Um die Betriebsstrategie und ihre Transitionsbedingungen zu überprüfen wird ein Fahrprofil gesucht, in welchem alle Betriebsarten vorkommen. In 5.11 sind für die ersten 300s des entwickelten Testzyklus das Geschwindigkeitsprofil, die von der Betriebsstrategie gewählte Betriebsart und der Verlauf des SOC abgebildet.

Zu Beginn wird bei $t = 10s$ eine langsame Konstantfahrt mit ($c = 15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$) durchfahren. Die Be-

Abbildung 5.10: Wahl der Betriebsarten der Hybridstrategie im NEFZ. $SOC_{Start} = 55\%$ Abbildung 5.11: Betriebsstrategie im Testzyklus 1/2 mit $SOC_{Start} = 55\%$

triestrategie entscheidet auf Grund der Leistungsanforderung, der Geschwindigkeit und des SOC zugunsten des batterieelektrischen Fahrens. Während der Verzögerung bis zum Stillstand (Mode=0) wird der Rekuperationsbetrieb aktiv (Mode=3) und die kinetische Energie genutzt um die Batterie nachzuladen. Die nächste Geschwindigkeitsanforderung überschreitet die Grenzen des reinen Batteriebetriebs. Die Leistung wird von der Brennstoffzelle bereitgestellt. Da der $SOC < 60\%$ bleibt, wird auch keine Lastpunktverschiebung in Form des Last Anhebens zugunsten eines Betriebspunktes näher am Betriebsoptimum, gewählt. Die Betriebsart wird wieder bis zum Stillstand über eine Rekuperation beendet. Die dritte Geschwindigkeitsanforderung ab $t = 70s$ ruft wieder den Brennstoff-

zellenbetrieb hervor, der auch wieder über eine Rekuperation beendet wird. Der Rekuperationsbetrieb bleibt jedoch nicht bis zum Stillstand erhalten. Noch während der Verzögerung erfolgt vom Fahrer wieder ein Beschleunigungswunsch. Die Leistungsanforderung dessen, sowie die anderen entscheidenden Größen, leiten die Leistungsbereitstellung durch die Batterie ein (Mode=1). Anschließend wird das Fahrzeug wieder bis zum Stillstand gebremst und die kinetische Energie genutzt (Mode=3). Bei $t = 120\text{s}$ erfolgt ein Vollast-Beschleunigungsmanöver. Der Fahrer reagiert dabei auf einen sofortigen Anstieg der Soll-Geschwindigkeit mit dem Durchdrücken des Gaspedals. Das Fahrzeug wird maximal beschleunigt, zunächst über den Batteriebetrieb, dann wird die Brennstoffzelle aktiviert. Die angeforderte Leistung übersteigt auch die maximale Brennstoffzellenleistung sodass der Boost (Mode=5) aktiv wird. Die Brennstoffzelle arbeitet nun bei maximaler Leistung, die Batterie stellt die darüber hinaus benötigte Leistung bereit. Während dieser Beschleunigung und der Fahrt bei $c_{max} = 150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ sinkt der SOC auf unter 50%. Der Bremsvorgang bis zum Stillstand wird genutzt um die kinetische Energie zurückzugewinnen. Beim Erreichen der Stillstandes liegt der SOC trotz der Rekuperation noch unter 50%. In diesem Fall fällt die Betriebsstrategie die Entscheidung die Batterie im Stillstand nachzuladen (Lastpunktverschiebung im Stillstand, Mode=4.2). Diese Betriebsart wird beibehalten bis der $SOC \geq 75\%$ erreicht wird oder wie in Abbildung 5.12 ab $t = 1100\text{s}$ ersichtlich erneut eine Leistungsanforderung auftritt. Es folgt eine langsame Beschleunigung auf $c = 30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ innerhalb von 20s.

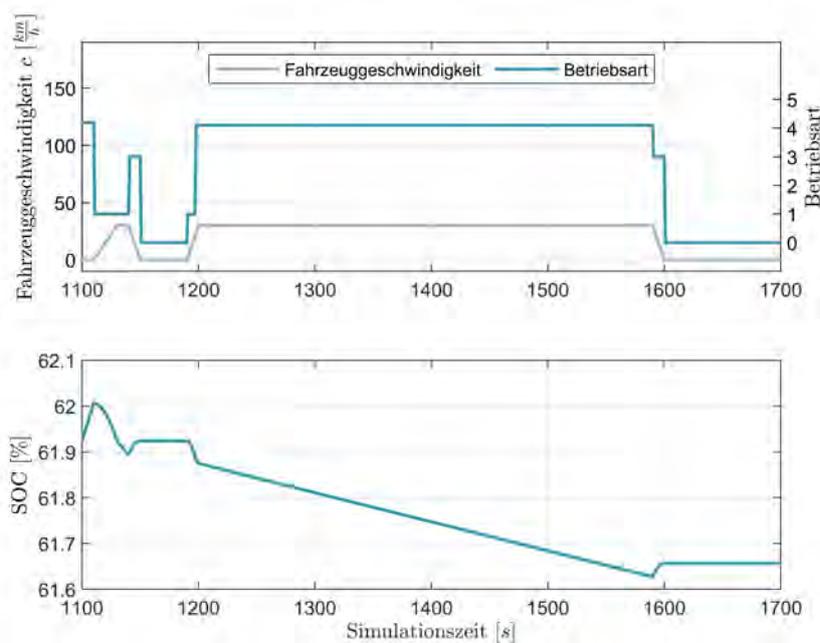


Abbildung 5.12: Betriebsstrategie im Testzyklus 2/2

Während der Beschleunigung und der kurzen konstanten Fahrt bei dieser Geschwindigkeit wird die Leistung ausschließlich aus der Batterie zur Verfügung gestellt. Auf die Konstantfahrt folgt eine Rekuperation. Ab $t = 1190\text{s}$ wird innerhalb von 10s ebenfalls auf $c = 30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ beschleunigt. Dabei wird die Leistungsgrenze für den Batteriebetrieb überschritten und die Brennstoffzelle aktiv. Da nun der SOC über der Aktivierungsgrenze für die Lastpunktverschiebung $SOC_{LPV_on} = 60\%$ liegt wird diese Betriebsart (Mode=4.1) gewählt. Die Energiebereitstellung erfolgt aus der Brennstoffzelle deren Leistung durch die Batterie abgesenkt wird um näher am Betriebsoptimum und damit effizienter arbeiten zu können. Der Fahrzyklus endet mit einer kurzen Rekuperation bis zum Stillstand

Anhand der durchgeführten Simulation kann gezeigt werden, dass das Fahrzeug zwischen allen

Betriebsmodi wechselt. Die Betriebsstrategie ist demnach komplett funktionsfähig und kann im Rahmen von folgenden numerischen Untersuchungsarbeiten als Werkzeug zur Bestimmung effizienterer Parameter verwendet werden.

6 Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Modellerstellung eines Brennstoffzellenhybridfahrzeuges zur Simulation von Fahrzyklen. Die an das Modell gestellten Anforderung liegen vor allem in einem modularen Aufbau sowie der Berücksichtigung dynamischer Effekte. Es werden zunächst die relevanten Grundlagen zu Brennstoffzellen, Energiespeichern und Hybridfahrzeugen erläutert woraufhin ein Hybridlayout für das zu simulierende Fahrzeug ausgewählt wird. Der ausgewählte serielle Hybridantriebsstrang besteht aus einer Niedertemperatur-Brennstoffzelle als Energiewandler und einer Lithium-Ionen Batterie als Energiespeicher.

Ein wesentlicher Fokus liegt auf der Modellierung der Brennstoffzelle. In 4.5 wird auf die Modellbildung dieser eingegangen. Das modellierte Brennstoffzellensystem ist aufgeteilt in Teilsysteme die das elektrische und thermische Verhalten der Brennstoffzelle charakterisieren. Weiterhin wird die Versorgung des Brennstoffzellenstacks mit Wasserstoff und Sauerstoff aus der Luft modelliert. Das elektrische Verhalten der Brennstoffzelle wird über ein elektrisches Ersatzschaltbild abgebildet. Die elektrischen Bauteile Widerstände und Kondensatoren sind so zueinander angeordnet, dass sie die Überspannungen, welche die Brennstoffzellenspannung bestimmten, abbilden können. Durch die Anordnung wird zudem die Ausbildung einer Helmholtz'schen Doppelschichtkapazität an den Elektroden berücksichtigt. Die Parameter dieser Bauteile werden durch empirische Gleichungen in Abhängigkeit von Stromstärke, Temperatur sowie den Betriebsdrücken bestimmt. Durch diese in [Puk03] entwickelten empirischen Gleichungen wird auch das dynamische Verhalten dieser Größen mit in die Berechnung der Zellspannung integriert. Neben dem elektrischen und thermischen Verhalten unterliegt auch die Versorgung der Brennstoffzelle einem zeitdynamischen Verhalten. Dieses wird im Rahmen dieser Modellierung durch die Abbildung eines Kompressors berücksichtigt. Der Kompressor unterliegt einer Trägheit sodass es bei Lastwechseln zu einer Über- bzw. Unterversorgung der Brennstoffzelle von Sauerstoff kommen kann. Diese Versorgungsengpässe bzw. Überschüsse führen auch zu einem Über- bzw. Unterschwingen der Stackspannung, das durch diesen Modellierungsansatz somit ebenfalls berücksichtigt wird. Da sich durch die Kompression der Luft eine hohe Temperatur ergibt muss eine Kühlung derselben erfolgen bevor sie die Brennstoffzelle erreicht. Sowohl für die anodenseitige Versorgung mit Wasserstoff wie auch der kathodenseitigen Luftversorgung durch den Kompressor werden Platzhaltermodelle im Modell integriert die Temperatur und relative Feuchtigkeit regeln. Die so den Elektroden zugeführten Stoffströme werden anschliessend bilanziert. Durch die Bilanzierung können die Partialdrücke in den Strömungskanälen der Elektroden bestimmt werden. Da der Wasserstoff und der Sauerstoff bevor sie an der Brennstoffzellenreaktion teilnehmen können durch die Gasdiffusionsschicht bis zur Reaktionsfläche diffundieren ändert sich der Partialdruck dieser Komponenten nochmals. Da der Sauerstoff und Wasserstoffpartialdruck wesentlich für die Berechnung der Zellspannung ist wird diese Reduzierung durch den Diffusionsvorgang ebenfalls im Modell berücksichtigt. Die Grundlage dieser Modellierung ist die Selbstdiffusion von Gasgemischen die durch die Stefan-Maxwell'schen Gleichungen beschrieben werden kann. Durch die Bestimmung der Partialdrücke kann mittels der Nernst-Gleichung die offene Klemmspannung der Brennstoffzelle bestimmt werden, welche im elektrischen Ersatzschaltbild als Spannungsquelle berücksichtigt ist.

Durch die Bilanzierung der Stoffströme kann zudem das thermische Verhalten der Brennstoffzelle durch den instationären ersten Hauptsatz der Thermodynamik beschrieben werden.

Das erstellte Brennstoffzellensystem wird anschließend auf die Leistungsanforderung zum Einsatz im Hybridfahrzeug skaliert und die Betriebsweisen erörtert.

Das Batteriesystem das im Hybridfahrzeug zum Einsatz kommen soll orientiert sich an dem eines batterie-elektrisch betriebenen *BMW i3*. Die Anzahl der seriell verschalteten Li-Ionen Zellen und deren Kapazität werden für dieses Fahrzeug übernommen und damit ein Batteriemodell skaliert. Bei

diesem Batteriemodell handelt es sich ebenfalls um ein elektrisches Ersatzschaltbild, das das elektrische Verhalten einer Lithium-Ionen Batterie beschreibt. Dem Modell liegen ausführliche Messdaten zugrunde die in Simulink durch *Look-up Tables* integriert sind. Das Batteriemodell ist ebenfalls in der Lage das thermische Verhalten der Zellen abzubilden. Zudem bietet eine dem IEE zur Verfügung stehende Simulink Bibliothek die Möglichkeit ein Thermomanagement aufzubauen [Gie19]. Das Thermomanagement von Brennstoffzelle und Batterie wurde im Rahmen dieser Arbeit zunächst als Platzhaltermodell ausgeführt und ist damit Gegenstand fortführender Arbeiten.

Die modellierten elektrochemischen Systeme werden wie bereits erwähnt als serielles Hybridlayout miteinander verschalten und in ein Fahrzeug integriert, das sich ebenfalls, wie die Batterie selbst, am *BMW i3* orientiert. Dazu wird der Antriebsstrang des Fahrzeuges modelliert. Der elektrische Motor bzw. Generator wird durch Drehmoment-Drehzahlkurven sowie ein Wirkungsgradkennfeld abgebildet und so die Leistung bestimmt die von den Energiespeichern bzw. Wandlern zum Antrieb des Fahrzeuges benötigt wird. Der Antriebsstrang berücksichtigt außerdem die Übersetzung eines einstufigen Getriebes sowie weiterer Fahrzeugeigenschaften wie Fahrzeugmasse, Stirnfläche, Luftwiderstandsbeiwert, Drehmassenfaktoren und weitere. Durch diese Modellierung kann aus der Motorleistung die Antriebskraft an den Rädern bestimmt werden. Aus dieser Antriebskraft wiederum, über eine Betrachtung der Fahrwiderstände, die Fahrzeuggeschwindigkeit. Das Fahrzeug wird durch einen Fahrer, ausgeführt als PID-Regler, gesteuert. Dabei ist die berechnete Fahrzeuggeschwindigkeit als Reaktion des gesamten Antriebsstranges auf den Fahrerwunsch zu verstehen. Der Fahrer vergleicht diese ständig mit der Sollgeschwindigkeit aus einem Fahrzyklus und betätigt der Abweichung entsprechend das Gas- oder Bremspedal. Die Pedalstellungen werden durch ein Steuergerät in angeforderte Leistungen übersetzt, die von den Energielieferanten Brennstoffzelle bzw. Batterie bereitgestellt werden müssen.

Wie die Leistungsbereitstellung erfolgt wird durch eine Hybridbetriebsstrategie entschieden. Bei der Betriebsstrategie die im Rahmen dieser Modellbildung umgesetzt wird handelt es sich um eine heuristische Betriebsstrategie. Durch diese wird in Abhängigkeit der aktuellen Fahrsituation und den Zuständen von Batterie und Brennstoffzelle entschieden welcher Hybridbetriebsmodus ausgeführt werden soll. Diese Betriebsmodi (zum Beispiel rein batterie-elektrisches Fahren oder eine Lastpunktverschiebung) sowie die Betriebsstrategie selbst werden im Kapitel 4.7.2 genau beschrieben. In Abhängigkeit des gewählten Hybridmodus erfolgt die Aufteilung der Leistung durch die Leistungselektronik des Fahrzeuges. Innerhalb dieses Teilmodells sind neben der Leistungsverzweigung auch die Spannungswandler integriert. Diese sind im Rahmen dieser Erstmodellierung als konstante Wirkungsgrade ausgeführt. Eine genaue elektrische Modellierung ist Bestandteil weiterführender Arbeiten. Das Fahrzeug bietet zudem die Möglichkeit kinetische Energie beim Verzögerungsvorgang über den generatorischen Betrieb der Elektromotors zurückzugewinnen (Rekuperation).

Das entwickelte Fahrzeugmodell wird in Kapitel 5 anhand ausgewählter Größen plausibilisiert. Es kann gezeigt werden, dass das Brennstoffzellenmodell sowohl das erwartete statische wie auch das dynamische Verhalten qualitativ abbilden kann. Eine Plausibilisierung des Modells anhand realer Messdaten konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Die Gründe hierfür liegen vor allem im Fehlen eines realen Systems, weshalb keine eigenen Messreihen vorliegen. Einer Modellparametrisierung auf ein reales Zielsystem kommt eine hohe Bedeutung zu. Diese ist unerlässlich um die Modellgüte zu verifizieren.

Neben dem qualitativ erfülltem Verlauf der Brennstoffzellenspannung wurden für das Fahrzeug im Neuen europäischen Fahrzyklus Wasserstoffverbrauchswerte ermittelt, die sich mit den Ergebnissen der Literatur decken. Auf Grund der Ergebnisse wird angenommen, dass das Fahrzeugmodell plausible Ergebnisse liefern kann.

Durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell wird ein Simulationswerkzeug für weitere

Entwicklungen bereitgestellt. Diese umfassen die Entwicklung detaillierter Modellverfeinerungen sowie Regelungs- und Managementstrategien. Neben weiterem Entwicklungspotential besteht die Möglichkeit numerische Optimierungen aller beteiligten Systemkomponenten durchzuführen. Dazu gehört auch die Betrachtung verschiedener Hybridbetriebsstrategien.

7 Ausblick

Dass es sich bei dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Simulationsmodell um die Erstmodellierung eines Hybridsystems handelt wurde an mehreren Stellen dieses Dokuments bereits erwähnt. Vor allem das Fehlen eines realen Systems um das Modell anhand von Messdaten zu validieren stellt eine der größten Herausforderungen dar. Daher liegt ein wesentlicher Fokus von nachfolgender Arbeit auf dieser Problematik. Sobald der sich aktuell in der Entwicklung befindliche Hybridversuchsstand fertiggestellt und messbereit ist, empfiehlt es sich eine Arbeit zur Parametrisierung und Validierung des Simulationsmodells durchzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit müssen ausführliche Messdaten erhoben werden. Ausgehend von diesen Messdaten kann mittels einer nicht-linearen Regression das elektrische Ersatzschaltbild bedatet werden. Die weiteren Parameter die innerhalb des Modells verwendet werden müssen ebenfalls neu bestimmt bzw. abgeschätzt werden. Sie werden sich in weiten Teilen in anderen Größenordnungen bewegen da sich das modellierte Zielsystem in der Leistungsklasse eines Kraftfahrzeuges bewegt und das reale Prüfstandssystem im Labormaßstab. Da das reale System auch nicht über den Antriebsstrang eines Kraftfahrzeug verfügt können diese Teilmodelle auf die elektrische Last (voraussichtliche Ausführung) des Prüfstands ummodelliert werden. Weitere Modifikationen hängen von der letztlichen Ausgestaltung des Prüfstands ab.

In weiteren Arbeiten sind die Platzhaltermodelle (Blackboxen) dieser Arbeit zu realisieren. Von hoher Relevanz ist die Entwicklung des Thermo- und Feuchtigkeitsmanagements der Brennstoffzelle. Um die Membranfeuchtigkeit bestimmen zu können wird ein Wasser Diffusionsmodell benötigt. Ausgehend von diesem Modell kann eine Regelungsstrategie entwickelt werden. Die Stellgrößen sind die einzubringende Menge von Wasserdampf sowie die Kühlung der Stacktemperatur. Diese Größen beeinflussen sich gegenseitig. Die eingebrachte Wassermenge kann beispielsweise einen Anteil zur Kühlung des Stacks leisten. Die Temperatur hat wiederum Einfluss auf die Austrocknung der Membran und dadurch auch auf die nachzuliefernde Menge Wasserdampf. Auf Grund dieser gegenseitigen Einflüsse empfiehlt es sich die Temperatur- und Feuchtigkeitsregelung gemeinsam zu bearbeiten. Das Simulationstool stellt eine Simulationsumgebung bereit um Regelungsstrategien zu entwerfen und numerisch zu untersuchen. Neben der bereits erwähnten zur Temperatur und Feuchtigkeitsregelung sind auch Regelungen zur Kraftstoffversorgung (λ_{H_2}) sowie des Kompressormotors zur Luftversorgung denkbar.

Das entwickelte Modell berücksichtigt dynamische Effekte in der Spannungsantwort der elektrochemischen Teilsysteme Batterie und Brennstoffzelle. Zum aktuellen Stand sind die Komponenten jedoch über die von ihnen zur Verfügung gestellten Leistung gekoppelt und nicht über ihre Spannung. Um eine physikalisch realistische Kopplung der elektrischen Komponenten zu erreichen muss die Modellierung der Leistungselektronik überarbeitet werden. Eine nachfolgende Arbeit sollte die Frage beantworten wie die Spannungswandler in Matlab/Simulink modelliert werden können. Dabei sollte zunächst ausgearbeitet werden wie die Komponenten miteinander interagieren und ausgehend davon eine Anordnung abgeleitet werden (Verwendung von mehreren DC/DC, AC/DC, DC/AC oder Einsatz von modernen bidirektionalen Wandlern mit mehreren Eingängen). Idealerweise können diese Modelle auch ihr eigenes dynamisches Verhalten abbilden. Abschließend werden sie in das Simulationsmodell integriert.

Durch die geschaffene Simulationsumgebung können Parameterstudien zur Dimensionierung der Antriebskomponenten durchgeführt werden. In der aktuellen Ausführung wurde der Antriebsstrang des *BMW i3* zusätzlich um eine Brennstoffzelle erweitert. Durch das Hybridlayout erhöhte sich damit die Systemleistung um die Leistung des Brennstoffzellensystems. Damit ist das Fahrzeug bzw.

sind der Energiewandler und Speicher theoretisch überdimensioniert. Innerhalb von den besagten Parameterstudien können die Leistungsklassen der Komponenten variiert werden mit dem Ziel einen energieeffizienteren Antriebsstrang auszulegen.

Eine interessante Anwendung des Modells ist die Möglichkeit die Hybridbetriebsstrategie zu optimieren. Innerhalb der Grundbedatung dieser Arbeit wurde eine heuristische Betriebsstrategie mit festen Grenzen zwischen den Betriebsmodi integriert. Im Rahmen von numerischen Optimierungen können diese Grenzen zugunsten höherer Energieeffizienz neu bestimmt werden. Für solche Studien können andere, nicht heuristische, Betriebsstrategien zu weiterem Einsparpotential führen. Eine Arbeit die verschiedene Betriebsstrategien miteinander vergleicht ist daher von großem Interesse und bildet eines der Hauptanwendungsgebiete des erstellten Simulationsmodells. Derartige Arbeiten können fortlaufend stattfinden, da es durch die heutigen hohen Rechenleistung von Steuergeräten mittlerweile eine Vielzahl von möglichen Hybridstrategien gibt. Diese reichen bis zum Einsatz von künstlicher Intelligenz um den Kraftstoffverbrauch immer weiter zu reduzieren und dabei trotzdem den Komfort des Fahrers und dessen Fahrstil zu berücksichtigen.

Literaturverzeichnis

- [Abd18] Bilal Abderezzak. *Introduction to transfer phenomena in pem fuel cell*. ISTE Press LTD - ELSEVIER, Kidlington,UK, 2018.
- [Amp95] J. C. Amphlett. Performance modeling of the ballard mark iv solid polymer electrolyte fuel cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 142(1):1, 1995.
- [Axe18] Axel Pöhls. *Alternative Antriebe und Kraftstoffe*. Vorlesungsskript, University of applied Science Hamburg, Hamburg, 16.07.2018.
- [Bar13] Frano Barbir. *PEM fuel cells: Theory and practice*. Academic Press, London, 2nd ed. edition, 2013.
- [BHHJ13] A. Brooker, Kristina Haraldsson, Terry Hendricks, and Valerie Johnson. Advisor advanced vehicle simulator, 2013.
- [BMW17] BMW Medieninformation. Technische daten. der neue bmw i3., 2017.
- [BSL07] R. Byron Bird, Warren E. Stewart, and Edwin N. Lightfoot. *Transport phenomena*. J. Wiley, New York, rev. 2nd ed. edition, 2007.
- [CHMF99] Joshua M. Cunningham, Myron A. Hoffman, Robert M. Moore, and David J. Friedman. Requirements for a flexible and realistic air supply model for incorporation into a fuel cell vehicle (fcv) system simulation. In *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1999.
- [CLGA⁺17] Alan Cruz Rojas, Guadalupe Lopez Lopez, J. Gomez-Aguilar, Victor Alvarado, and Cinda Sandoval Torres. Control of the air supply subsystem in a pemfc with balance of plant simulation. *Sustainability*, 9(1):73, 2017.
- [DD14] Dietmar Metz, Jürgen Werner, Dr. Stefan Münz and Dr. Michael Becker. Luftversorgung für brennstoffzellen, 2014.
- [DR18] Andrew Dicks and D. A. J. Rand. *Fuel cell systems explained*. Wiley, Hoboken, New Jersey, third edition edition, 2018.
- [EK08] Helmut Eichseder and Manfred Klell. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, Wiesbaden, 1. aufl. edition, 2008.
- [EZ19] Elsner and Zühr. *Transiente Modellierung eines Brennstoffzellenstacks in Matlab/Simulink*. Projektarbeit, Hamburg, 2019.
- [GBM13] Fengge Gao, Benjamin Blunier, and Abdellatif Miraoui. *Proton Exchange Membrane Fuel Cells Modeling*. ISTE. Wiley-ISTE, s.l., 1. aufl. edition, 2013.
- [Gie19] Roman Gies. *Numerische Untersuchung des thermischen Verhaltens von Antriebsbatterien*. Bachelorthesis, University of applied Science Hamburg, Hamburg, 02/2019.
- [GND17] Bei Gou, Woonki Na, and Bill Diong. *Fuel cells: Dynamic modeling and control with power electronics applications*. Power electronics and applications series. CRC Press, Boca Raton, second edition edition, 2017.

- [Grü12] Jan Grüner. Modellerstellung eines wasserstoff-hybridfahrzeuges in matlab simulink, 2012.
- [HA08] Hengbing Zhao and Andrew F. Burke. *Modeling and Optimization of PEMFC Systems and its Application to direct Hydrogen Fuel Cell Vehicles*. PhD thesis, Davis University of California, 2008.
- [Har05] Kristina Haraldsson. *On direct hydrogen fuel cell vehicles: Modelling and demonstration*, volume 208 of *Trita-KET*. Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2005.
- [Hau07] J. Haubrock. *Parametrisierung elektrischer Äquivalentschaltbilder von PEM Brennstoffzellen*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2007.
- [HB13] B. Higgins and H. Binous. Binary diffusion coefficients for gases, 2013.
- [HLB17] Zhongjie He, Hua Li, and Karl Erik Birgersson. *Reduced modelling of planar fuel cells: Spatial smoothing and asymptotic reduction*. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [HM03] K. H. Hauer and R. M. Moore. Fuel cell vehicle simulation– part 1: Benchmarking available fuel cell vehicle simulation tools. *Fuel Cells*, 3(3):84–94, 2003.
- [Hof14] Peter Hofmann. *Hybridfahrzeuge*. Springer Vienna, Vienna, 2014.
- [Jay03] Jay Tawee Pukrushpan. *Modeling and Control of Fuel Cell Systems and Fuel Processors*. Dissertation, Univesity of Michigan, Michigan, 2003.
- [Kor13] Reiner Korthauer, editor. *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg and s.l., 2013.
- [Kur16] Peter Kurzweil. *Brennstoffzellentechnik: Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 3., überarbeitete und aktualisierte auflage edition, 2016.
- [LD11] James Larminie and Andrew Dicks. *Fuel cell systems explained*. J. Wiley, Chichester, West Sussex, 2nd ed. edition, 2011.
- [MBH⁺02] T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O’Keefe, S. Sprik, and K. Wipke. Advisor: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. *Journal of Power Sources*, 110(2):255–266, 2002.
- [Mer14] Merwerth Dr.-Ing J. The hybrid-synchronous machine of the new bmw i3 & i8: Challenges with electric traction drives for vehicles workshop university lund, 2014.
- [Pag07] Page Shannon. *Testing Protovol Development for a Proton Exchange Membrane Fuel Cell*. Dissertation, University of Canterbury, Christchurch, 2007.
- [PSP04] Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, and Huei Peng. *Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis and Feedback Design*. Advances in industrial control. Springer, London, 2004.
- [PSP05] Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, and Huei Peng. *Control of fuel cell power systems: Principles, modeling, analysis and feedback design*. Advances in industrial control. Springer, London, 2. printing edition, 2005.

- [Puk03] Jay Pukrushpan. Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors. 2003.
- [Rei17] Konrad Reif, editor. *Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik*. Bosch Fachinformation Automobil. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- [Sch18] A. Schmidt. *Electro-chemical Energy Conversion- Fuel Cell Systems*. Vorlesungsskript, University of applied Science Hamburg, Hamburg, 2018.
- [Sch19] Achim Schmidt. *Technical Thermodynamics for Engineers: Basics and Applications*. 1st ed. 2019 edition, 2019.
- [Shi] Shinobu Miyaura. Bmw i3 teardown and benchmarking report.
- [Spr91] T. E. Springer. Polymer electrolyte fuel cell model. *Journal of The Electrochemical Society*, 138(8):2334, 1991.
- [TKDH05] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte, and M.A.M. Hendrix. Multi-input bidirectional dc-dc converter combining dc-link and magnetic-coupling for fuel cell systems. In *Conference record of the 2005 IEEE Industry Applications Conference*, pages 2021–2028, Piscataway, N.J., 2005. IEEE.
- [TSC17] Anil Can Turkmen, Salim Solmaz, and Cenk Celik. Analysis of fuel cell vehicles with advisor software. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70:1066–1071, 2017.
- [WNS05] C. Wang, M. H. Nehrir, and S. R. Shaw. Dynamic models and model validation for pem fuel cells using electrical circuits. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2):442–451, 2005.

Anhang

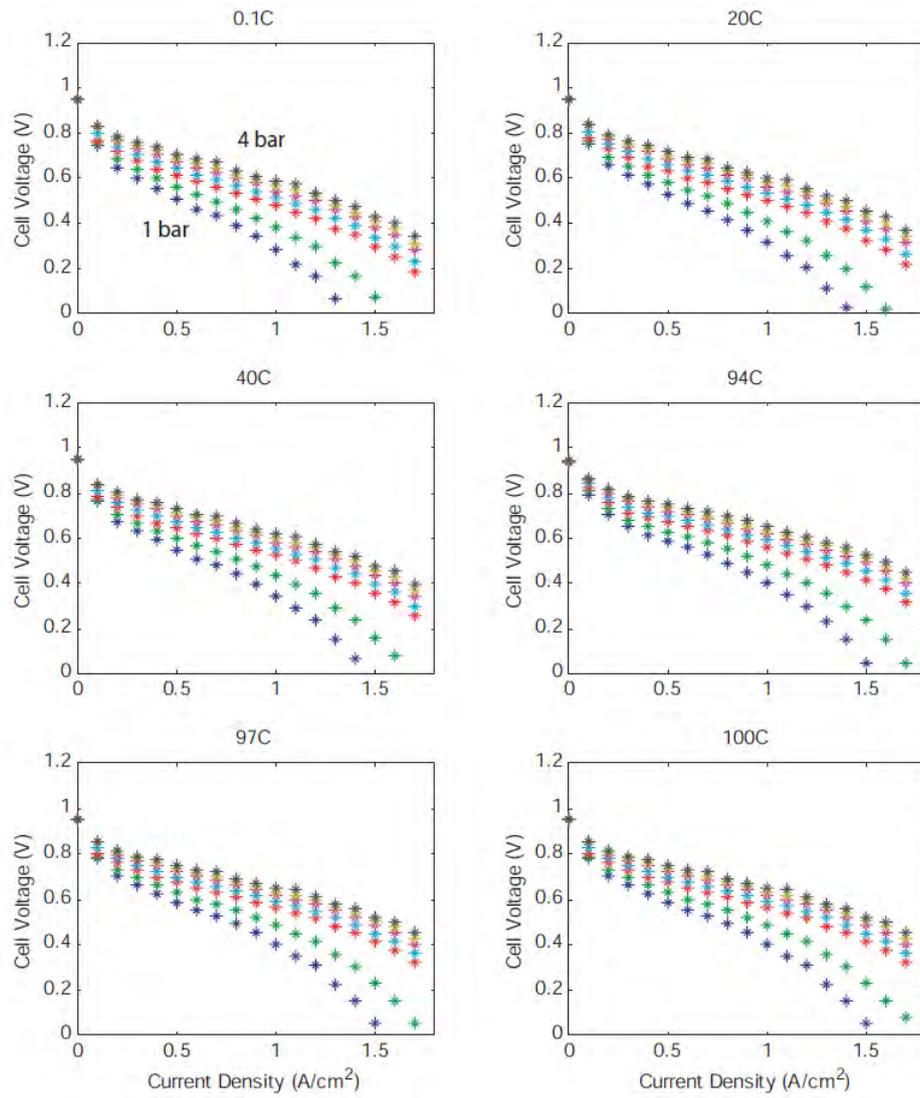


Abbildung 8.1: Polarisationskurven unter Variation von Drücken und Temperaturen aus [Puk03]

Quick Guide

The Model introduced in this work comes as a package of different Scripts, Data and Models as it can be seen in the following Matlab path. The first step is to add the folder which contains the shown subfolders to the Matlab path. Make sure that all the subfolders are added to the path as well. To run the Model the file *FCHEV_Init.m* is to be runned. This script runs a series of further initialising Scripts, as for example for the fuel cell *Master_FC_init.m*. Further it sets and loads a variety of needed parameters. All the scripts and loaded Data can be found in the shown, corresponding folders. Finally

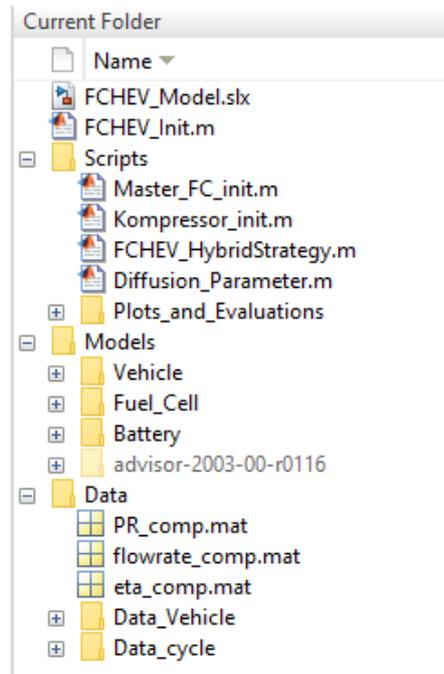


Abbildung 8.2: Structure of the Matlab path

after the script is finished Simulink will be opened and the FCHEV Model is shown as in . With the cycle selection in the left side different drive cycles can be chosen for a simulation run. The Submodel for the visualisation contains all Databusses from the model and is used to scope some chosen Data. Because of the high Data amount just a view scopes are predefined in this subsystem. It is to be rebuilt after the personal belongings by the user. In order to further Data-analysis all the produced Datasets are written to the workspace and can be used for further calculation or visualisation. Within the path *FCHEV_Simulation/Scripts/Plots_and_Evaluations* a series of evaluation scripts is to be found. Those were used in order to produce the figures shown within this work. For reparametrizing of the Models basis Data the paramters are to be changed in the initialisation scripts and the Data saved in the Datafolder.

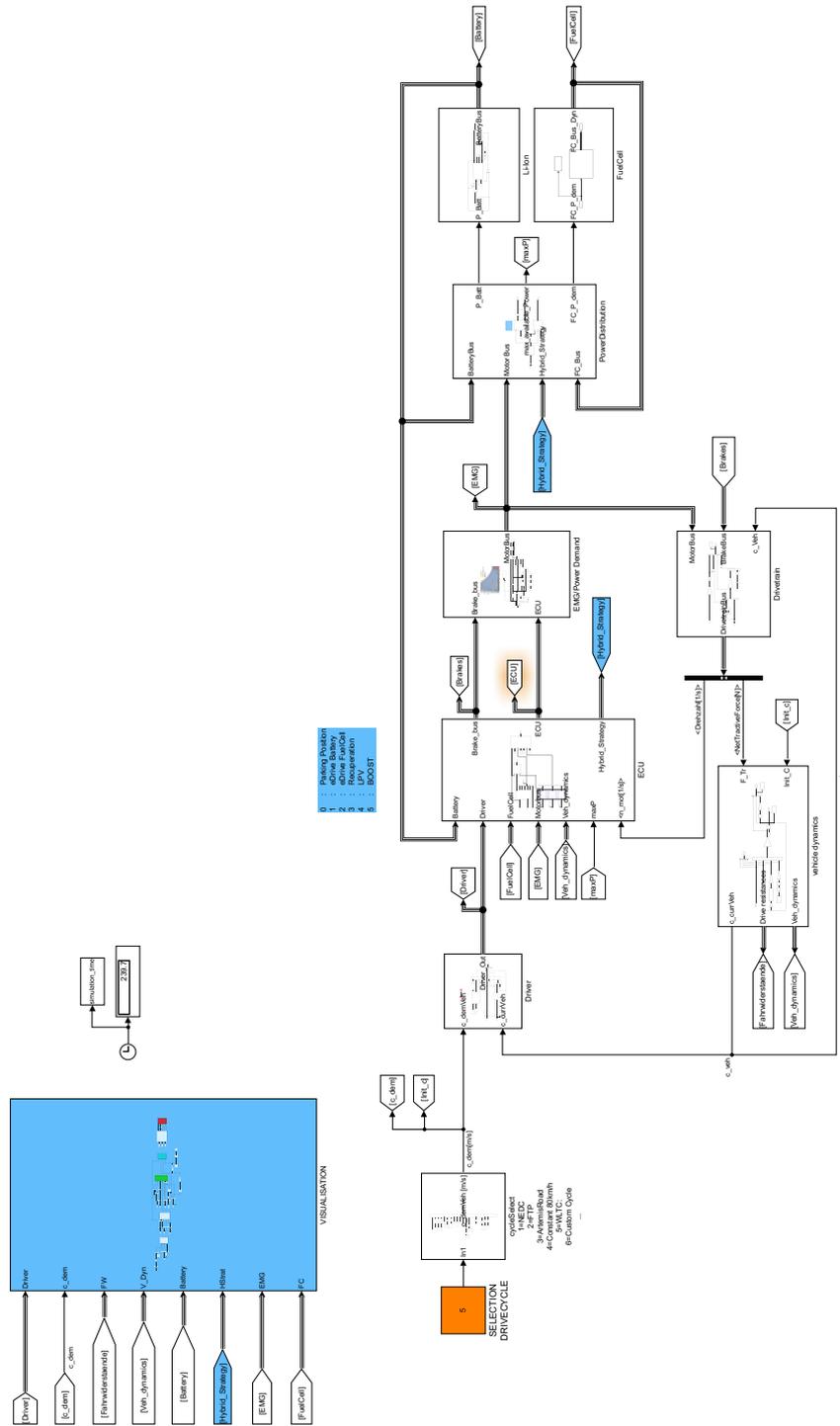


Abbildung 8.3: FCHEV Model first Layer

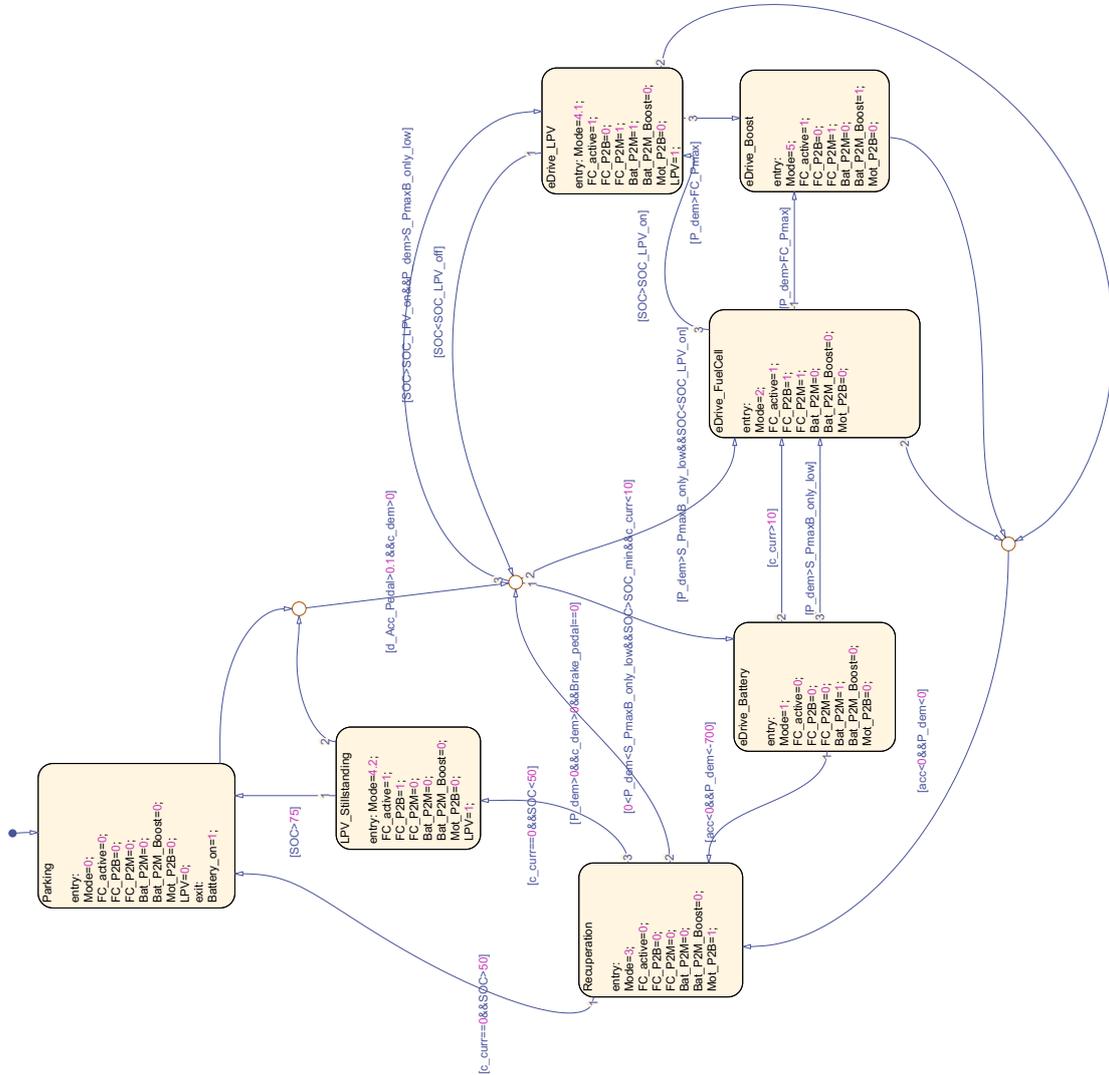


Abbildung 8.4: Screenshot der Hybridstrategie aus Stateflow

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Zühr

Vorname: Paul

dass ich das vorliegende Masterthesis mit dem Thema:

„Modellierung eines Brennstoffzellen-Hybridsystems zur transienten Simulation von Fahrzyklen“

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

.....

Ort

Datum

Unterschrift im Original