



# **Beitrag zum Energiemanagement eines Fahrzeug-Brennstoffzellen-Systems**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**

**(Dr.-Ing.)**

von M. Sc. Swantje Clara Konradt

geb. am 5.2.1993 in Berlin

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau der  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber

Univ.-Prof. Dr. techn. Helmut Eichlseder

Promotionskolloquium am 20.02.2024

---

## **Kurzfassung**

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde das Energiemanagement eines Fahrzeug-Brennstoffzellen-Systems untersucht. Die Grundlage der Untersuchung stellt die Betrachtung der einzelnen Komponenten eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges dar. Zu diesen gehören unter anderem die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle und die benötigten Energiespeicher. Für die ganzheitliche Betrachtung wurde eine ebenenbasierte Modellierung zur Abbildung eines Fuel Cell Electric Vehicle (kurz: FCEV) durchgeführt. Die Ebenen umfassen sowohl die Zell-, Stack, als auch Gesamtfahrzeug-Ebene. Mit Hilfe dieser Untergliederung wurden die notwendigen Einflussfaktoren und Übergabeparameter zwischen den einzelnen Ebenen identifiziert. Als Ergebnis wurde ein allgemeingültiges Simulationsmodell in der Simulationsumgebung *Matlab / Simulink* zur Untersuchung variabler Energiespeicher und variierender Brennstoffzelle generiert. Dieses Modell kann zukünftig für die optimale Auslegung eines FCEV, je nach Anwendungsfall und Energiespeicher, angewendet werden.

## **Abstract**

In this dissertation, the energy management of a vehicle fuel cell system was investigated. The basis of the investigation is the consideration of the individual components of a fuel cell vehicle. These include the polymer electrolyte membrane fuel cell and the required energy storage devices. For the holistic view, a level-based modeling was carried out to describe a Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV). The levels include the cell level, the stack level and the overall vehicle level. With the help of this subdivision, the necessary influencing factors and transfer parameters between the individual levels were identified. As a result, a generic simulation model was generated in the *Matlab / Simulink* simulation environment for the investigation of variable energy storage and varying fuel cell. This model can be used in the future for the optimal design of an FCEV, depending on the application and energy storage.

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Motivation .....	1
1.2	Vorgehensweise und Zielsetzung der Arbeit.....	3
2	Technische Einführung .....	5
3	Stand der Technik.....	9
3.1	PEM-Brennstoffzellen .....	9
3.1.1	Funktionsprinzip.....	10
3.1.2	Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle .....	11
3.1.3	Thermodynamik einer PEM-Brennstoffzelle .....	16
3.1.4	Medienmanagement.....	18
3.2	Energiespeicher .....	25
3.2.1	Lithium-Ionen-Zelle .....	25
3.2.2	Superkondensator .....	27
3.3	Anwendung im Fahrzeug .....	29
4	Modellierung .....	31
4.1	Ebenen-basierte Modellierung.....	31
4.1.1	Ebene 1: Zelle.....	31
4.1.2	Ebene 2: Stack .....	33
4.1.3	Ebene 3: Gesamtfahrzeug.....	35
4.1.4	Übergabeparameter.....	35
4.2	Validierung .....	37
4.3	Betriebsstrategie .....	40
4.4	Umsetzung in <i>Matlab / Simulink</i> .....	51
4.4.1	Aufbau des FCEV-Modells .....	51
4.4.2	Fahrer und Fahraufgabe.....	52
4.4.3	Fahrzeug .....	53
4.4.4	Elektromotor.....	56
4.4.5	Leistungselektronik .....	58
4.4.6	Aufbau der Energieversorgung.....	58
4.4.7	Brennstoffzelle.....	60
4.4.8	Batterie .....	62

4.4.9	Superkondensator .....	64
4.4.10	Nebenverbraucher.....	65
4.4.11	Lineare Optimierung.....	66
5	Ergebnisse .....	70
5.1	Variante 1: Batterie.....	70
5.1.1	Energieverteilung.....	70
5.1.2	Leistungsverteilung .....	73
5.1.3	Systemparameter .....	74
5.1.4	Zielfunktion .....	75
5.2	Variante 2: Batterie und Superkondensator.....	77
5.2.1	Energieverteilung.....	77
5.2.2	Leistungsverteilung .....	80
5.2.3	Systemparameter .....	81
5.2.4	Zielfunktion .....	82
5.3	Variante 3: Superkondensator 1F / 3F.....	83
5.3.1	Energieverteilung.....	83
5.3.2	Leistungsverteilung .....	88
5.3.3	Systemparameter .....	89
5.3.4	Zielfunktion .....	91
5.4	Vergleich der Varianten.....	93
5.4.1	Vergleich Energieverteilung.....	93
5.4.2	Vergleich Zielfunktion .....	95
5.4.3	Wasserstoffverbrauch .....	96
5.4.4	Treibhausgas-Emissionen FCEV vs. BEV .....	98
6	Zusammenfassung.....	101
7	Ausblick .....	104
	Literaturverzeichnis.....	105

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: THG-Emissionen des Fahrzeugbetriebes von BEV und FCEV .....	2
Abbildung 2: Ebenen eines FCEV .....	5
Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Brennstoffzellen-Fahrzeuges .....	7
Abbildung 4: Funktionsprinzip einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle.....	10
Abbildung 5: Explosionsdarstellung des PEM-Brennstoffzellenstacks .....	12
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Gasverteiler-Struktur .....	14
Abbildung 7: Nernstspannung in Abhängigkeit Kathodeneingangsdruck und Temperatur.....	17
Abbildung 8: Schema einer Strom-Spannungs-Kurve mit dem zugehörigen Verlustformen ..	18
Abbildung 9: Schematischer Aufbau der Luftzufuhr eines Brennstoffzellen-Stacks.....	19
Abbildung 10: Schematischer Aufbau Wasserstoffzufuhr und zugehöriger Rezirkulation ....	21
Abbildung 11: Wasserproduktion innerhalb der PEM-Brennstoffzelle .....	23
Abbildung 12: Schema eines Membranbefeuchters .....	24
Abbildung 13: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle.....	25
Abbildung 14: Schematischer Aufbau eines Kondensators sowie eines Superkondensators ..	27
Abbildung 15: Aufteilung der Kapazität eines Superkondensators.....	28
Abbildung 16: Brennstoffzelle als Range-Extender im Fahrzeug.....	29
Abbildung 17: Brennstoffzelle als Hauptantrieb im Fahrzeug .....	30
Abbildung 18: Schematischer Aufbau des Zell-Modells .....	32
Abbildung 19: Parameter des Zell-Modells.....	33
Abbildung 20: Schematischer Aufbau des Stacks mit zugehöriger Medien-Zufuhr.....	34
Abbildung 21: Übergabeparameter zwischen den Ebenen des FCEV .....	36
Abbildung 22: Messreihe treppenförmiger Last sowie ermittelter Strom-Spannungs-Kurve..	38
Abbildung 23: Abschaltverhalten eines realen Brennstoffzellenstacks .....	40
Abbildung 24: Schematische Darstellung der Gleichstromsammelschiene des FCEV .....	42
Abbildung 25: Betriebsfälle I bis VI innerhalb der Betriebsstrategie .....	44
Abbildung 26: Betriebsfälle VII bis X innerhalb der Betriebsstrategie .....	48
Abbildung 27: Schematischer Aufbau des Gesamtfahrzeugmodells .....	51
Abbildung 28: Geschwindigkeits-Zeit-Profil des WLTP .....	52
Abbildung 29: Fahrzeugmodell als Einspur-Modell in <i>Matlab / Simulink</i> .....	53
Abbildung 30: Fahrwiderstände an einem Fahrzeug.....	54
Abbildung 31: Aufbau der Energieversorgung in <i>Matlab / Simulink</i> .....	59

---

Abbildung 32: Schematischer Aufbau des Brennstoffzellen-Modells .....	60
Abbildung 33: Schematischer Aufbau des Batterie-Modells .....	63
Abbildung 34: Schematischer Aufbau des Superkondensator-Modells .....	64
Abbildung 35: Schematische Umsetzung der Zielfunktion in <i>Matlab / Simulink</i> .....	67
Abbildung 36: Genutzte Energie des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie.....	71
Abbildung 37: Zur Verfügung gestellte Energie des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie.....	72
Abbildung 38: Energieverteilung des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie.....	73
Abbildung 39: Leistungsverteilung des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie.....	74
Abbildung 40: Zielfunktion bei 4 kWh Batterie.....	76
Abbildung 41: Genutzte Energie bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator.....	77
Abbildung 42: Energiebereitstellung bei 4 kWh Batterie und 1F Superkondensator .....	78
Abbildung 43: Energieverteilung bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator .....	79
Abbildung 44: Leistungsverteilung bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator.....	80
Abbildung 45: Zielfunktion bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator .....	82
Abbildung 46: Energieverbrauch des Antriebsstranges bei 1 F Superkondensator .....	83
Abbildung 47: Energieverbrauch des Antriebsstranges bei 3 F Superkondensator .....	84
Abbildung 48: Zur Verfügung gestellte Energie bei 1 F Superkondensator .....	84
Abbildung 49: Zur Verfügung gestellte Energie bei 3 F Superkondensator .....	85
Abbildung 50: Energieverteilung des Antriebsstranges bei 1 F Superkondensator .....	86
Abbildung 51: Energieverteilung des Antriebsstranges bei 3 F Superkondensator .....	87
Abbildung 52: Leistungsverteilung des Antriebsstranges bei 1 F Superkondensator.....	88
Abbildung 53: Leistungsverteilung des Antriebsstranges bei 3 F Superkondensator.....	88
Abbildung 54: Zielfunktion bei 1 F Superkondensator .....	91
Abbildung 55: Zielfunktion bei 3 F Superkondensator .....	92
Abbildung 56: Energieumsatz des Antriebsstranges für Energiespeicherkonstellationen .....	93
Abbildung 57: Anteil zur Verfügung gestellter Energie für Energiespeicherkonstellationen..	94
Abbildung 58: Vergleich der Zielfunktionen der drei Energiespeicherkonstellationen.....	95
Abbildung 59: Wasserstoffverbrauch bei einem Batterieladezustand von 50 % .....	96
Abbildung 60: Wasserstoffverbrauch bei einem Batterieladezustand von 0 % .....	97
Abbildung 61: Treibhausgas-Emissionen für den Betrieb von FCEV und BEV .....	99

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verschiedene Befeuchtungssysteme .....	23
Tabelle 2: Parameter des Referenzfahrzeuges im Simulationsmodell .....	56
Tabelle 3: Variablen der Zielfunktion .....	69
Tabelle 4: Systemparameter des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie.....	75
Tabelle 5: Systemparameter bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator .....	81
Tabelle 6: Systemparameter des Antriebsstranges bei 1 F Superkondensator .....	89
Tabelle 7: Systemparameter des Antriebsstranges bei 3 F Superkondensator .....	90
Tabelle 8: Annahmen für den Vergleich der THG-Emissionen von FCEV und BEV.....	99

---

## Formelzeichenverzeichnis

$T$	[ °C ]	Temperatur
$H$	[ ]	Wirkungsgrad
$G$	[ ]	Gibbsche Enthalpie
$S$	$\left[ \frac{J}{K} \right]$	Entropie
$V$	[ m <sup>3</sup> ]	Volumen
$E$	[ V ]	Zellspannung
$R$	$\left[ \frac{J}{mol \cdot K} \right]$	allgemeine Gaskonstante
$z$	[ ]	Anzahl Elektronen
$F$	$\left[ \frac{C}{mol} \right]$	Faraday-Konstante
$c$	$\left[ \frac{mol}{l} \right]$	Stoffmengenkonzentration
$p$	[ Pa ]	Druck
$\varsigma$	[ ]	Wassergehalt
$n$	[ ]	Anzahl
$P$	[ W ]	Leistung
$I$	[ A ]	Strom
$U$	[ V ]	Spannung
$t$	[ s ]	Zeit
$a$	$\left[ \frac{m}{s^2} \right]$	Beschleunigung
$v$	$\left[ \frac{m}{s} \right]$	Geschwindigkeit
$C$	[ F ]	Elektrische Kapazität
$E$	[ kWh ]	Elektrische Energie



---

# 1 Einleitung

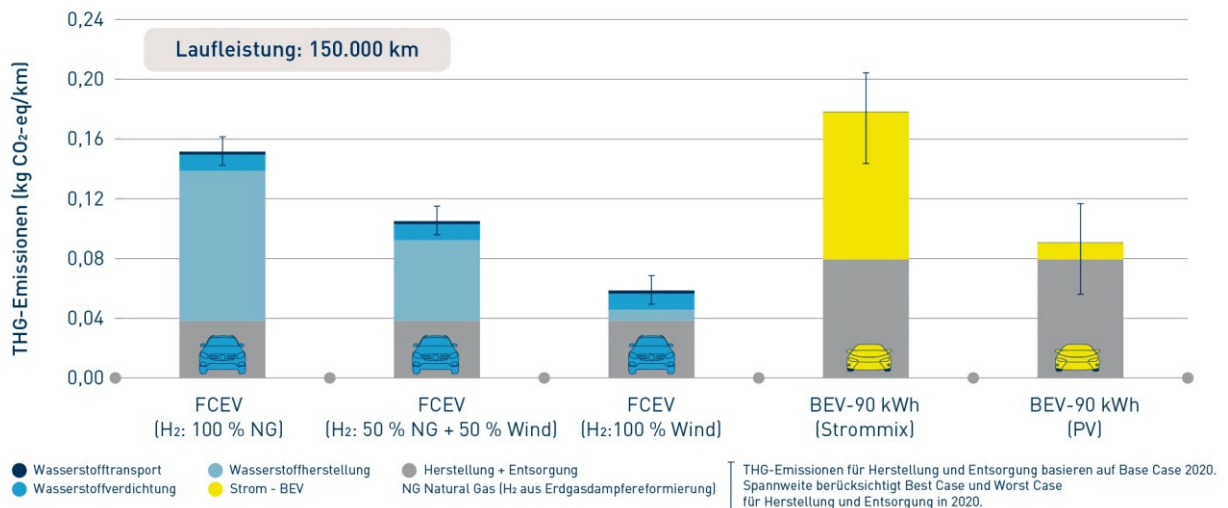
## 1.1 Motivation

Die Elektrifizierung des weltweiten Fahrzeugbestandes nimmt stetig zu. Die Anzahl an batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicle; kurz: BEV) und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen (Plug-In-Hybrid Electric Vehicle; kurz: PHEV) ist zwischen 2021 und 2022 weltweit um 60 % gestiegen. In Deutschland hat sich die Zahl an batterieelektrischen Fahrzeugen zwischen diesen Jahren sogar mehr als verdreifacht. [1] [2]

Diese Entwicklung ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Insbesondere die Diskussion um den Klimawandel hat das Bewusstsein der Gesellschaft in Hinblick auf die Umwelt beeinflusst. Auch die politischen Rahmenbedingungen – Pariser Klimaschutzübereinkommen, Klimaneutralität bis 2050, Verbot von neu zugelassenen verbrennungsmotorischen Pkw ab 2035, finanzielle Subventionen – begünstigen diesen Trend. [3] [4]

Elektrische Fahrzeuge gelten in Hinblick auf ihre Treibhausgasemissionen und Schadstoffemissionen (kurz: THG-Emissionen) aktuell als lokal emissionsfrei. Zu diesen Fahrzeugen gehören sowohl das batterieelektrische Fahrzeug (BEV) als auch das Brennstoffzellen-Fahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle; kurz: FCEV). Das Brennstoffzellen-Fahrzeug vereint die Vorteile von konventionellen verbrennungsmotorischen und batterieelektrischen Fahrzeugen, da es kurze Betankungszeiten bei gleichzeitig hohen Reichweiten aufweist und den Strom zum Fahren direkt an Bord mit Hilfe der Brennstoffzelle erzeugt. [5] [6]

Hinsichtlich der Treibhausgas-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus bietet das Brennstoffzellen-Fahrzeug im Vergleich zum batterieelektrischen Fahrzeug weitere Vorteile. Die Ergebnisse einer Studie des Fraunhofer-Institutes für Solare Energiesysteme (kurz: ISE), die die THG-Emissionen von FCEV und BEV untersucht hat, sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. [7]



**Abbildung 1:** THG-Emissionen des Fahrzeugbetriebes von BEV und FCEV für 2020-2030 [7]

Es ist ersichtlich, dass die Herstellung des verwendeten Wasserstoffs sowie des verwendeten Batterieladestromes einen enormen Einfluss auf die Emissionen der Fahrzeuge hat. Aus dieser Studie geht hervor, dass sowohl im optimalen Fall, als auch im Worst-Case-Szenario, das Brennstoffzellen-Fahrzeug Emissionsvorteile bietet. Die Nutzung eines batterieelektrischen Fahrzeuges ist nur bei geringen Batteriekapazitäten bis 50 kWh und einer Reichweite von bis zu 250 km vorteilhaft. Auch verfügt das Brennstoffzellen-Fahrzeug über eine deutlich kleinere Batterie, was sich positiv auf die Verwendung seltener Erden auswirkt. Dieser Anteil entspricht im Vergleich zum batterieelektrischen Fahrzeug nur 2,5 %. [8] [9]

Die Brennstoffzelle stellt einen elektrochemischen Energiewandler dar, der auf Basis einer kontrollierten Knallgasreaktion aus Wasserstoff und Umgebungsluft Wasser als Reaktionsprodukt erzeugt. Somit fallen während des Betriebes, neben den fahrzeugspezifischen Emissionen wie Bremsenabrieb oder Lärm, keine schädlichen Abgasemissionen an. Bei der mobilen Anwendung wird eine sogenannte Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle eingesetzt, da diese über eine hohe Leistungsdichte verfügt. Beim Einsatz in einem Fahrzeug ergeben sich allerdings einige Herausforderungen, zu dem insbesondere der Zielkonflikt zwischen der Lebensdauer und dem dynamischen Betrieb gehört. Denn dynamischer Betrieb einer Brennstoffzelle kann zu kritischen Betriebszuständen, wie beispielsweise kurzzeitigen Über- oder Unterversorgungen der Betriebsmedien, führen. In Folge des dynamischen Betriebes kann sich eine Zunahme der Membran-Innenwiderstände sowie eine Reduzierung der aktiven katalytischen Oberfläche ergeben, welches einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer hat. Zum Ausgleich wird in Brennstoffzellen-Fahrzeugen ein elektrischer Zwischenspeicher als Puffer der Dynamik eingesetzt. Beim Einsatz des Speichers stellen sich

allerdings die Fragen nach Art sowie Kapazität des Energiespeichers, um die Potentiale des Brennstoffzellen-Fahrzeuges ausschöpfen zu können. [5] [10]

Für die Dimensionierung des elektrischen Antriebsstranges eines Fuel Cell Electric Vehicle ist es notwendig das Energiemanagement näher zu betrachten. Mit Hilfe dieser Betrachtung kann eine optimale anwendungsspezifische Auslegung eines Brennstoffzellenfahrzeuges erfolgen.

## **1.2 Vorgehensweise und Zielsetzung der Arbeit**

Im Rahmen dieser Dissertation wird das Energiemanagement eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges mit Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (kurz: PEM-BZ) untersucht. Dafür wurde das Themengebiet in die Bereiche

1. der Brennstoffzelle,
2. des Energiespeichers und
3. der Modellierung

unterteilt. Im ersten Abschnitt werden die Grundlagen von PEM-Brennstoffzellen erläutert. Zu diesen gehören das Funktionsprinzip, der Aufbau und die Thermodynamik einer Brennstoffzelle. Darüber hinaus wird das Medienmanagement betrachtet, welches für den Betrieb des Gesamtsystems notwendig ist.

Im Anschluss werden die untersuchten Energiespeicher hinsichtlich des Funktionsprinzips und der jeweiligen Vor- und Nachteile vorgestellt. Der Fokus bei der vorliegenden Arbeit liegt auf der Lithium-Ionen-Batterie und dem Superkondensator.

Darauf aufbauend wird das Gesamt-Fahrzeugmodell in der Simulationsumgebung *Matlab / Simulink* beschrieben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der ebenenbasierten Modellierung, die sowohl die Zell-Ebene zur Beschreibung der elektrochemischen und physikalischen Wirkzusammenhänge, als auch die Stack-Ebene mit Medienmanagementkomponenten sowie das Gesamtfahrzeug umfasst. Im Rahmen dieser Betrachtung wurden die Übergabeparameter detektiert, die einen Einfluss auf das Energiemanagement des Brennstoffzellen-Fahrzeuges haben. Des Weiteren wird in diesem Kapitel die Validierung, die zugrundeliegende Betriebsstrategie und die Umsetzung des Simulationsmodells beschrieben.

Nachfolgend erfolgt die Vorstellung der Ergebnisse, die mit dem generierten Brennstoffzellen-Fahrzeug-Modells berechnet wurden. Als Abschluss dienen eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf zukünftig relevante Themenfelder.

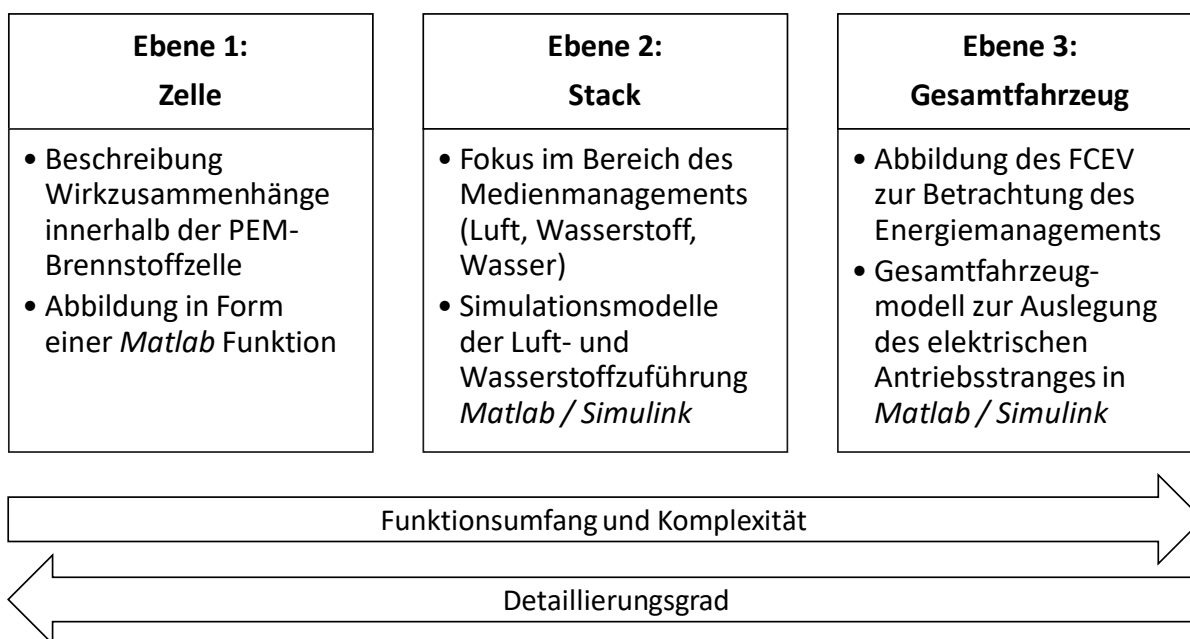
Das Ziel der vorliegenden Dissertation besteht in der ganzheitlichen Betrachtung des elektrischen Antriebsstranges eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges in der Simulationsumgebung *Matlab / Simulink*. Es wird ein allgemeingültiges Simulationsmodell eines Fuel Cell Electric Vehicle entwickelt, welches die Auslegung des elektrischen Antriebsstranges für verschiedene Anwendungsfälle ermöglicht. Zukünftig können mit diesem Modell verschiedene Brennstoffzellen-Fahrzeuge und -klassen abgebildet werden.

---

## 2 Technische Einführung

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde ein Brennstoffzellen-Fahrzeug mit Hilfe des Simulationsprogrammes *Matlab / Simulink* abgebildet. Das Simulationsmodell des Gesamtfahrzeuges dient der Betrachtung des Energiemanagements und somit der Auslegung eines Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV). Es stellt ein allgemeingültiges Modell dar, welches für verschiedene Fahrzeuge und Anwendungen anpassbar ist.

Aufgrund der ganzheitlichen Untersuchung wurde das FCEV zunächst in drei Ebenen hinsichtlich des Detaillierungsgrades und Funktionsumfangs gegliedert, die nachfolgend dargestellt sind.



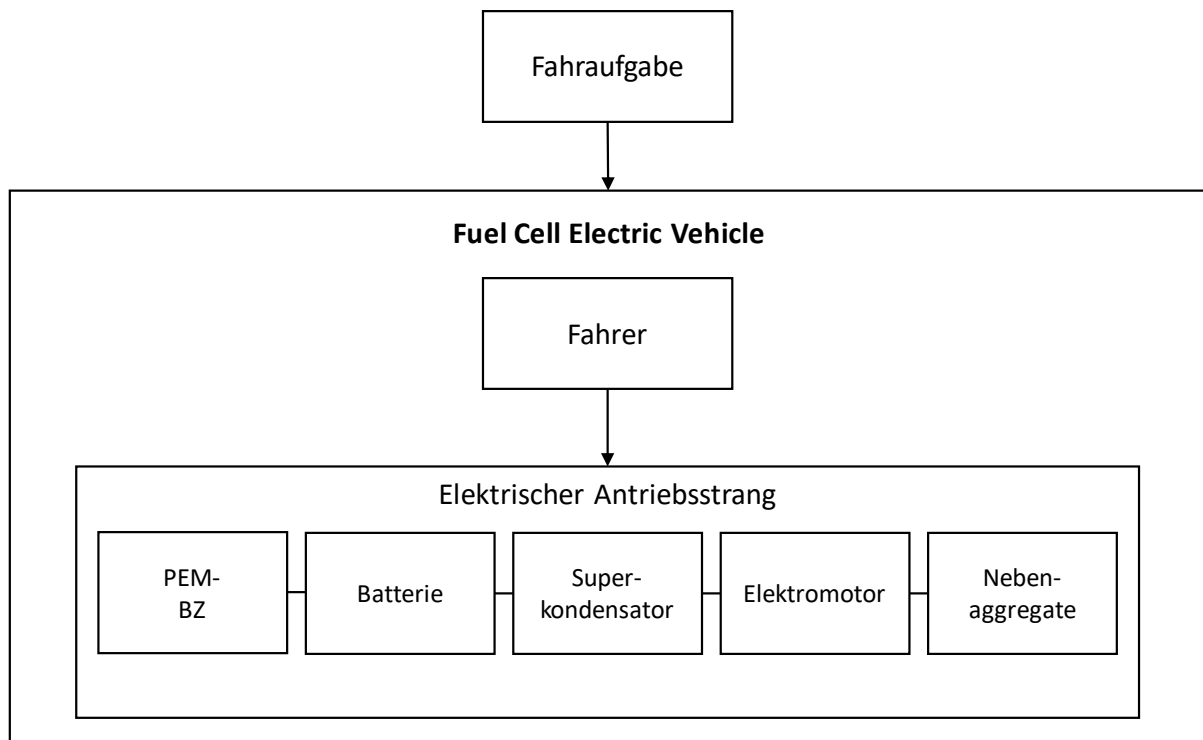
**Abbildung 2:** Ebenen eines FCEV

Die Ebene 1 beschreibt die Zusammenhänge, die innerhalb der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle stattfinden. Diese Prozesse, die im weiteren Verlauf der Arbeit erläutert werden, wurden mit Hilfe eines *Matlab*-Skriptes mathematisch beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Zell-Modell zum einen für die weitere Betrachtung des Medienmanagements, welches Ebene 2 umfasst, herangezogen. Des Weiteren wurde es für die Validierung genutzt, in dem anhand von Messdaten eines realen Brennstoffzellen-Stacks das Betriebs- und Systemverhalten berechnet worden ist.

In der Ebene 2, der Stack-Ebene, liegt der Fokus auf dem Medienmanagement eines Brennstoffzellen-Systems. Zu den Medien einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle gehören Wasserstoff, Luft und Wasser (siehe Kapitel 3.1.4).

Das erforderliche Medienmanagement wurde ebenfalls simulativ in der Simulationsumgebung *Matlab / Simulink* abgebildet. Für die Betrachtung des Energiemanagements des FCEV ist jedoch nur das Luftmanagement von besonderem Interesse. Denn bei einem PEM-Brennstoffzellen-Stack ist es sinnvoll die benötigte Umgebungsluft zur Steigerung der Effizienz zu verdichten, welches mit einem elektrisch angetriebenen Verdichter umgesetzt wird. Dieser elektrisch angetriebene Verdichter hat in bestimmten Betriebspunkten eine hohe Leistungsaufnahme und somit einen enormen Einfluss auf das Energiemanagement des Fahrzeuges. Aus diesem Grund wird im Rahmen des Simulationsmodells des Gesamtfahrzeuges die Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Betriebsführung der Brennstoffzelle auf Basis von Kennfeldern berücksichtigt.

In der Ebene 3 wurde ein Brennstoffzellenfahrzeug simulativ abgebildet. Diese weist den größten Funktionsumfang und geringsten Detaillierungsgrad auf. Das Fahrzeug wurde auf Basis des Referenzfahrzeuges Mercedes Benz GLC F-Cell als Einspur-Modell zur Betrachtung der Längsdynamik umgesetzt. Die Querdynamik wurde aufgrund der Energieflussbetrachtung als vernachlässigbar angenommen. Die Karosserie und das Fahrzeuggewicht wurden entsprechend der Fahrzeugklasse J (SUV) angepasst. Die weiteren Komponenten des Elektromotors, der Brennstoffzelle und der Batterie wurden ebenfalls dem Referenzfahrzeug entsprechend angenähert. Wie bereits beschrieben, werden aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems unter anderem Kennfelder einiger Komponenten verwendet. Für die Auslegung des elektrischen Antriebsstranges eines FCEV ist es nicht notwendig, die Subsystem-Modelle stets mitzusimulieren. Zudem wurde diese Annahme aus Gründen der Rechenzeitoptimierung getroffen. Der schematische Aufbau des Gesamtfahrzeug-Modells ist in **Abbildung 3** dargestellt.



**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau des Brennstoffzellen-Fahrzeuges

Es ist ersichtlich, dass das Fahrzeug mit Hilfe eines Fahrers einer Fahraufgabe in Form eines vorgegebenem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramms folgt. Innerhalb des Fahrzeuges wird der elektrische Antriebsstrang, bestehend aus den Komponenten Brennstoffzelle, Energiespeicher, Elektromotor und Nebenverbrauchern, abgebildet.

Die Brennstoffzelle ist auf Basis ihres validierten Systemverhaltens implementiert. Dieses Systemverhalten bestimmt unter anderem die zur Verfügung gestellte Leistung sowie deren Effizienz. Aufgrund des Zielkonfliktes zwischen Lebensdauer und Dynamik der Brennstoffzelle wurde das dynamische Verhalten der Brennstoffzelle variabel mittels verschiedener Parametervektoren implementiert. Es wird eine maximal zulässige Dynamik hinterlegt und das für die Fahraufgabe benötigte dynamische Verhalten erfasst. Dadurch kann eine Analyse des Betriebsverhaltens für verschiedene Lastanforderungen erfolgen, um den Antriebsstrang des Brennstoffzellen-Fahrzeuges optimal auslegen zu können. Zusätzlich zur Auslegung der Brennstoffzelle hat das dynamische Verhalten einen enormen Einfluss auf die Energiespeicher und deren Kapazität innerhalb des Antriebsstranges. Denn die Energiespeicher haben die Aufgabe, die fehlende Dynamik der Brennstoffzelle auszugleichen.

Im Rahmen der Simulation des FCEV mit einer Lithium-Ionen-Batterie als Energiespeicher wurden Effizienzpotentiale identifiziert, sodass als Energiespeicher sowohl eine Batterie als auch ein Superkondensator implementiert wurden. Es besteht innerhalb der Betriebsstrategie die Möglichkeit zwischen drei Konstellationen zu wählen: Batterie, Superkondensator oder Batterie sowie Superkondensator. Mit Hilfe dieser variablen Energiespeicher-Topologie kann die optimale Konzeptionierung ermittelt werden. Des Weiteren ist die Kapazität der Batterie aufgrund der variablen Brennstoffzellen-Dynamik ebenfalls veränderlich realisiert.

Denn das Ziel mit Hilfe des Simulationsmodells besteht in der Bestimmung der optimalen Konfiguration eines FCEV, je nach Anwendungsfall, Fahrzeug und Auslegung des Antriebsstranges.



---

## 3 Stand der Technik

### 3.1 PEM-Brennstoffzellen

Eine Brennstoffzelle stellt ein sogenanntes galvanisches Element dar, welches eine direkte elektrochemische Energiewandlung mit Hilfe eines Brennstoffes und eines Oxidationsmittels vollzieht. Idealerweise findet innerhalb der Brennstoffzelle eine isotherm-reversible Reaktion mit gesamtener Nutzung der Gibbschen Enthalpie, welche das höchstmögliche thermodynamische Potential beschreibt, mit einem theoretischen Wirkungsgrad von 83% statt. Jedoch treten innerhalb der Zelle verschiedene Verlustformen, wie beispielsweise die Ohmschen oder Ladungsverluste, auf, sodass der Wirkungsgrad real bei 50-70% liegt. [5] [11] [12] [13]

Eine Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (kurz: PEM-BZ) erhält ihren Namen durch den verwendeten Elektrolyten. Dieser besteht aus einer protonenleitfähigen Membran, weshalb sie auch des Öfteren als Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle bezeichnet wird. PEM-Brennstoffzellen eignen sich für mobile Anwendungen aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte sowie der niedrigen Betriebstemperatur von 60-120 °C. Im Vergleich zum Verbrennungsmotor weist sie einen höheren Wirkungsgrad im Teillastbereich auf und ist durch eine geringe Anzahl mechanischer Bauteile gekennzeichnet. Darüber hinaus entsteht bei der Reaktion innerhalb der Zelle als Produkt Wasser, welches in äußerst geringen Treibhausgasemissionen resultiert. PEM-Brennstoffzellen vereinen durch die lokale Emissionsfreiheit und die hohe Reichweite bei geringen Betankungszeiten die Vorteile von konventionell verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen (ICE) und batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV). Des Weiteren ist die PEM-Brennstoffzelle skalierbar hinsichtlich Leistung und Kapazität, sodass sie für verschiedene Anwendungsgebiete ausgelegt und verwendet werden kann. [14] [15] [16] [17] [18]

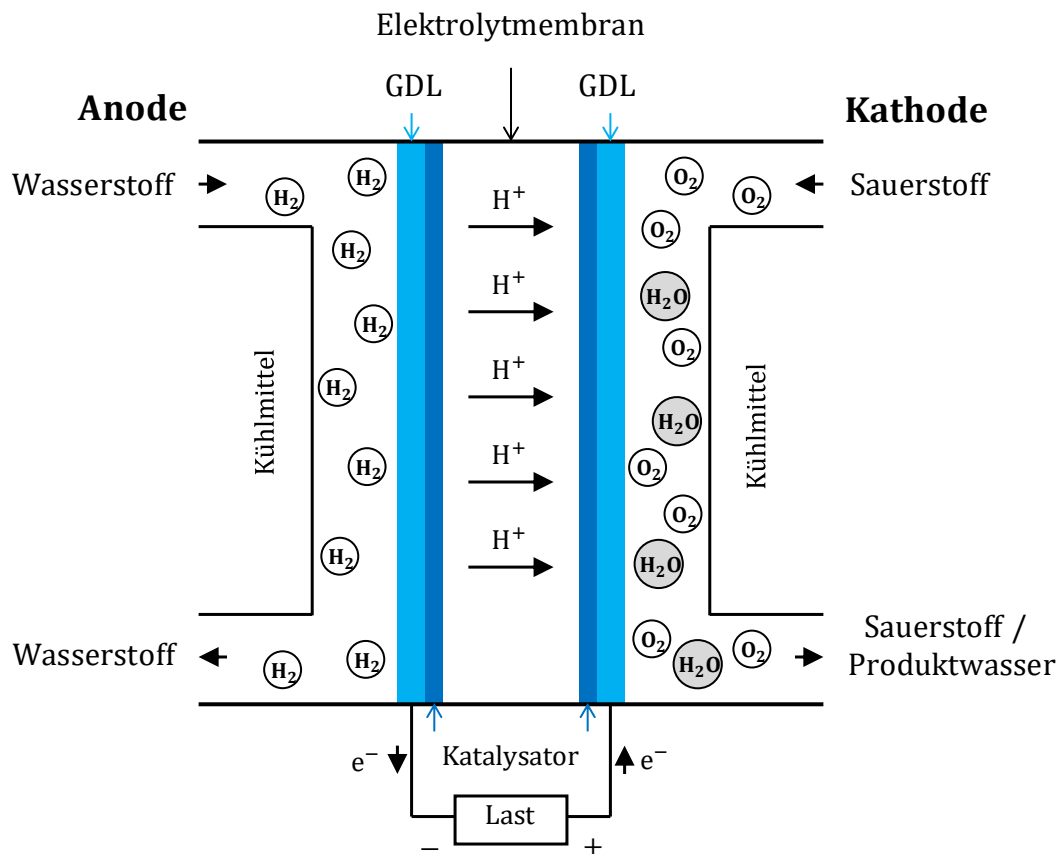
Die PEM-Brennstoffzelle hat allerdings aufgrund des verwendeten katalytischen Materials Platin einen Kostennachteil. Zudem ist sie aufgrund des verwendeten Platins empfindlich gegenüber Kohlenstoffmonoxid. Ein weiterer Nachteil, insbesondere bei der mobilen Anwendung, besteht in dem benötigten Medienmanagement einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle. Das Medienmanagement, bestehend aus Luft-, Wasserstoff- sowie Wassermanagement, impliziert einen hohen Regelungsaufwand sowie Bauraumbedarf.

Die erforderlichen Komponenten werden im weiteren Verlauf der Arbeit näher beschrieben. [19] [5] [20] [21] [22] [23]

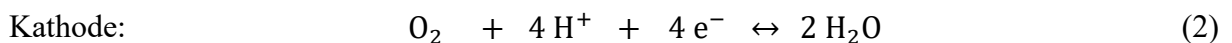
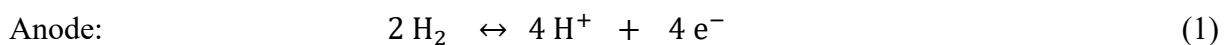
Zunächst erfolgt die Betrachtung des Funktionsprinzips, des Aufbaus einer PEM-Brennstoffzelle sowie der thermodynamischen Abläufe.

### 3.1.1 Funktionsprinzip

Eine Brennstoffzelle besteht grundsätzlich aus zwei Elektroden, die durch einen Elektrolyten voneinander getrennt werden. Innerhalb der Zelle finden jeweils an den Elektroden zwei Teilprozesse statt, die in der nachfolgenden Abbildung schematisch dargestellt und in den **Formeln 1 bis 3** aufgeführt sind.



**Abbildung 4:** Funktionsprinzip einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle



Unter Freisetzung von elektrischer und thermischer Energie kommt es zu einer Redox-Reaktion, welche sich auf der Anodenseite durch eine Oxidation und an der Kathodenseite durch eine Reduktion auszeichnet.

Zunächst strömt der Wasserstoff unter Druck über die Gaskanäle auf die Gasdiffusionsschicht auf der Anodenseite. Im Anschluss daran können die Wasserstoffmoleküle durch diese Diffusionsschicht bis an die Reaktionszentren der katalytischen Schicht diffundieren. An dieser Dreiphasen-Kontaktzone, welche aus Polymerelektrolyt, Katalysator und Elektrode besteht, wird das Molekül am Katalysator adsorbiert. Dadurch kann in der Oxidationsreaktion das Wasserstoffmolekül in zwei Elektronen sowie Wasserstoffprotonen aufgespalten werden.

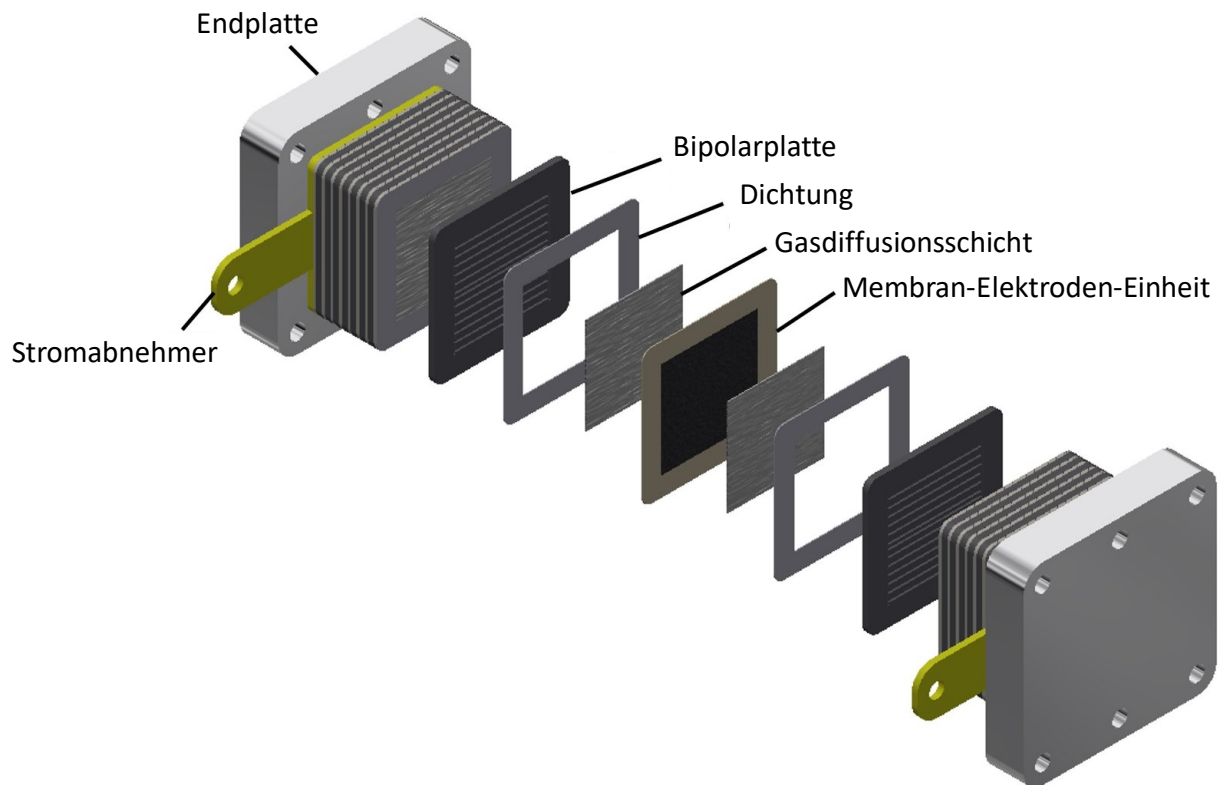
Durch die Potentialdifferenz zwischen den Elektroden sowie die Trennung der Reaktionspartner werden innerhalb der Zelle die Elektronen von der Anodenseite dazu gezwungen über den äußeren Stromkreis zur Kathode zu fließen. Die Wasserstoffprotonen hingegen gelangen mit Hilfe des Elektrolyten über den inneren Stromkreis zur Kathode.

Analog zu der anodenseitigen Oxidation kann auf der Kathodenseite das Sauerstoffmolekül am Katalysator adsorbiert werden, sodass es bei der Reduktion mit den Wasserstoffprotonen und Elektronen zu flüssigem Wasser reagieren kann. [5] [11] [12] [15] [21] [24] [25] [26]

### **3.1.2 Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle**

Eine sogenannte Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (kurz: PEM-BZ) besteht aus den nachfolgend aufgeführten und im weiteren Verlauf dieses Kapitels beschriebenen Bestandteilen, die in **Abbildung 5** dargestellt sind:

- Polymerelektrolytmembran
- Katalytische Schicht
- Gasdiffusionsschicht
- Gasverteiler
- Membran-Elektroden-Einheit
- Kontakt- und Endplatten



**Abbildung 5:** Explosionsdarstellung des PEM-Brennstoffzellenstacks [27]

Die Elektroden innerhalb der Zelle bestehen aus der Gasdiffusions- und katalytischen Schicht sowie aus dem Gasverteiler und den Kontaktplatten. [5] [11] [12] [18] [25]

#### Polymerelektrolytmembran

Der Elektrolyt innerhalb der PEM-Brennstoffzelle stellt die sogenannte Polymerelektrolytmembran dar. Diese Membran besteht aus 50-150  $\mu\text{m}$  dicken „[...] protonenleitenden Folien aus perfluorierten und sulfonierten Polymeren [...]“ (vgl. [5, S. 79]). Die Membran hat die Aufgabe die Anoden- sowie Kathodenseite räumlich voneinander zu trennen. Darüber hinaus wird mit ihr der Wasserstoffprotonentransport realisiert. Dieser Transport findet mit Hilfe von angelagerter Sulfonsäure statt, die im befeuchteten Zustand die Elektrosmose von hydrierten Wasserstoffprotonen durch die Membran gewährleistet. Neben der Befeuchtung kann zur Reduzierung des Innenwiderstandes die Dicke der Membran verringert werden. Allerdings sind entsprechende Stützkonstruktionen zur Gewährleistung der mechanischen Festigkeit notwendig. Auf Basis der Aufgaben der Membran können die entsprechenden Anforderungen abgeleitet werden. Zu diesen gehören eine möglichst hohe Protonenleitfähigkeit und gleichzeitige Barriere zwischen Oxidationsmittel und Brennstoff. Zudem muss eine elektrische Leitfähigkeit vermieden werden, damit die Elektronen im Falle eines Kurzschlusses anstelle des äußeren Stromkreises nicht den inneren nutzen können.

### Katalytische Schicht

Die katalytische Schicht hat innerhalb der PEM-Brennstoffzelle die Aufgabe die Reaktionszentren der elektrochemischen Reaktion bereitzustellen. Darüber hinaus soll mit ihr die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht werden, indem die Aktivierungsenergie der Reaktion reduziert wird. Die Hauptanforderung des Katalysators besteht darin, dass alle Reaktanden Zugang zu ihr haben. Die Elektronen gelangen beispielsweise durch einen elektrisch leitenden Festkörper zur katalytischen Schicht, wohingegen die Protonen diese durch den Elektrolyten erreichen und die in der Zelle befindlichen Gase die Hohlräume nutzen. Zusätzlich dazu müssen die Partikel des Katalysators elektrisch leitend sein.

Als Katalysatorwerkstoff hat sich bei der Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle Platin etabliert. Von Relevanz bei der katalytischen Schicht ist sowohl die Beladung, welche derzeit etwa bei 0,3 bis 1,0 mg/cm<sup>2</sup> liegt, als auch die aktive Oberfläche. Um diese zu erhöhen, sollte die Oberfläche möglichst vergrößert, zum Beispiel durch Einarbeitung von Elektrolyt-Material, und effektiv genutzt werden. Des Weiteren sollte die Platinschicht möglichst dünn sein, um Potentialverluste zu vermeiden.

Die katalytische Schicht kann entweder ein Teil der porösen Elektrode oder des Elektrolyten sein und wird meist dazwischen gepresst.

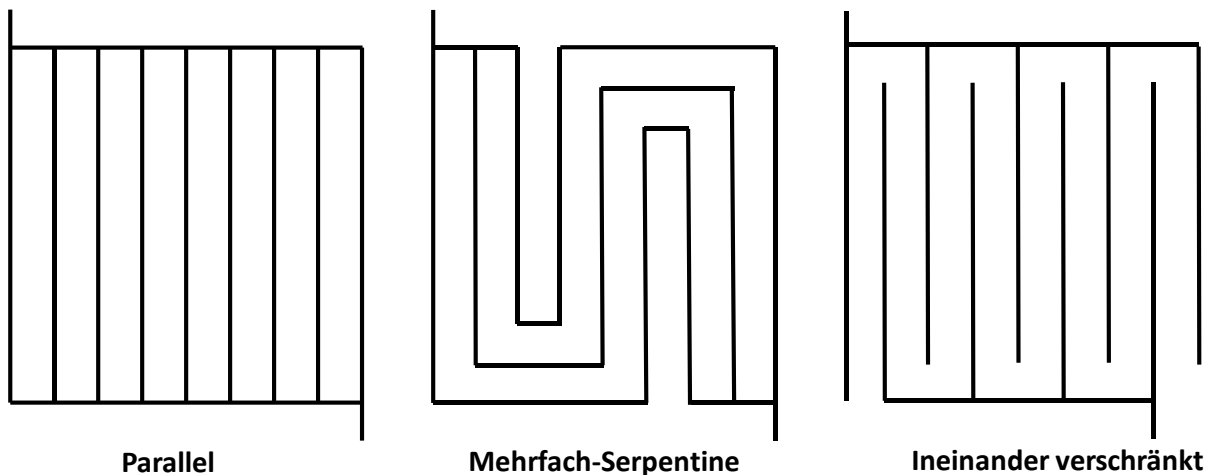
### Gasdiffusionsschicht

Die Gasdiffusionsschicht oder auch Gasdiffusionslage (kurz: GDL) befindet sich zwischen der katalytischen Schicht und den Gasverteilern und stellt einen Teil der Elektrode dar. Sie muss die Edukt Gase gleichmäßig auf der katalytischen Schicht verteilen und auf der Kathodenseite die Strömungspfade für das entstehende Produktwasser zur Verfügung stellen. Darüber hinaus bestehen ihre Aufgaben in der Herstellung der elektrisch leitenden Verbindung zwischen dem Katalysator und Gasverteiler, dem Abtransport der entstehenden Wärme sowie der Erhöhung der mechanischen Festigkeit der Membran-Elektroden-Einheit. Zudem hat die Gasdiffusionsschicht keine direkte Beteiligung an der elektrochemischen Reaktion. Meist wird die GDL aus hochporösen Materialien, wie beispielsweise Kohlenstoff-Papier oder Kohlenstoff-Strukturgewebe gefertigt, da mit diesen die Aufgaben erfüllt werden können.

### Gasverteiler

Die Hauptaufgaben des Gasverteilers bestehen in dem kontinuierlichen Antransport des Brenngases und Oxidationsmittels sowie dem Abtransport des entstehenden Produktwassers. Darüber hinaus muss der Gasverteiler die in der katalytischen Schicht entstehende Wärme, ebenso wie die GDL, abführen und den Druckverlust innerhalb der Zelle reduzieren.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, bedarf es einer geeigneten Wahl der Strömungskanal-Geometrie. Diese kann einen signifikanten Einfluss auf die Leistung des Brennstoffzellensystems haben. In der nachfolgenden Abbildung sind drei mögliche Strömungskanalmuster dargestellt.



**Abbildung 6:** Schematische Darstellung der Gasverteiler-Struktur

Die verschiedenen Geometrien unterscheiden sich anhand ihrer Vor- und Nachteile. Die Serpentineströmung beispielsweise zeichnet sich durch die Eigenschaft aus Produktwasser optimal abzuleiten. Jedoch kann es bei großflächigen Zellen zu einer Erhöhung des Druckverlustes kommen. Zu beachten ist zudem die Breite der Stege und Gaskanäle, die in einem Zielkonflikt zueinanderstehen und Einfluss auf die Eigenschaften der Brennstoffzelle haben. Die Fähigkeit Prozesswasser abzuführen und die Kontaktfläche zur Gasdiffusionschicht kann zum Beispiel durch breite Gaskanäle optimiert werden. Breite Gaskanäle haben allerdings schmale Stege zur Folge, weshalb die mechanische Stabilität und elektrische Leitfähigkeit negativ beeinflusst wird.

Als Werkstoff des Gasverteilers kann entweder Graphit oder Edelstahl verwendet werden, wobei Graphit die hohen Anforderungen hinsichtlich thermischer, chemischer und elektrischer Materialeigenschaften erfüllt. Aufgrund der geringen mechanischen Stabilität kann alternativ Edelstahl verwendet werden, wobei die Korrosionsbeständigkeit als problematisch anzusehen ist.

### Membran-Elektroden-Einheit

Als Membran-Elektroden-Einheit (kurz: MEA) wird der Zusammenschluss der Membran mit den Elektroden bezeichnet. Eine MEA kann entweder als Dreischicht-, Fünfschicht- oder Siebenschicht-Membran-Elektroden-Einheit umgesetzt werden. Die Dreischicht-MEA beschreibt die Verbindung der Membran mit der katalytischen Schicht, wohingegen die Fünfschicht-MEA zusätzlich dazu die Gasdiffusionsschichten und ebenfalls die Siebenschicht-MEA die Dichtungen in die Konstruktion miteinbezieht. Diese Mehrschichtkonstruktionen werden unter anderem durch Heißverpressung oder Aufbringen der einzelnen Schichten hergestellt. Meist wird die MEA als Fünfschicht-Membran-Elektroden-Einheit mit einer Dicke von  $< 1$  mm gefertigt.

### Kontakt- und Endplatten

Die Kontaktplatten innerhalb der Brennstoffzelle werden meist als Bipolarplatten bezeichnet und haben die Aufgabe, die elektrisch gelieferte Leistung abzuführen. Dementsprechend müssen sie eine elektrische Leitfähigkeit und mechanische Festigkeit aufweisen.

Die Endplatten hingegen werden für die Struktur und Konstruktion der Brennstoffzelle benötigt. Zudem beinhalten sie die thermische Konditionierung des Systems und müssen eine gute Wärmeleitfähigkeit, mechanische Stabilität und Korrosionsbeständigkeit gewährleisten. Als Werkstoff fungieren hierfür metallische Werkstoffe, wie beispielsweise Edelstahl. Bei der Verschraubung des Brennstoffzellenstapels ist die Flächenpressung zu beachten, da ein zu hoher Anpressdruck zu einer irreversiblen Beschädigung der Diffusionsschichten, dementsprechend zu einer Verringerung des Stofftransportes der Reaktionsgase und des Produktwassers, führen kann. Ein zu geringer Anpressdruck kann hingegen den Kontaktwiderstand erhöhen, sodass in Folge die Ionenleitfähigkeit reduziert wird.

### PEM-Brennstoffzellen-Stack

Der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen-Stack erhält seinen Namen dadurch, dass die einzelnen Brennstoffzellen in Reihe zu einem Stapel (engl.: Stack) zusammengefasst werden. Mit Hilfe dieser Konfiguration lässt sich die von der Brennstoffzelle generierte Leistung erhöhen. Diese Leistung wird durch die abgegebenen Elektronen des Wasserstoffes erzeugt.

### 3.1.3 Thermodynamik einer PEM-Brennstoffzelle

Im Bereich der Thermodynamik einer PEM-Brennstoffzelle gibt es zwei Ansätze, die theoretisch maximal erzeugbare Spannung des elektrochemischen Energiewandlers zu berechnen.

Zum einen besteht die Möglichkeit die maximal freisetzbare Enthalpie, die sogenannte Gibbsche Enthalpie, für die Berechnung heranzuziehen.

$$G = U - T \cdot S + p \cdot V \quad (4)$$

Zum anderen kann die sogenannte Nernst-Spannung berechnet werden. Diese basiert auf dem dritten Hauptsatz der Thermodynamik und gibt den Gleichgewichtszustand einer Redoxreaktion wieder. Dieser Zustand beschreibt die maximale Ordnung, sprich das Nicht-Vorhandensein von Entropie, am absoluten Nullpunkt. Für die Berechnung der Strom-Spannungs-Kurve ist die Nernst-Spannung von besonderem Interesse, da mit ihr die maximal mögliche Spannung der Brennstoffzelle ermittelt werden kann. [5] [11] [13] [14] [21] [25] [28]

Die Nernst-Spannung  $E_N$  kann wie folgt berechnet werden:

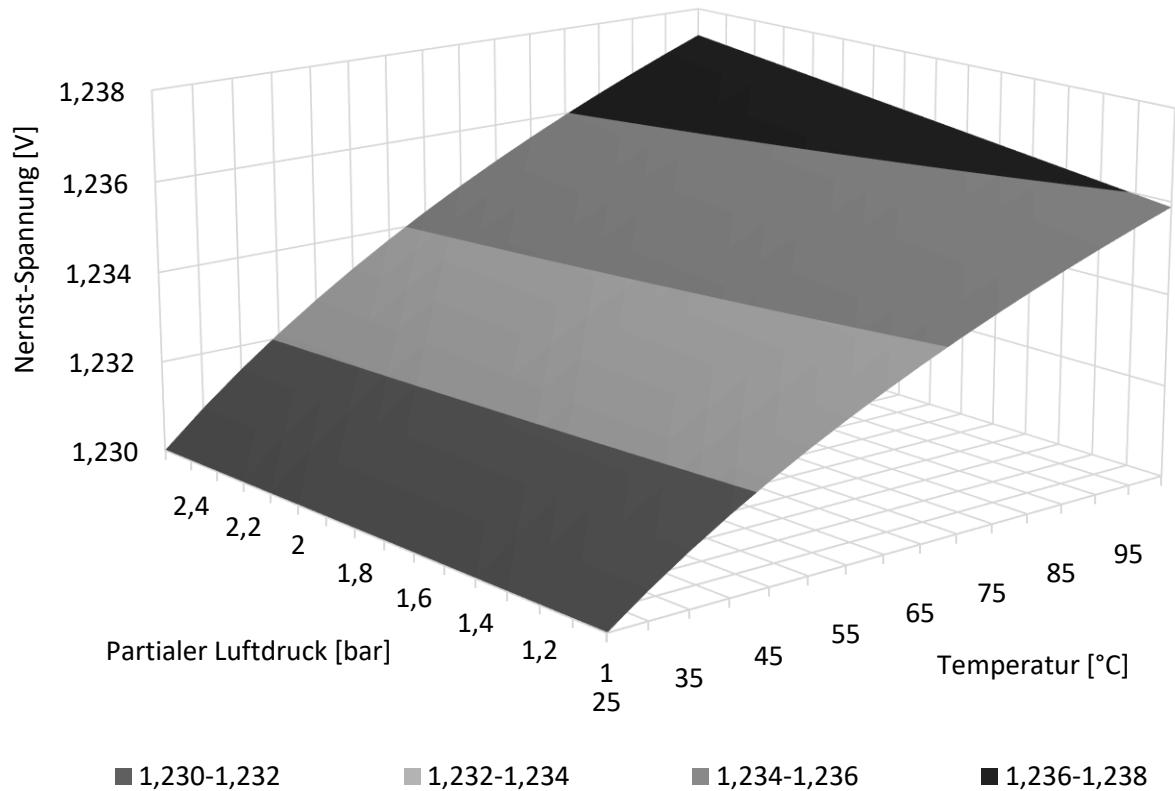
$$E_N = E^0 - \frac{RT}{zF} \cdot \ln \left( \frac{c_{Ox}}{c_{Red}} \right) \quad (5)$$

Die Gleichgewichtskonstanten  $c$  können im Fall der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle entsprechend der Redoxreaktion ersetzt werden:

$$E_N = E^0 - \frac{RT}{zF} \cdot \ln \left( \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} \cdot (p_{O_2})^{1/2}} \right) \quad (6)$$

Aus der **Formel 6** geht eine Druckabhängigkeit der von der PEM-Brennstoffzelle erzeugten Spannung hervor, weshalb den Reaktionsgasen und deren Konditionierung eine enorme Bedeutung zugewiesen wird. Insbesondere die Druckabhängigkeit des einströmenden Sauerstoffes verdeutlicht die Notwendigkeit eines geeigneten Luftmanagements. Diese Abhängigkeit ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

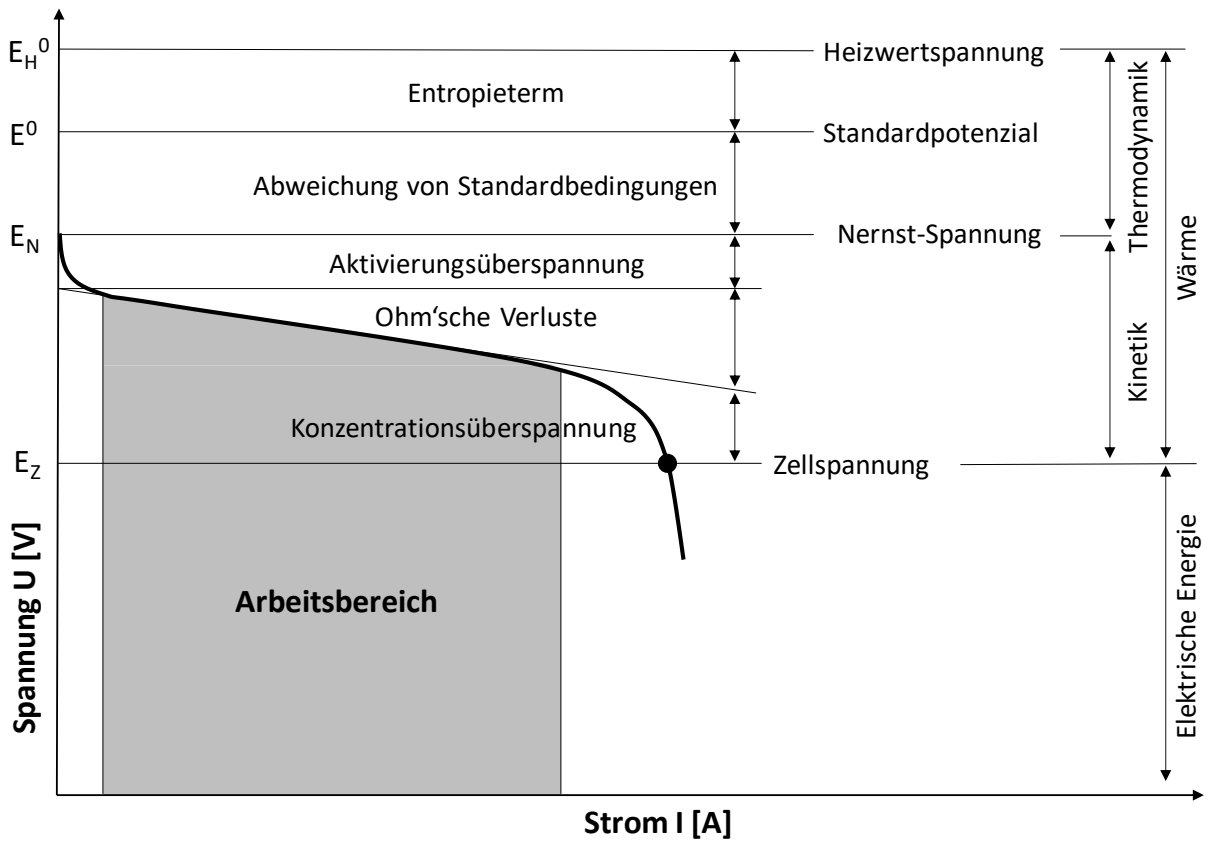




**Abbildung 7:** Nernstspannung in Abhängigkeit des Kathodeneingangsdruckes und der Temperatur

Aus der Abhängigkeit kann abgeleitet werden, dass bei steigendem Kathodeneingangsdruck und ebenso bei steigender Temperatur eine höhere Zellspannung generiert werden kann.

Zusätzlich zur Nernst-Spannung gibt es verschiedene Spannungs-Arten, die das Verhalten der PEM-Brennstoffzelle beschreiben. Zu diesen Arten gehören unter anderem die Heizwertspannung, die auf Basis des Heizwertes von Wasserstoff berechnet wird, sowie das sogenannte Standardpotenzial, welches mit Hilfe der Gibbschen Enthalpie ermittelt wird. Darüber hinaus kommt es bei der Brennstoffzelle zu drei Verlustformen, die den Arbeitsbereich sowie die Zellspannung bestimmen: die Aktivierungsüberspannung, die Ohm'schen Verluste sowie die Konzentrationsüberspannung. Mit Hilfe der genannten Spannungen und Verluste wird die Strom-Spannungs-Kurve der Brennstoffzelle charakterisiert. Zur Veranschaulichung dient das nachfolgende Schema.



**Abbildung 8:** Schema einer Strom-Spannungs-Kurve mit dem zugehörigen Spannungs- und Verlustformen [28, Kap. 2.2, F. 4]

Eine Strom-Spannungs-Kurve dient als Charakterisierung und kann für jede Brennstoffzelle erfasst werden. Sie ist unter anderem abhängig von den Faktoren Temperatur, Druck sowie Befeuchtung.

### 3.1.4 Medienmanagement

Das Medienmanagement beschreibt die Regelung der Medienströme eines Polymer-elektrolytmembran-Brennstoffzellen-Systems. Dieses umfasst die Betriebsmedien Wasserstoff, Luft und Wasser, die für die elektrochemische Energiewandlung (siehe Kapitel 3.1.1) benötigt werden.

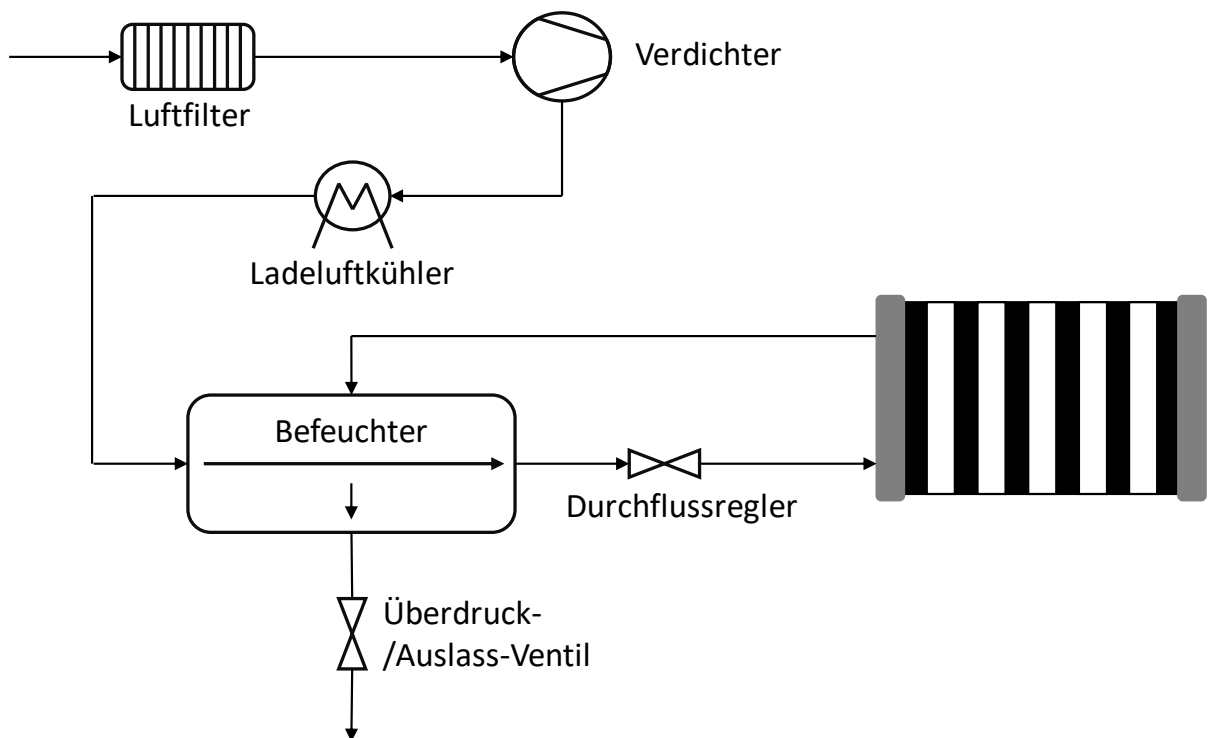
Insbesondere beim mobilen Einsatz einer PEM-Brennstoffzelle muss die bedarfsgerechte Versorgung mit den Betriebsmedien gewährleistet werden, da einerseits dynamischer Betrieb und andererseits Umgebungsbedingungen zu einem veränderten Bedarf an Betriebsmedien führen können. Aus diesem Grund hat das Medienmanagement die Aufgabe die optimale Versorgung der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle mit den Betriebsgasen sicherzustellen. [5] [16] [20] [29] [30]

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die jeweiligen Medienmanagement-Systeme sowie die zugehörigen Komponenten erläutert.

### Luftmanagement

Das Luftmanagement umfasst die Zu- und Abführung der Umgebungsluft im Brennstoffzellen-System. Es hat einerseits die Aufgabe Umgebungsluft zu konditionieren und zum Stack zu führen. Andererseits wird mit Hilfe des Luftmanagements überschüssige Luft sowie Produktwasser im Anschluss an die Reaktion abgeführt. [5] [31] [32] [33]

Die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle wird im Bereich des Luftmanagements durch die Parameter des Massenstroms, der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, des Luftdruckes sowie der Luftreinheit beeinflusst. Der schematische Aufbau ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 9:** Schematischer Aufbau der Luftzufuhr eines Brennstoffzellen-Stacks

Die Komponente des Luftfilters hat die Aufgabe die Umgebungsluft zu reinigen, um Partikel und Verunreinigungen im Brennstoffzellen-System zu vermeiden. Darüber hinaus ist er für die ortsunabhängige Betriebssicherheit des PEM-Brennstoffzellen-Stacks notwendig.

Im Anschluss folgt der Verdichter, der die Umgebungsluft auf ein gewünschtes Druckniveau mit entsprechendem Massenstrom verdichtet. Dieser wiederum muss elektrisch angetrieben werden, sodass sich ein Leistungsbedarf ergibt, der zusätzlich von der Brennstoffzelle erzeugt werden muss.

Mit Hilfe eines elektrisch angetriebenen Verdichters kann allerdings, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, eine Leistungssteigerung der Brennstoffzelle generiert werden. Jedoch sollte bei der Auslegung des Verdichters beachtet werden, dass die Leistungsaufnahme des Verdichters  $P_V$  die Leistungssteigerung der Brennstoffzelle  $\Delta P_{BZ}$  nicht überschreitet, um die Reduzierung des Systemwirkungsgrades zu vermeiden.

$$\Delta P_{BZ} > P_V \quad (7)$$

Zusätzlich zur Nutzung eines Verdichters besteht die Möglichkeit zwei Verdichter im Verbund zu verwenden, die für unterschiedliche Druckniveaus und Massenströme ausgelegt sind. Der Systemwirkungsgrad kann mit zwei Verdichtern erhöht werden, da beide jeweils im optimalen Betriebsbereich arbeiten.

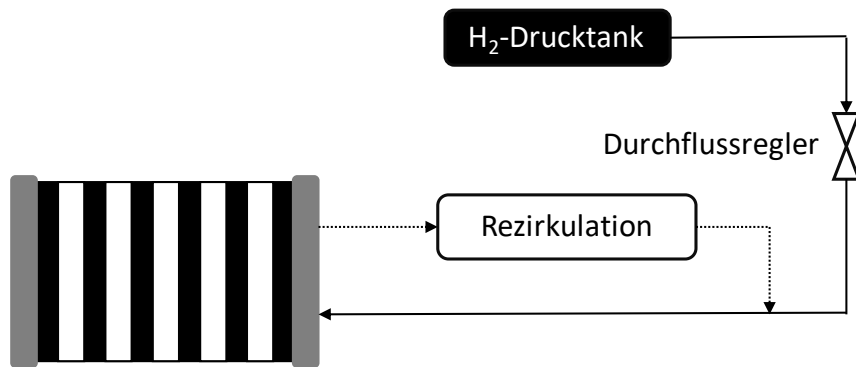
Die nächste Komponente in der Luftzuführung besteht aus dem Ladeluftkühler. Dieser hat die Aufgabe eine Temperierung des Luftstromes sicherzustellen und ist insbesondere im Anschluss an den elektrischen Verdichter erforderlich. Durch die Verdichtung steigt die Temperatur der Umgebungsluft, sodass eine Kühlung für die Gewährleistung einer konstanten Betriebstemperatur der PEM-Brennstoffzelle notwendig ist.

Die Regelung der Luftfeuchtigkeit kann kathodenseitig mit Hilfe eines Befeuchters realisiert werden. Daher wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels das Wassermanagement der PEM-Brennstoffzelle detailliert beschrieben.

Im Bereich der Prozessluftabfuhr sind die Komponenten des Druckbegrenzungsventils sowie des Abluftkondensators verbaut. Das Druckbegrenzungsventil hat die Aufgabe die Zelle vor Überdruck zu schützen. Der Abluftkondensator hingegen scheidet das kathodenseitig entstehende Produktwasser ab.

### Wasserstoffmanagement

Das Wasserstoffmanagement hat in einem Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen-System die Aufgabe den für die chemische Reaktion notwendigen Wasserstoff zuzuführen und überschüssiges Gas abzuführen. Der Aufbau des Wasserstoffmanagements ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen.



**Abbildung 10:** Schematischer Aufbau der Wasserstoffzufuhr und zugehöriger Rezirkulation

Im Bereich der Wasserstoffzuführung befindet sich zunächst der Hochdrucktank, der den Wasserstoff bei 350 oder 700 bar speichert. Dieser hat die Aufgabe das Betriebsgas sicher zu lagern. [5] [29] [34]

Im Anschluss folgt ein Durchflussregler, mit dem das stöchiometrische Verhältnis des Betriebsmediums geregelt wird.

Die Wasserstoffrückführung besteht aus dem Mengemesser sowie einem Überdruckventil. Mit diesen Komponenten kann der optimale Betrieb des PEM-Brennstoffzellen-Systems gewährleistet werden.

Zwischen der Zu- und Abführung kann eine sogenannte Rezirkulation eingesetzt werden. Diese wird insbesondere für die Befeuchtung des Wasserstoffs genutzt, indem unverbraucher befeuchteter Wasserstoff den frischen Wasserstoff anfeuchtet und somit den Wasserhaushalt innerhalb der Zelle beeinflusst. Das Wassermanagement der PEM-Brennstoffzelle wird im darauffolgenden Abschnitt beschrieben.

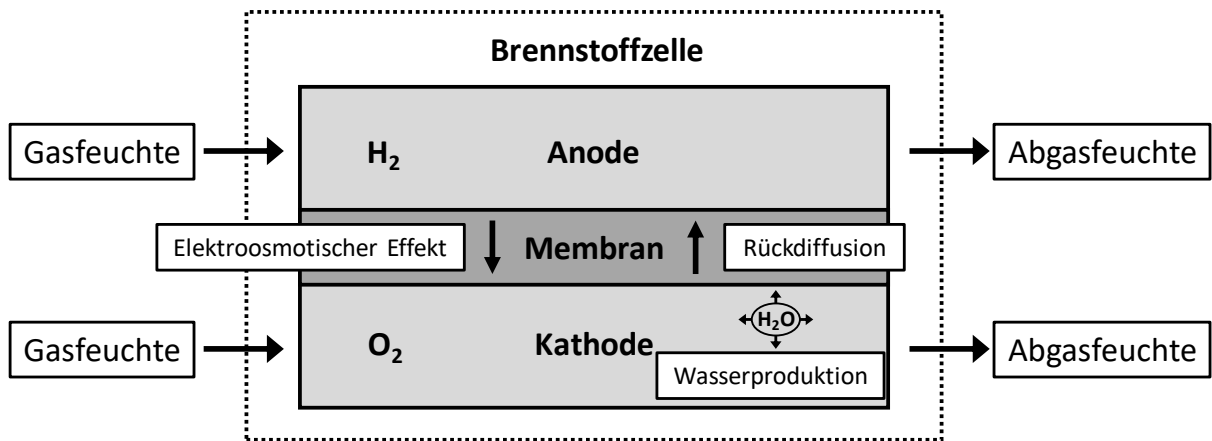
### Wassermanagement

Das Wassermanagement beschreibt die Regelung der Befeuchtung innerhalb einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle. Es hat einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und somit den Wirkungsgrad des Systems. Denn der in der Brennstoffzelle enthaltene Elektrolyt kann, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, den Protonenaustausch nur im befeuchteten Zustand gewährleisten. Daher muss die Befeuchtung der Membran auf einem vorgegebenen Niveau gehalten werden. Alternativ kann eine Unterversorgung die Reduzierung des Wasserstoffprotonenaustauschs aufgrund des steigenden Transportwiderstandes und letztendlich die Einstellung der elektrochemischen Reaktion zur Folge haben. Eine Überversorgung hingegen führt zu einer „Überflutung“ der Gaskanäle und reduziert somit die Zuführung der Betriebsmedien Wasserstoff sowie Luft. Der optimale Bereich der Befeuchtung ergibt sich aus der Anzahl der Sulfonsäuregruppen, die innerhalb der Membran angelagert sind. Der benötigte Wassergehalt wird entsprechend der Formel 8 bestimmt.

$$\zeta = \frac{n_{H_2O}}{n_{SO_3^-}} \quad (8)$$

Wobei  $\zeta$  den Wassergehalt mit Hilfe des Quotienten aus Anzahl an Wassermolekülen zu Anzahl an Sulfonsäuregruppen beschreibt. Die Wassermoleküle können sich vollständig an die angelagerten Sulfonsäuregruppen bei einem Wassergehalt von  $\zeta = 0$  bis 5 binden. Ein höherer Wassergehalt kann ein Aufquellen der Membran von bis zu 22 % zur Folge haben. Ab einem Wassergehalt von  $\zeta = 14$  ist die Membran gesättigt, sodass eine Kondensation des Wasserdampfs innerhalb der Zelle zu beobachten ist. Die Toleranz der Membran gegenüber Wasser besteht bis zu einem Wassergehalt von  $\zeta = 22$ . [5] [12]

Zusätzlich zum optimalen Wassergehalt müssen die Reaktions- und Transportmechanismen innerhalb der Brennstoffzelle beachtet werden. Diese sind auf der Kathoden- sowie Anodenseite unterschiedlich und schematisch in **Abbildung 11** dargestellt.



**Abbildung 11:** Wasserproduktion innerhalb der PEM-Brennstoffzelle

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Wasserproduktion kathodenseitig stattfindet. Des Weiteren ist zu erkennen, dass innerhalb der Membran insbesondere die Mechanismen Elektroosmose sowie Diffusion einen Einfluss auf die Befeuchtung der Brennstoffzelle haben. Eine Rückdiffusion des Produktwassers zur Anodenseite sollte daher begünstigt werden. Alternativ muss das Produktwasser abgeschieden werden. [13] [21] [34] [35]

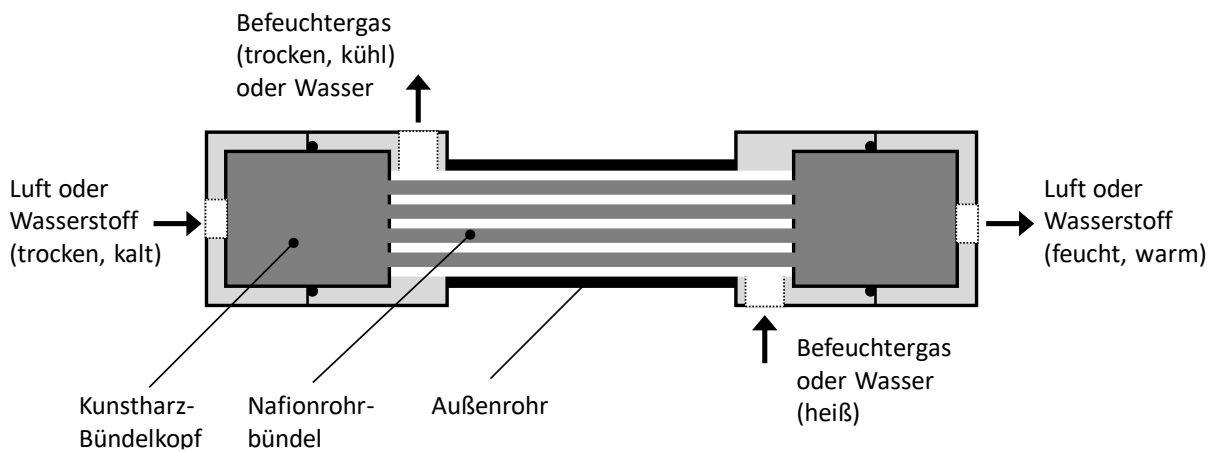
Die Beeinflussung des Wassergehaltes kann, je nach Auslegung kathoden- oder anodenseitig stattfinden. Im Bereich der Anode besteht beispielsweise die Möglichkeit unverbrauchten befeuchteten Wasserstoff einzusetzen, um somit den zugeführten Wasserstoff zu befeuchten. Darüber hinaus gibt es weitere Befeuchtungssysteme, die sich in aktive und passive Systeme unterteilen lassen und in der nachfolgenden Tabelle dargestellt sind.

**Tabelle 1:** Verschiedene Befeuchtungssysteme

Befeuchtungssysteme	
Aktiv	Airbleed
	Zerstäuber (auch passiv möglich)
Passiv	Membranbefeuchter
	Regenerator
	Strömungsumkehr

Bei der mobilen Anwendung eines PEM-Brennstoffzellensystems kommen hauptsächlich zwei Möglichkeiten der Befeuchtungsregulierung zum Einsatz. Zum einen die Nutzung eines Membranbefeuchters und zum anderen der Verzicht auf ein externes Befeuchtungssystem.

Der Membranbefeuchter stellt ein passives System dar, welches mit Hilfe einer Membran den Feuchtigkeits- und Wärmeaustausch von der Abluft in die Zuluft gewährleistet. Meist wird dieses Befeuchtungssystem auf der Kathodenseite extern im Anschluss an den Verdichter integriert.



**Abbildung 12:** Schema eines Membranbefeuchters

Membranbefeuchter weisen einen hohen Wirkungsgrad bei geringem Energiebedarf auf. Allerdings stellen die Faktoren Bauraum und Kosten einen Nachteil dar. Des Weiteren ist ein Membranbefeuchter aufgrund seiner passiven Wirkweise nicht regelbar.

Beim Verzicht auf ein externes Befeuchtungssystem wird stattdessen eine Rezirkulation des unverbrauchten Betriebsmediums durchgeführt. Dabei wird die Feuchtigkeitsregulierung über das unverbrauchte befeuchtete Betriebsmedium angestrebt. Insbesondere auf der Anodenseite kann ungenutzter befeuchteter Wasserstoff mittels einer Rezirkulation zum Feuchtigkeits- und Wärmeaustausch des einströmenden Wasserstoffs genutzt werden. [36] [37]

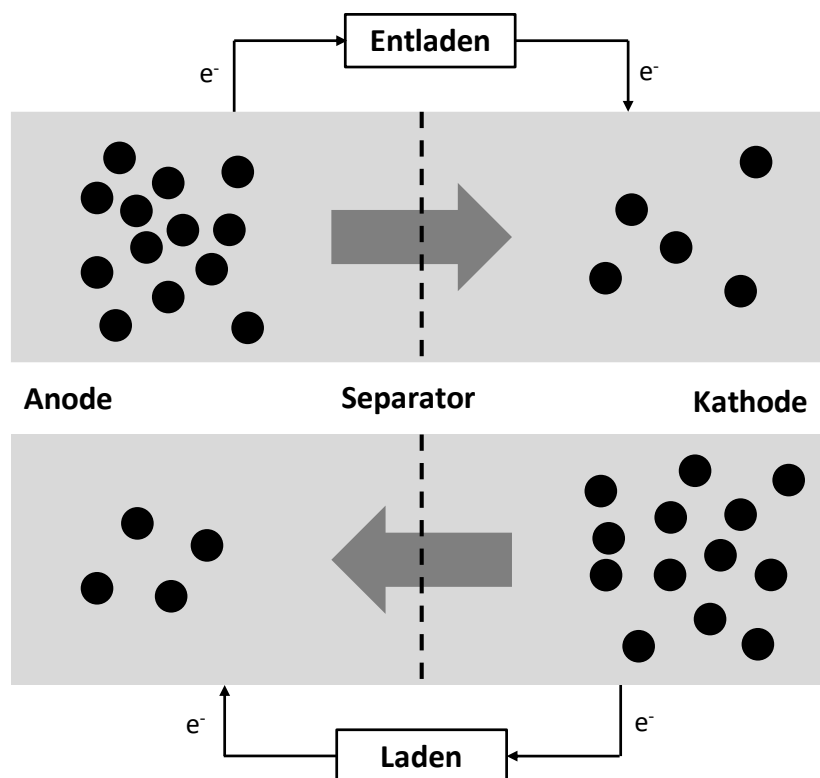


## 3.2 Energiespeicher

Im Bereich der Energiespeicher wurden zum einen die Lithium-Ionen-Zelle und zum anderen der Superkondensator untersucht. Der Einsatz einer Lithium-Ionen-Zelle stellt einen gängigen Energiespeicher innerhalb eines elektrifizierten oder elektrischen Antriebsstranges eines Fahrzeuges dar, da er eine hohe Leistungs- sowie Energiedichte bei vergleichsweise hohen Zellspannungen bereitstellt. Der Superkondensator hingegen weist aufgrund seiner enormen Stromtoleranz ein hohes Potential hinsichtlich der Effizienzsteigerung eines solchen Antriebsstranges auf. Beide Systeme werden daher im weiteren Verlauf des Kapitels erläutert.

### 3.2.1 Lithium-Ionen-Zelle

Die Lithium-Ionen-Zelle beschreibt einen Akkumulator, der ein Lithium-Metall-Oxid als Elektrodenmaterial enthält und dient als Oberbegriff für verschiedene Lithium-Verbindungen. Der prinzipielle Aufbau der Zelle ist in **Abbildung 13** zu sehen.



**Abbildung 13:** Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle

Der Akkumulator besteht aus zwei Elektroden, die mit Hilfe eines ionenleitfähigen Elektrolyts und eines Separators voneinander getrennt sind.

Die negativ geladene Elektrode (Anode) besteht meist aus Graphit, wohingegen die positiv geladene Elektrode (Kathode) aus einem Lithium-Metall-Oxid besteht. [11]

Die Funktionsweise eines Lithium-Ionen-Akkumulators beruht auf der Bewegung von ionisiertem Lithium, welches in Abhängigkeit der Nutzung von der Kathode zur Anode sowie entgegengesetzt verläuft.

Beim Entladen geben die Lithium-Atome an der Elektrode je ein Elektron ab, welches über einen externen Stromkreis zur Kathode gelangt. Dort werden die Elektronen durch stark ionisierte Übergangsmetall-Ionen aufgenommen. Die Lithium-Ionen gelangen hingegen durch den Separator zur positiven Elektrode.

Während des Ladevorganges gelangen die nicht-ionisierten Lithium-Atome von der Kathode zur Anode, an welcher sie zwischen den Graphit-Molekülen eingelagert werden.

Lithium-Ionen-Zellen sind, wie bereits beschrieben, aufgrund ihrer hohen Leistungs- sowie Energiedichte bei vergleichsweise hohen Zellspannungen optimal im elektrifizierten oder elektrischen Antriebsstrang eines Fahrzeuges geeignet. Bei der Nutzung müssen sie allerdings einige Sicherheitsaspekte, wie beispielsweise die Gewährleistung der elektrischen Sicherheit, aufweisen. [16] [17]

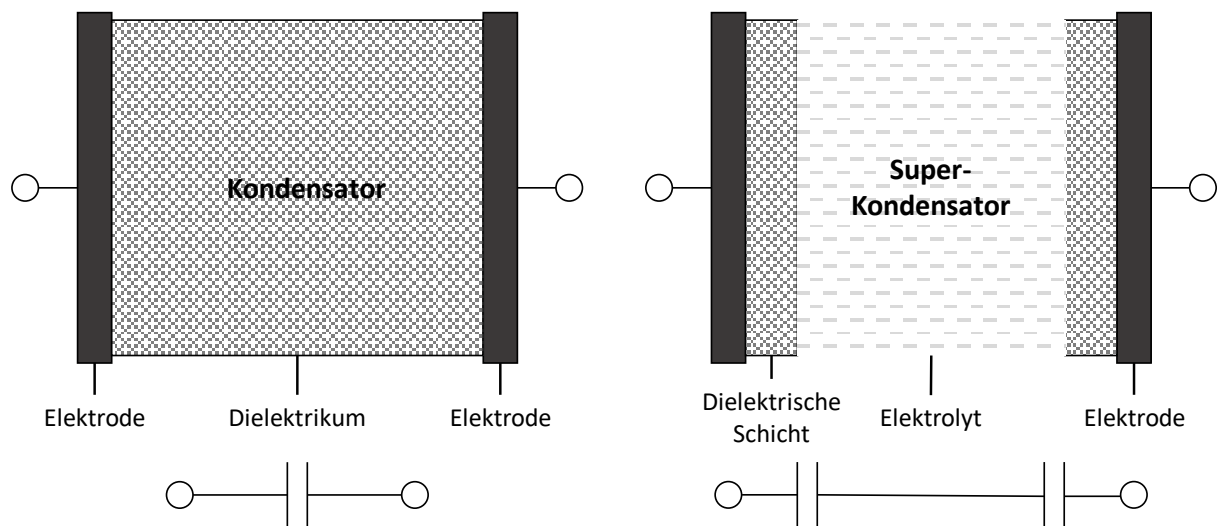
Zusätzlich zu dem verwendeten Elektrodenmaterial können Lithium-Ionen-Zellen in sogenannte Hochleistungs- und Hochenergiezellen eingeteilt werden. Hochenergiezellen sind durch hohe Energiedichten charakterisiert und eignen sich daher insbesondere für rein elektrische Fahrzeuge. Im Vergleich dazu haben Hochleistungszellen geringere Energiedichten, allerdings eine höhere Stromverträglichkeit. Diese wird in Form der C-Rate bemessen, die das Verhältnis von Lade- bzw. Entladestrom zur Batteriekapazität beschreibt und dem kapazitätsunabhängigen Vergleich von Akkumulatoren dient. Durch die Stromtoleranz sind Hochleistungszellen optimal für Hybridanwendungen eines Pkw geeignet, in denen die Batteriezelle beispielsweise hohe Ladeströme bei der Bremsenergie-rückgewinnung (Rekuperation) aufnehmen muss.

Lithium-Ionen-Akkumulatoren werden während des Einsatzes nach dem sogenannten CC-CV-Verfahren (constant current - constant voltage) geladen bzw. entladen. Dabei wird zunächst ein konstanter Strom bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung verwendet. Im Anschluss erfolgt die Ladung mit der konstanten Ladeschlussspannung bei zu reduzierendem Stromniveau. Die Ladeströme sowie -spannungen sind von der jeweiligen Zelle abhängig. Eine Begrenzung ist notwendig, da es alternativ zu irreparablen Schäden beim Überladen oder

Tiefenentladen kommen kann. Das Überladen der Batterie kann unter anderem zu einer exothermen Zersetzung der Elektroden oder des Elektrolyts führen. Eine Tiefentladung kann ebenso eine Schädigung der Elektroden oder eine Zersetzung des Elektrolyts zur Folge haben. Diese Schäden haben einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer der Zelle, weshalb das Einhalten der Lade- und Entladegrenzen von erheblicher Relevanz ist. [20] [22] [24] [38] [39]

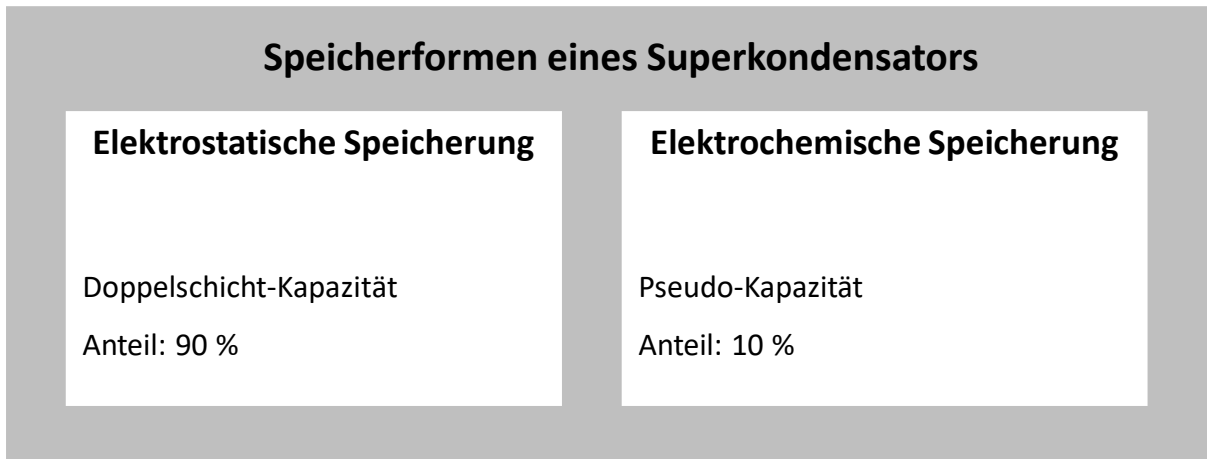
### 3.2.2 Superkondensator

Kondensatoren stellen passive elektrische Komponenten dar, die die Fähigkeit aufweisen elektrische Ladung innerhalb eines elektrischen Feldes zu speichern. Diese gespeicherte Ladung wird als Kapazität bezeichnet. Ein Kondensator besteht aus zwei Elektroden, die mit einem Dielektrikum, einem sogenannten „Nicht-Leiter“ (vgl. [20, S. 197]), voneinander getrennt sind. Ein Superkondensator beschreibt eine Unterform des Kondensators und wird aufgrund seiner Bauform auch als Doppelschicht-Kondensator bezeichnet. Der Unterschied zum Kondensator liegt in der Anordnung der Elektroden sowie in der Art des Dielektrikums. Der Superkondensator besteht aus zwei kohlenstoffbasierten Elektroden, einem Separator in Form einer dielektrischen Schicht sowie einem organischen Elektrolyten. In der nachfolgenden Abbildung ist dies schematisch dargestellt.



**Abbildung 14:** Schematischer Aufbau eines Kondensators sowie eines Superkondensators

Die Energie in einem Superkondensator wird nach zwei Prinzipien gespeichert: zum einen der elektrostatischen Speicherung in der Doppelschicht und zum anderen der elektrochemischen Speicherung in Form einer Pseudokapazität auf Basis einer Redoxreaktion.



**Abbildung 15:** Aufteilung der Kapazität eines Superkondensators

#### Elektrostatische Speicherung:

Während des Ladevorganges werden im Elektrolyten vorhandene positiv sowie negativ geladene Ionen durch die jeweils positiv oder negativ geladene Elektrode angezogen und ausgerichtet. Dadurch bildet sich an jeder Elektrode ein Kondensator, welcher in einer Reihenschaltung die Gesamtkapazität des Superkondensators bestimmt. Im geladenen Zustand liegt eine minimale Entropie, sprich eine maximale Ordnung, vor. Bei der Entladung wird diese Ordnung entsprechend wieder aufgehoben.

#### Elektrochemische Speicherung:

Neutrale Moleküle des Elektrolyts, wie beispielsweise Wasserdipole, können durch die sogenannten Van der Waals-Kräfte von der Elektrode adsorbiert werden. Diese Kräfte wirken zwischen Molekülen und halten diese in Flüssigkeiten oder Feststoffen aneinander. Während des Adsorptionsprozesses kann es zu einer anschließenden Redoxreaktion kommen, welcher ebenfalls für die Kapazität des Superkondensators verantwortlich ist.

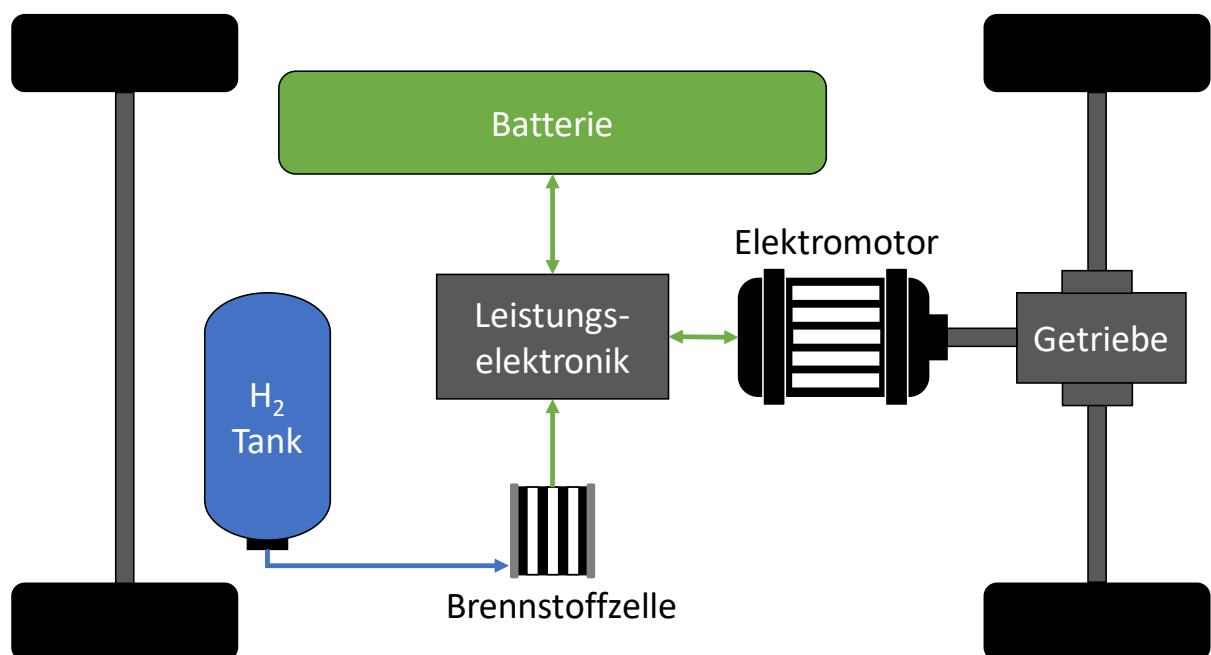
Durch die dünne Doppelschicht können im Vergleich zu Kondensatoren hohe Gesamtkapazitäten erreicht werden. Darüber hinaus besteht bei der Auswahl des Elektrodenmaterials ein Entwicklungsziel in der Gewährleistung einer möglichst großen Fläche, um die Kapazität zu erhöhen.

Mit Hilfe von Superkondensatoren können sehr hohe Lade- und Entladeströme realisiert werden. Eine langfristige Energiespeicherung ist mit ihnen allerdings nicht möglich. Im Vergleich zu Akkumulatoren unterliegen Superkondensatoren kaum der zyklusbedingten Alterung und sind aufgrund dessen für hohe Belastungen sowie eine hohe Zyklenzahl

prädestiniert. Eine Anwendung im hybriden Antriebsstrang bietet sich daher an. [16] [17] [20] [39] [40] [41]

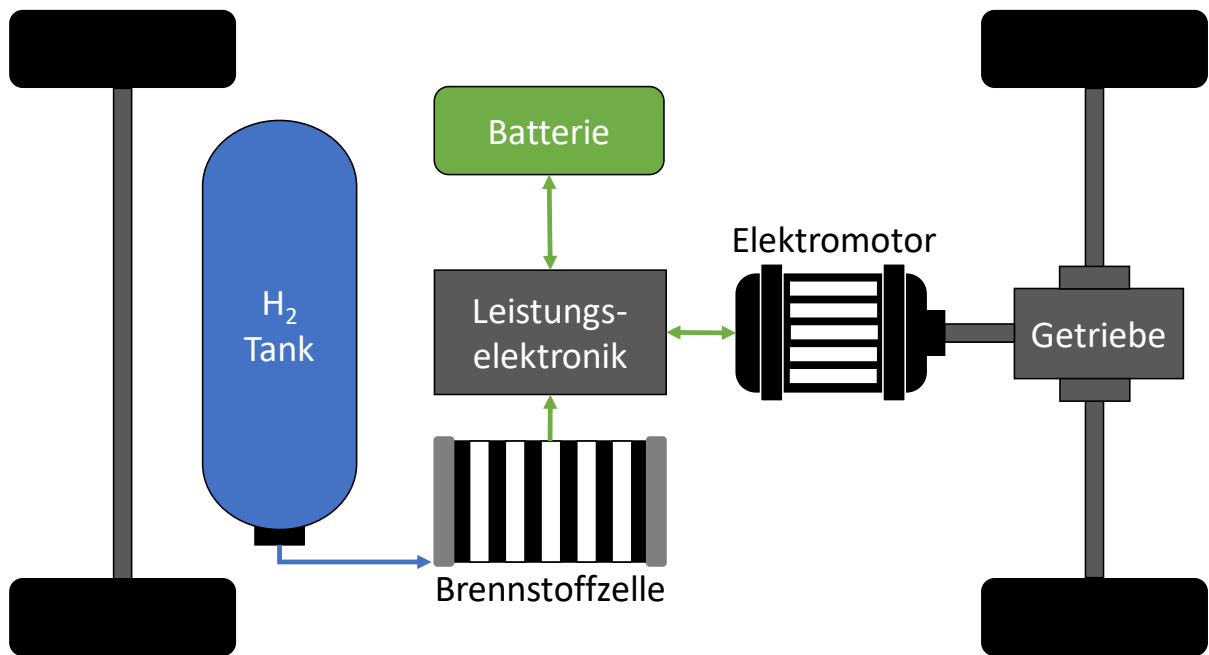
### 3.3 Anwendung im Fahrzeug

Im Rahmen der Anwendung im Fahrzeug wird die PEM-Brennstoffzelle in einen elektrischen Antriebsstrang integriert. Dieser Antriebsstrang besteht neben dem Energiewandler (Brennstoffzelle) aus den Komponenten Wasserstofftank, Energiespeicher, mehreren Spannungswandlern, Leistungselektronik, Elektromotor, Getriebe und dem mechanischen Antrieb der Räder. Bei der Integration einer Brennstoffzelle in einen elektrischen Antriebsstrang gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Die Brennstoffzelle kann entweder als Range Extender oder als Hauptantrieb genutzt werden. Beide Konzepte sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.



**Abbildung 16:** Brennstoffzelle als Range-Extender im Fahrzeug (vgl. [19, S. 178])

Bei dem Konzept des Range Extenders wird die Brennstoffzelle dafür genutzt einen verhältnismäßig großen Energiespeicher zu laden, welcher den Elektromotor mit Energie versorgt.



**Abbildung 17:** Brennstoffzelle als Hauptantrieb im Fahrzeug (vgl. [19, S. 178])

Hingegen wird beim Hauptantrieb die Brennstoffzelle größtenteils zur Erfüllung der Fahraufgabe verwendet. Der Energiespeicher hat lediglich die Aufgabe die Lastspitzen, in Form von Abbremsen und Beschleunigen, auszugleichen und zu rekuperieren.

Der Fokus dieser Arbeit liegt bei der Betrachtung des dominanten Brennstoffzellen-Antriebs. Jedoch kann mit Anpassungen des Simulationsmodells ebenfalls das Range Extender Konzept analysiert werden. [42] [5] [16] [24] [39] [26] [43] [44]

---

## 4 Modellierung

Das nachfolgende Kapitel umfasst die Vorstellung des generierten Simulationsmodells, indem zunächst die verschiedenen Ebenen des Brennstoffzellenfahrzeuges, deren Modellierung und die jeweiligen Übergabeparameter aufgeführt werden. Des Weiteren wird die Validierung des Systemverhaltens der Brennstoffzelle thematisiert. Darauf aufbauend wird die Umsetzung in der Simulationsumgebung *Matlab / Simulink* sowie die implementierte Betriebsstrategie dargestellt.

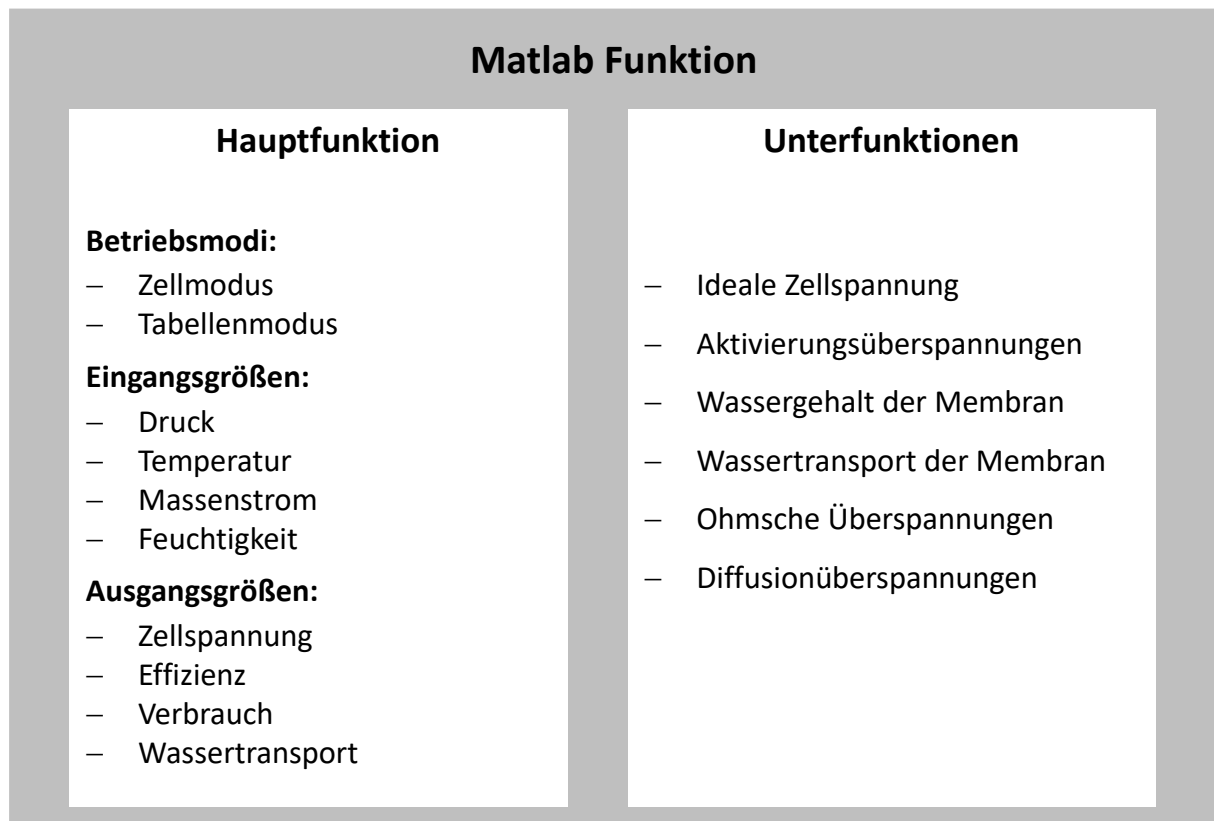
### 4.1 Ebenen-basierte Modellierung

Für die ganzheitliche Betrachtung wurde das Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) in drei Ebenen hinsichtlich des Detaillierungsgrades und Funktionsumfangs gegliedert. Zu diesen gehören die Zell-Ebene, die die elektrochemischen und physikalischen Wirkzusammenhänge innerhalb der Brennstoffzelle beschreibt, die Stack-Ebene, welche das Medienmanagement des Brennstoffzellen-Stacks abbildet, sowie das Gesamtfahrzeug, welches den elektrischen Antriebsstrang und dessen Komponenten fokussiert.

Mit Hilfe dieser Ebenen konnte zunächst eine Analyse der jeweiligen Subsysteme erfolgen. Im Rahmen dieser Analyse wurden die Übergabeparameter detektiert, die für die Auslegung des Gesamtfahrzeuges von Relevanz sind.

#### 4.1.1 Ebene 1: Zelle

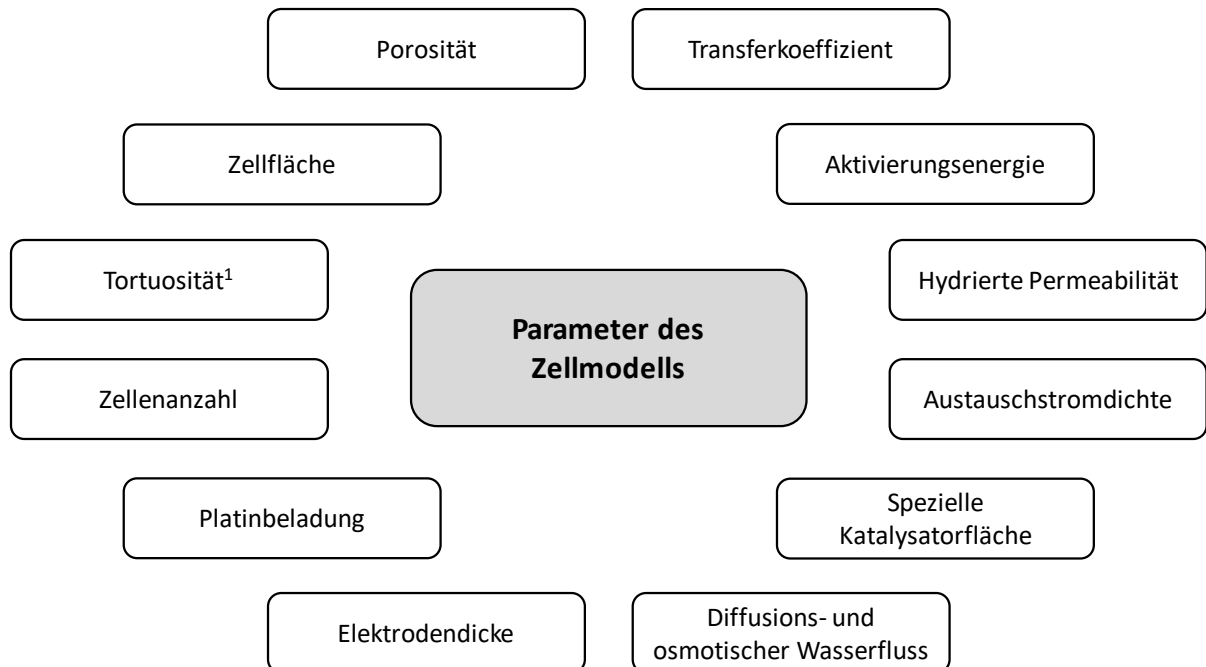
In der Ebene 1 wurde ein Modell untersucht, welches die elektrochemischen und physikalischen Prozesse innerhalb des Energiewandlers sowohl mathematisch als auch tabellarisch berechnet. Dieses *Matlab* Modell enthält eine Funktion, die auf Basis der notwendigen Gleichungen die Effizienz der Zelle und den Wasserstoff-Verbrauch bestimmt. Auch wird der Wassergehalt und -transport sowie die Zellspannung und zugehörige Strom-Spannungs-Kurve berechnet. Mit Hilfe des Zell-Modells wird das Verhalten der Brennstoffzelle physikalisch und elektrochemisch abgebildet. Die Ein- und Ausgangsgrößen sowie Unterfunktionen des Modells sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 18:** Schematischer Aufbau des Zell-Modells



Neben den Eingangsgrößen, die in **Abbildung 18** zu sehen sind, werden einige konstante Parameter der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle benötigt. Diese sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt (u.a. Tortuosität<sup>1</sup>).



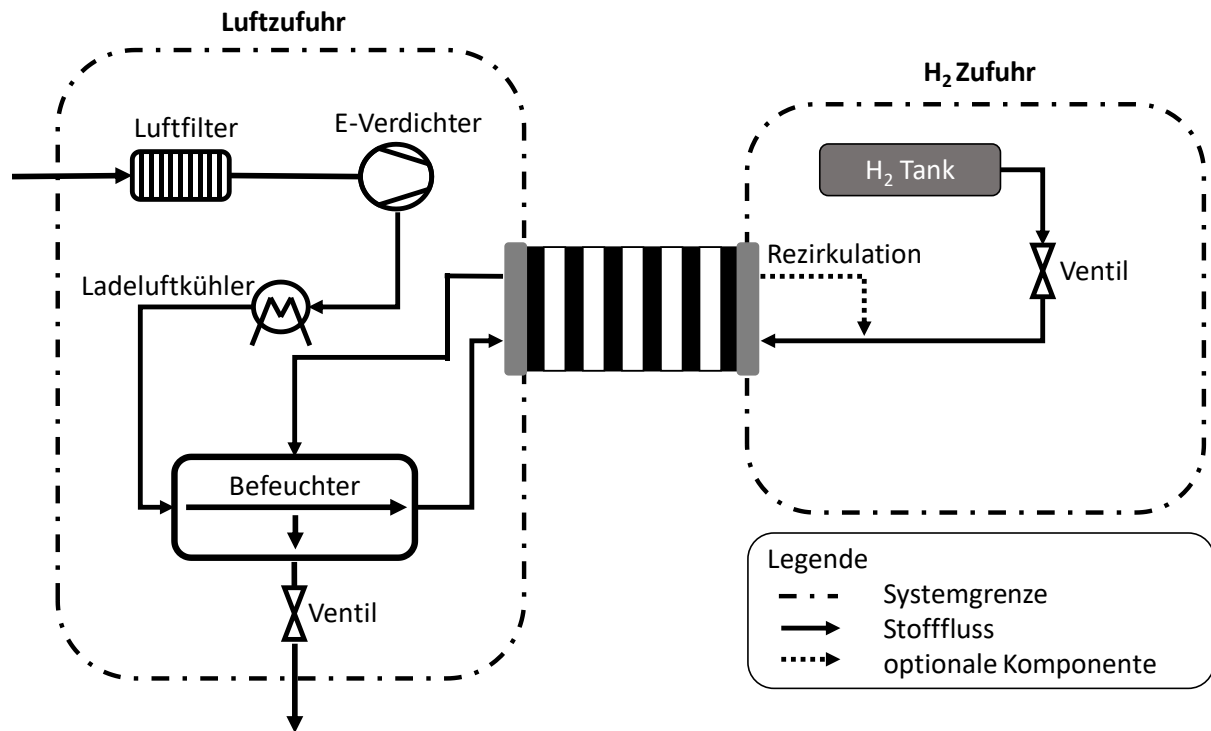
**Abbildung 19:** Parameter des Zell-Modells

Das *Matlab* Modell kann für verschiedene Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen angepasst werden und dient somit der realitätsnahen Abbildung des Systemverhaltens einer spezifischen Brennstoffzelle. Insbesondere für die Betrachtung des Medienmanagements in Ebene 2 ist es von Relevanz, um unter anderem die benötigten Massenströme an Wasserstoff und Umgebungsluft bestimmen zu können. [45] [46]

#### 4.1.2 Ebene 2: Stack

Die Ebene 2 umfasst das Medienmanagement des Brennstoffzellen-Stacks, zu dem das Luft-, Wasserstoff- sowie Befeuchtungsmanagement gehören. Es wurden die Zuführung des Wasserstoffes und der Luft simulativ abgebildet und untersucht. In **Abbildung 20** sind die jeweiligen Komponenten schematisch dargestellt.

<sup>1</sup> Tortuosität - beschreibt die Gewundenheit der Transportwege von porösem Material. Sie kann mit Hilfe der Porenrichtung und der Transportrichtung eines porösen Materials bestimmt werden.



**Abbildung 20:** Schematischer Aufbau des Stacks mit zugehöriger Medien-Zufuhr

Im Bereich des Luftmanagements wurde zunächst ein elektrisch angetriebener Verdichter implementiert. Dieser kann in zwei Betriebsmodi simulativ abgebildet werden: zum einen in dem Tabellenmodus, in dem ein Kennfeld eines realen Verdichters hinterlegt ist, und zum anderen in der mathematischen Abbildung der technisch-physikalischen Funktionsweise eines Radialturboverdichters. Darauf aufbauend wurde die Luftzufuhr vervollständigt, die darüber hinaus einen Luftfilter, einen Ladeluftkühler sowie einen Befeuchter enthält.

Des Weiteren wurde die Wasserstoffzufuhr als Simulationsmodell abgebildet. Dieses Modell enthält neben der Komponente des Drucktanks, eine entsprechende Druckregelung sowie die Wasserstoffrezirkulation. Die Rezirkulation wurde als Rezirkulationsgebläse mit Wasserabscheider realisiert.

Das Ziel der Stack-Ebene besteht insbesondere in der Analyse des Energiemanagements der Medienzufuhr, da das Luftmanagement aufgrund des elektrisch angetriebenen Verdichters einen hohen Leistungsbedarf aufweisen kann. Es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, inwiefern die Effizienz des Brennstoffzellen-Stacks unter Berücksichtigung dieser Leistungsaufnahme beeinflusst wird. Darüber hinaus ist es für die Auslegung des elektrischen Antriebsstranges, vor allem in Bezug auf die Kapazität der Energiespeicher, notwendig, diesen zusätzlichen Leistungsbedarf zu betrachten. [5] [16] [18] [35]

### 4.1.3 Ebene 3: Gesamtfahrzeug

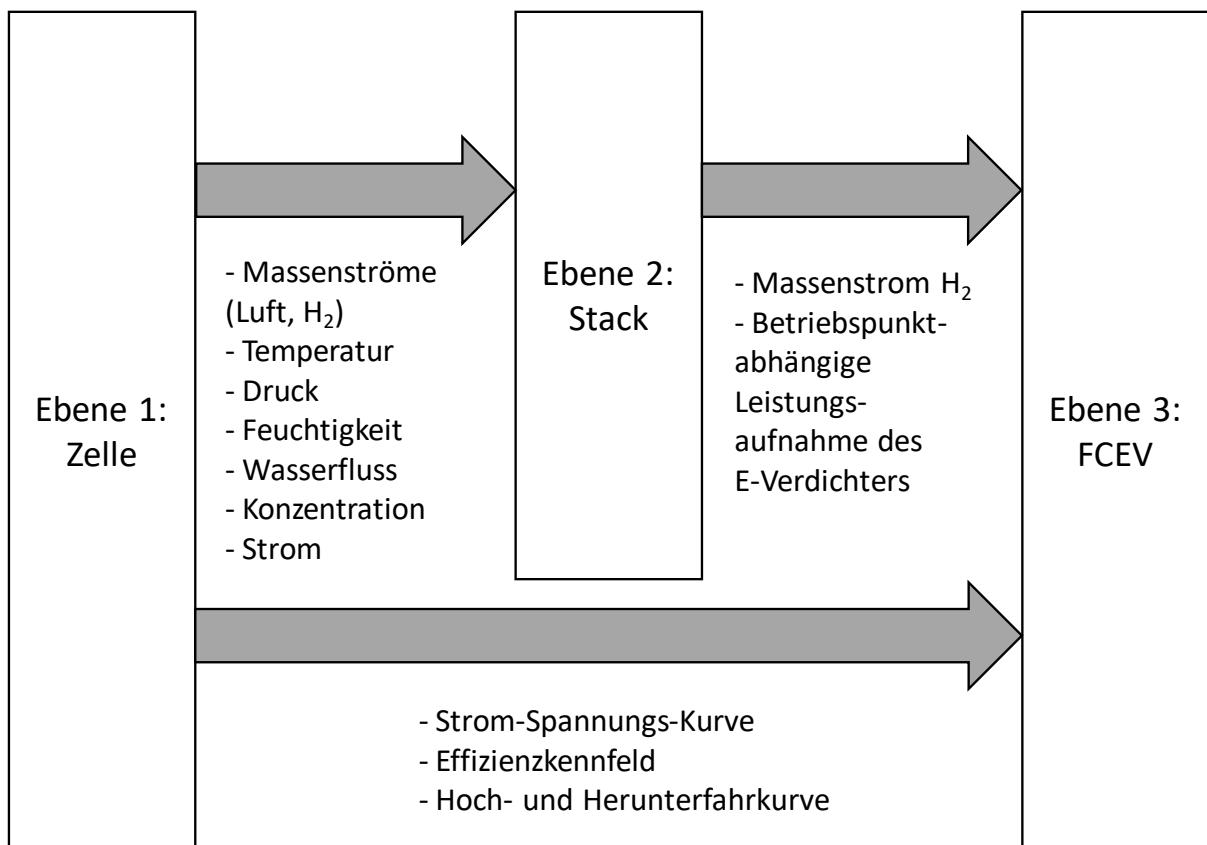
In der Ebene 3 liegt der Fokus auf dem Gesamtfahrzeug und dem elektrischen Antriebsstrang. Es wurde ein FCEV auf Basis des Referenzfahrzeuges Mercedes Benz GLC F-Cell abgebildet. Entsprechend des Referenzfahrzeuges wurden die Parameter der Karosserie der Fahrzeugklasse J (SUV), dem Elektromotor, der Brennstoffzellen-Leistung sowie Batteriekapazität angepasst. Des Weiteren wurde ein Superkondensator als zusätzlicher Energiespeicher im Simulationsmodell integriert. Das entwickelte Simulationsmodell ist der Hauptbestandteil der vorliegenden Dissertation und wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels näher beschrieben. [43] [47]

### 4.1.4 Übergabeparameter

Die drei Ebenen des FCEV bestimmen jeweils eine Vielzahl an Parametern, die für verschiedene Betriebszustände oder Auslegungspunkte einzuhalten sind. Jedoch besteht das Ziel der vorliegenden Arbeit in der Entwicklung eines Simulationsmodells mit dem Ziel der optimalen Auslegung eines Gesamtfahrzeuges mit einer Brennstoffzelle in Hinblick auf das Energiemanagement. Aus diesem Grund sind die für das Gesamtfahrzeug und dessen Auslegung relevanten Weitergabe-Parameter eruiert worden, um eine Rechenzeitoptimierung durchzuführen. Durch den Abgleich der Übergabeparameter als erforderliche Ein- bzw. Ausgabebedingungen kann somit die zu Grunde liegende Dimensionierung der einzelnen Komponenten geprüft werden.

Im Rahmen der Betrachtung der Zell-Ebene wurden die für die Ebene 2 und 3 erforderlichen Übergabeparameter detektiert. Insbesondere in Hinblick auf das Gesamtfahrzeug hat sich herausgestellt, dass von der Ebene 1 das Systemverhalten sowie die Strom-Spannungs-Kurve für die Auslegung des elektrischen Antriebsstranges relevant sind.

Bei der Analyse des Medienmanagements hat sich gezeigt, dass ausschließlich der elektrische Verdichter einen enormen Einfluss auf das Energiemanagement des Gesamtfahrzeuges hat. Aus diesem Grund wurden für die Betriebspunkte der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle Kennfelder zur Ermittlung der Leistungsaufnahme generiert.



**Abbildung 21:** Übergabeparameter zwischen den Ebenen des FCEV

## 4.2 Validierung

Im Rahmen der Entwicklung des Simulationsmodells wurde eine Validierung des Systemverhaltens der Brennstoffzelle durchgeführt. Für die Validierung wurden Messdaten eines Brennstoffzellen-Stacks von einem externen Partner zur Verfügung gestellt. Auf Basis dieser Erprobung konnte die Betriebsführung der Brennstoffzelle maßgeblich optimiert werden.

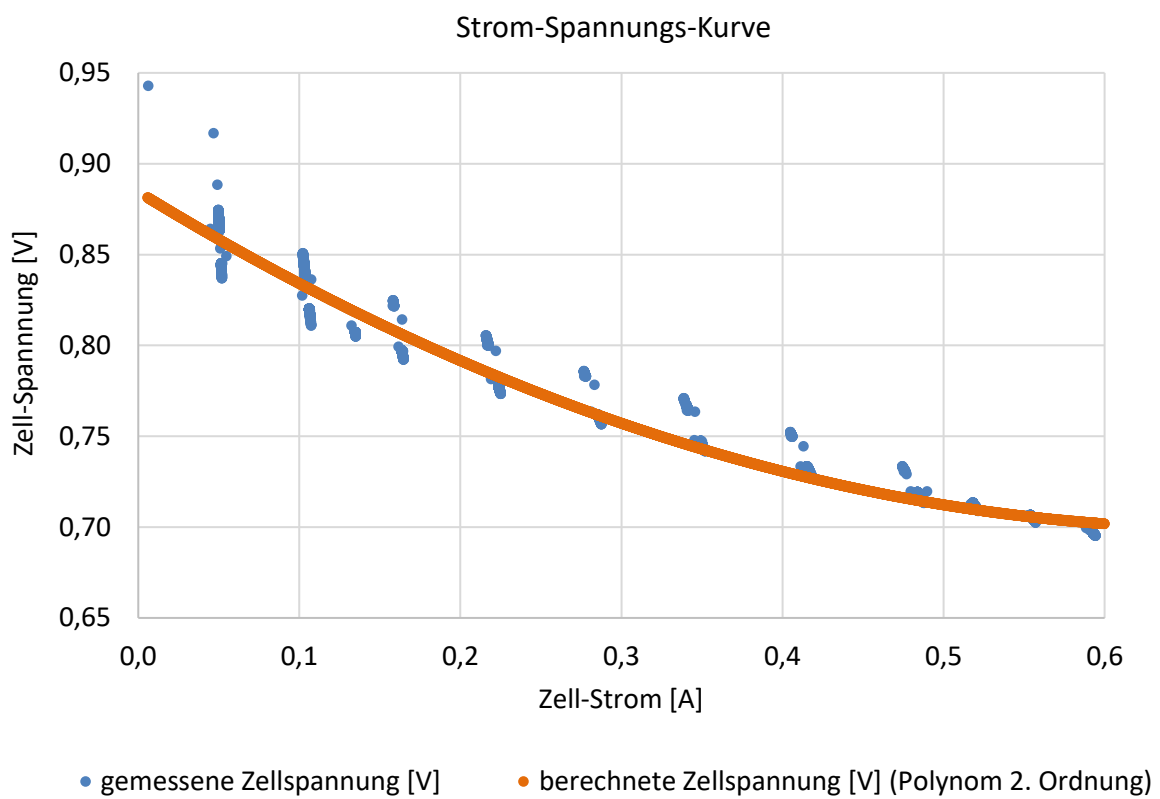
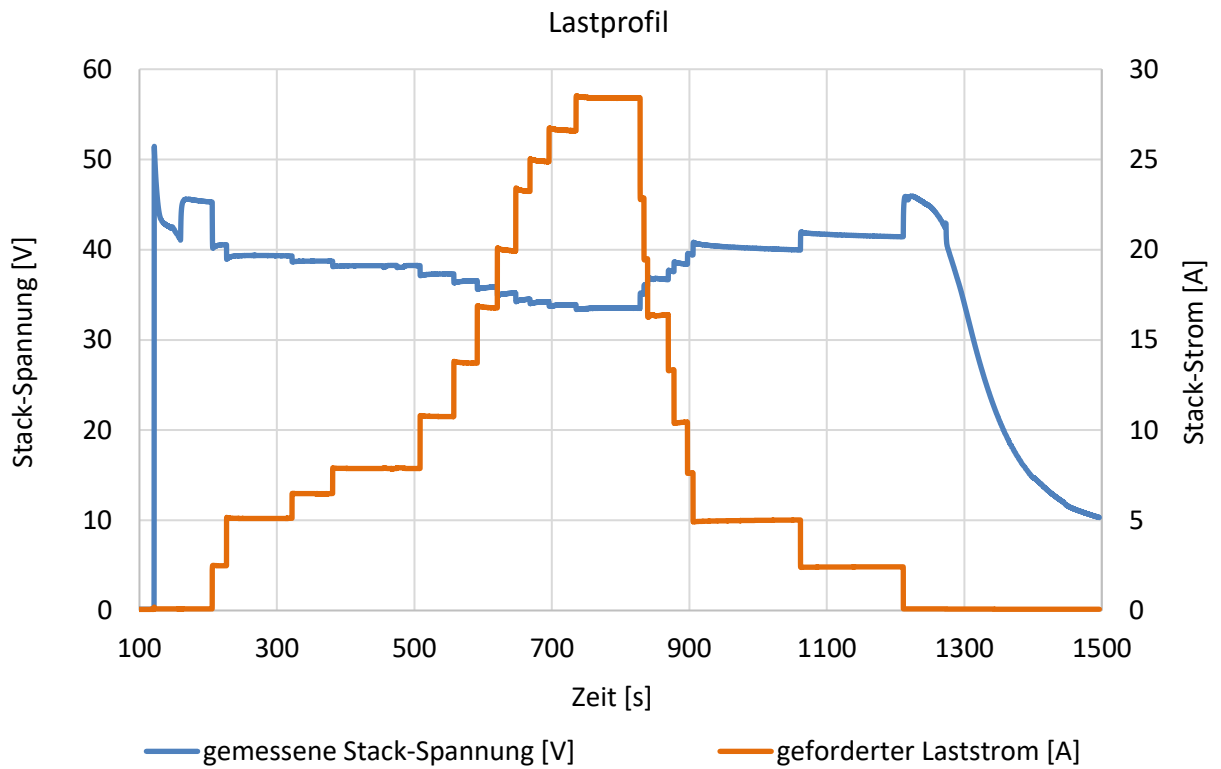
Für die Validierung wurde ein Test-Brennstoffzellen-Stack mit einer Zellenanzahl von 48 und einer maximalen Leistung von 1 kW untersucht. Dafür wurde zunächst eine Messreihe in Form eines treppenförmigen Anstiegs der Lastanforderung vorgegeben. Des Weiteren wurde das Hoch- sowie Herunterfahren des Brennstoffzellen-Stacks erfasst.

Mit den generierten Messdaten konnte das Verhalten der Brennstoffzelle und der einzelnen Zellen bestimmt werden. Es wurden die folgenden Kenndaten untersucht:

- Strom
- Spannung
- Befeuchtung
- Spülvorgänge
- Eingangsdruck Anode
- Ausgangsdruck Anode
- Eingangsdruck Kathode
- Ausgangsdruck Kathode
- Temperatur und zugehöriger Verlauf

Für die Bestimmung der Stromspannungskurve und der Hochlauf- sowie Abschaltkurve wurden die Messwerte der gemessenen Ströme und Spannungen der einzelnen Zellen zu Mittelwerten zusammengefasst. Der Median wurde mit den Messwerten der Zellspannungen des Test-Stacks abgeglichen und spiegelt das Verhalten des Gesamtsystems wider. **Abbildung 22** stellt die Messreihe mit der treppenförmigen Lastanforderung dar. Die aus dem Strombedarf resultierenden Zellspannungen der einzelnen 48 Zellen sind im unteren Diagramm zusammen mit der interpolierten Strom-Spannungskurve aufgeführt. Diese kann durch folgendes Polynom 2. Ordnung angenähert werden:

$$U_{Zelle} = 0,4002 \frac{V}{A^2} \cdot I_{Last}^2 - 0,5448 \frac{V}{A} \cdot I_{Last} + 0,8845 V \quad (9)$$



**Abbildung 22:** Messreihe mit treppenförmiger Last sowie daraus ermittelte Strom-Spannungs-Kurve

Bei der Ermittlung der Strom-Spannungs-Kurve hat sich eine starke Begrenzung der minimalen Zell-Spannung ergeben. Es ist ersichtlich, dass sich die Zellspannung des realen Brennstoffzellensystem in einem Bereich von 0,7 – 0,86 V befindet. Hingegen wird eine höhere Variabilität im Bereich des Zellstroms erreicht, der einen Wert von 0,047 – 0,633 A annehmen kann. Im Rahmen der Anpassung des Systemverhaltens der Brennstoffzelle innerhalb des Gesamtfahrzeugmodells wurden diese Grenzwerte der Zellspannung implementiert.

In Form einer explorativen Datenanalyse wurde ein Polynom 3. Ordnung zur Abbildung der Abschaltkurve des Brennstoffzellen-Stacks gewählt.

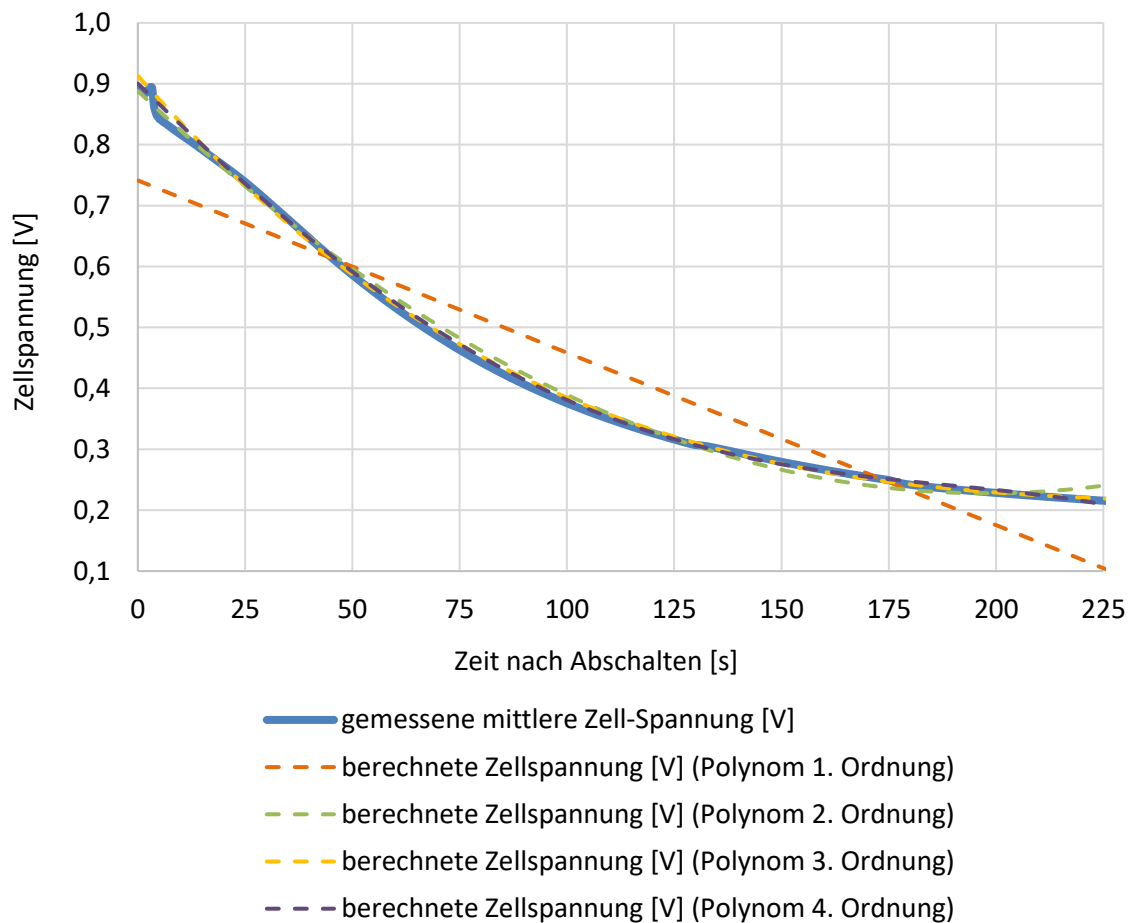
$$\Delta U(t)_{\text{Abschalten}} = -3,3208 \frac{V}{s^3} \cdot 10^{-8} \cdot t^3 + 3,0605 \frac{V}{s^2} \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 8,6 \frac{V}{s} \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,9236 V \quad (10)$$

Im Zuge der Untersuchung hat sich gezeigt, dass das Abschalten des Brennstoffzellen-Stacks zu schädigenden Betriebszuständen führen kann. Diese resultieren unter anderem aus der benötigten Befeuchtung der Polymerelektrolytmembran, weshalb das Spülen der Brennstoffzelle vor dem Abschalten notwendig ist. Mit Hilfe des Spülvorganges wird das Produktwasser innerhalb des Systems ausgeschieden, sodass es zu keinen „Überflutungen“ der Gaskanäle oder einem Einfrieren der Membran kommen kann. Diese Betriebszustände würden eine Reduzierung der Lebensdauer der PEM-Brennstoffzelle zur Folge haben. Des Weiteren ist es im Prozess des Abschaltens und somit des Spülens der Zelle nicht möglich, bei Bedarf der Fahraufgabe dynamisch zu folgen. Es wurde eine entsprechende Anpassung und somit Optimierung der Betriebsstrategie hinsichtlich des realen Systemverhaltens einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle durchgeführt.

Im Rahmen der Untersuchung des Hochfahrverhaltens der Brennstoffzelle kann festgehalten werden, dass dieses ebenso mit dem in **Formel 10** beschriebenen Polynom beschrieben werden kann. Jedoch hat sich gezeigt, dass das Hochfahren des Stack in einem deutlich kürzeren Zeitfenster stattfindet. [48]

$$\Delta U(t)_{\text{Hochfahren}} = -\frac{1}{5} \cdot U(t)_{\text{Abschalten}} \quad (11)$$

Die Annäherung des ermittelten Abschaltverhaltens der Brennstoffzelle über Polynome ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen.



**Abbildung 23:** Abschaltverhalten eines realen Brennstoffzellenstacks

### 4.3 Betriebsstrategie

Die Koordination der Komponenten des Antriebsstranges erfolgt mit Hilfe einer Betriebsstrategie, die innerhalb eines Steuergerätes implementiert ist. Die primäre Aufgabe dieses Steuergerätes besteht darin die Fahraufgabe bzw. den Fahrerwunsch umzusetzen, die Leistungsflüsse der einzelnen Komponenten zu regeln und die Vorgaben in Form von Sollwerten an die Komponentensteuerungen weiterzugeben. Eine Besonderheit bei dem Antriebsstrang eines Brennstoffzellenfahrzeuges besteht darin, dass die Sollmomente und -leistungen zur Erfüllung der Fahraufgabe von mehreren Komponenten des Antriebsstranges umgesetzt werden können. Es erfolgt somit eine Entkopplung zwischen eben diesen Komponenten und der Fahraufgabe.



Bei der Umsetzung einer Betriebsstrategie ist es erforderlich, die Randbedingungen der Komponenten des Antriebsstranges zu berücksichtigen. Die jeweiligen Systemgrenzen und Zustände, wie beispielsweise der Ladezustand des Energiespeichers, resultieren oft in gegensätzlichen Vorgaben. Aus diesem Grund muss eine Priorisierung innerhalb der Strategie erfolgen.

Betriebsstrategien können zunächst in sogenannte „kausale“ und „nicht kausale“ Strategien unterteilt werden. Bei der „nicht kausalen“ Strategie muss das Fahrprofil bekannt sein. Mit Hilfe dieser Kenntnis kann unter Einsatz verschiedener Optimierungsverfahren die optimale Lösung bestimmt werden. In der Regel findet diese Form der Betriebsstrategie jedoch keine Anwendung, da das exakte Fahrprofil nur in Ausnahmefällen bekannt ist.

Die „kausale“ Betriebsstrategie basiert hingegen auf aktuell verfügbaren Fahrzeugdaten als Eingangsgrößen. Dieses Konzept findet in der Praxis ihre Anwendung, da eine Prädiktion der Fahraufgabe und des Verkehrs nicht möglich ist. [17] [22] [39]

Die Betriebsstrategie des generierten Gesamtfahrzeugmodells wurde als „kausale“ Strategie entwickelt und implementiert. Zudem wurde eine Zielfunktion integriert, die unter anderem Strafterme für die nicht eingehaltene Beschleunigungsvorgabe erfasst.

Für die Anwendung der Betriebsstrategie werden die Energieflüsse der Komponenten des Antriebsstranges auf einer Gleichstromsammelschiene, siehe **Abbildung 24**, zusammengefasst. Der dazugehörige Datenbus hat die Aufgabe die Zustände der Brennstoffzelle, der Energiespeicher, des Elektromotors und der Nebenaggregate zu erfassen. Diese Komponenten sind in die jeweils möglichen Betriebszustände unterteilt. Die Brennstoffzelle kann in dem Simulationsmodell ausschließlich Leistung abgeben und die Zustände des statischen und dynamischen Betriebs annehmen. Die Energiespeicher Batterie und Superkondensator hingegen können sowohl Energie abgeben als auch aufnehmen. Darüber hinaus können sie sowohl kontinuierlich als auch im kurzzeitigen Spitzen-Modus betrieben werden. Mit Hilfe des Elektromotors kann gefahren und rekuperiert werden, sodass die Möglichkeit besteht Bremsenergie zurückzugewinnen. Des Weiteren sind Nebenaggregate vorgesehen, die ausschließlich Leistung benötigen.

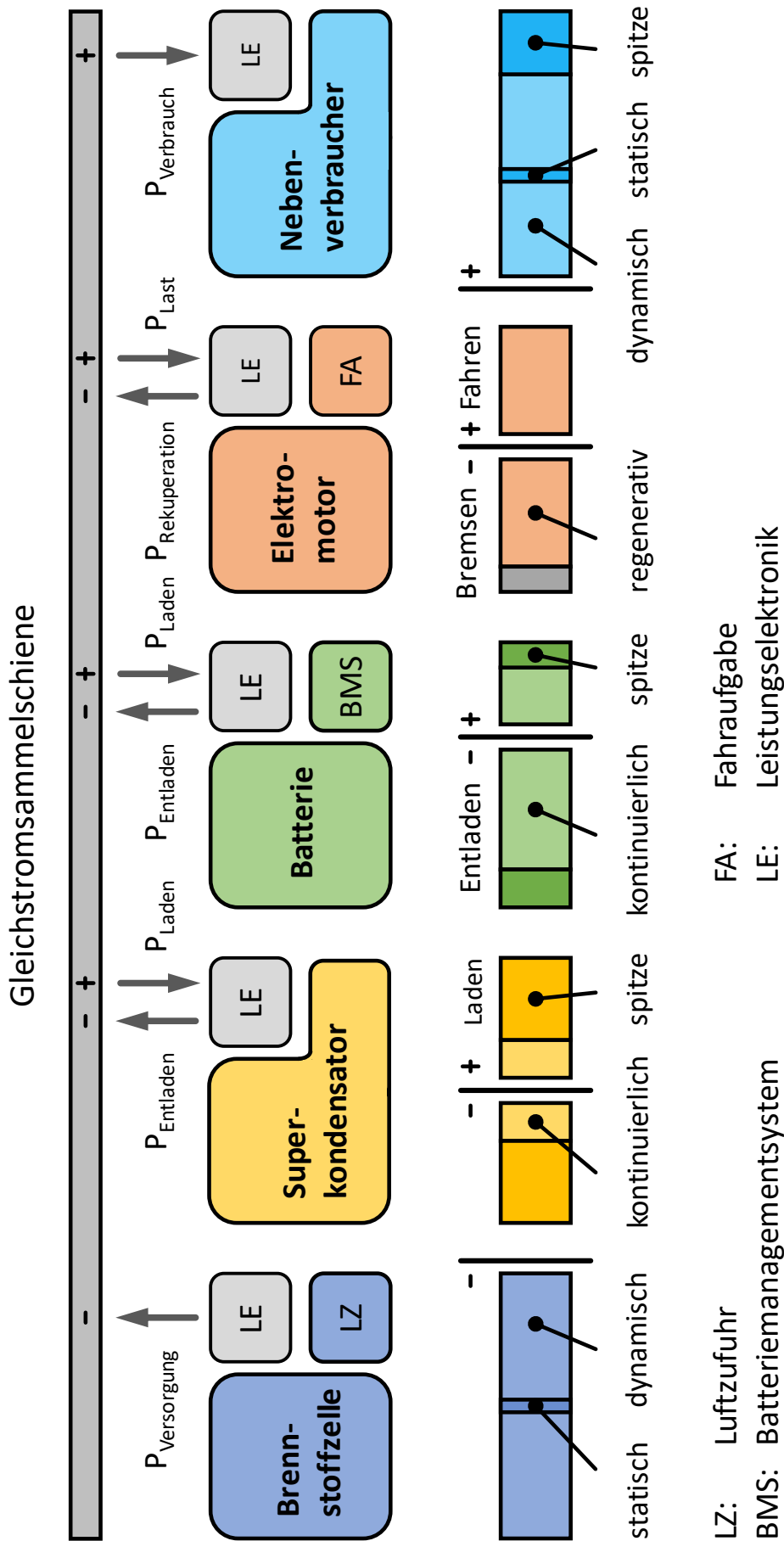
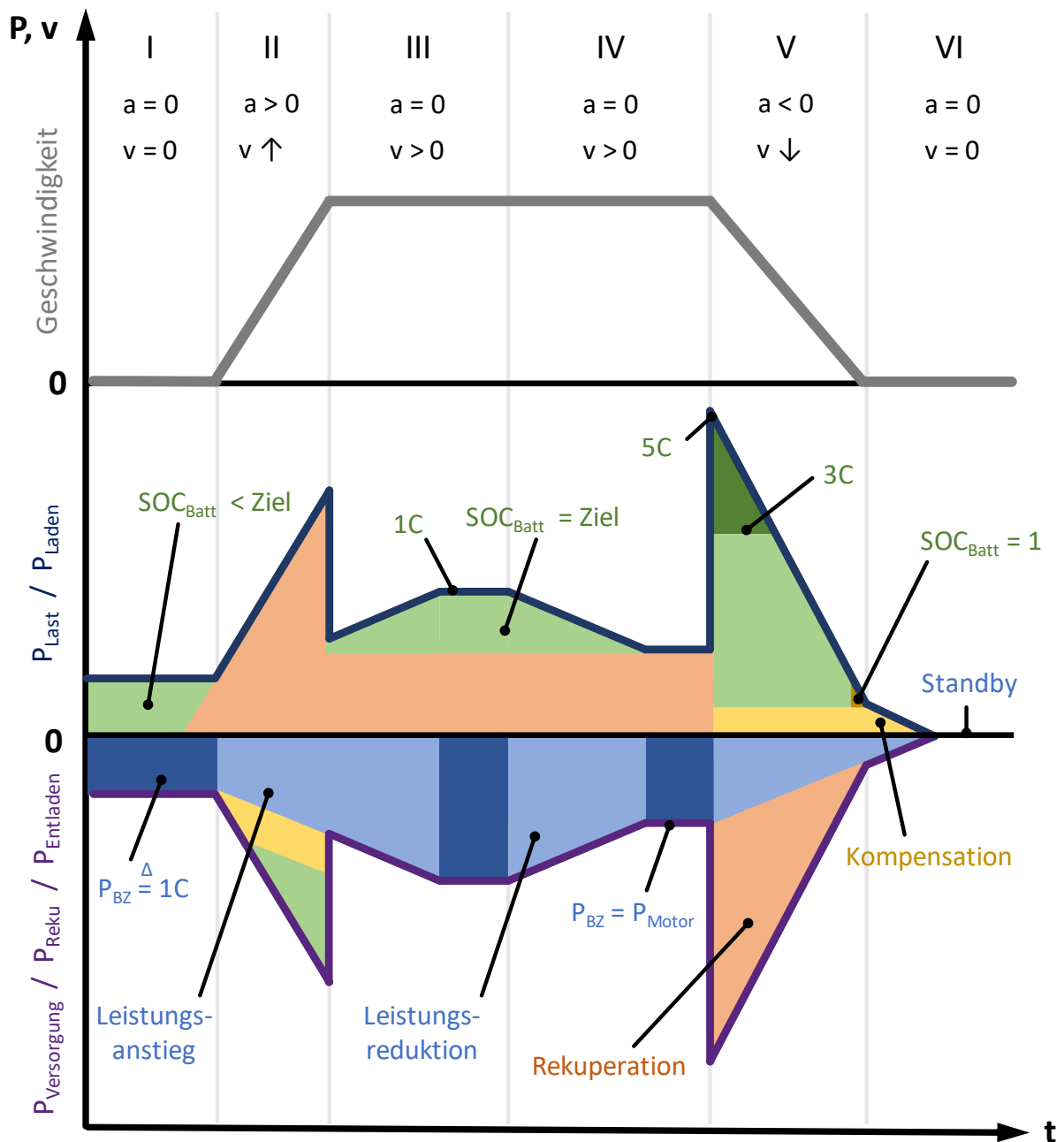


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Gleichstromsammelschiene des abgebildeten FCEV

Die Betriebsstrategie wurde für die dargestellten Komponenten entwickelt. Allerdings besteht die Möglichkeit, wie bereits beschrieben, unterschiedliche Energiespeicher-Topologien abzubilden. Es können entweder eine Batterie, ein Superkondensator oder die Kopplung beider Speicher als Puffer des Antriebsstranges betrachtet werden. Zudem ist die Kapazität der Batterie variabel hinterlegt, um je nach Fahraufgabe die Mindestkapazität bestimmen zu können. Ebenso kann auch die Dynamik der Brennstoffzelle in Form einer zeitlichen Leistungsänderung variiert werden, woraus unterschiedliche Anforderungen an den Energiespeicher resultieren. [49] [50] [51] [52] [53] [54] [55]

Zur Visualisierung wurde die Betriebsstrategie in zehn verschiedene Betriebsfälle gegliedert und ist für die Energiespeicher-Konstellation Batterie und Superkondensator in zwei Abbildungen dargestellt. Die **Abbildung 25** umfasst die Betriebsfälle im Bereich der Stadtfahrt, wohingegen in **Abbildung 26** die Überlandfahrt zu sehen ist. Ebenso wie in **Abbildung 24**, sind die Komponenten in ihre jeweiligen Betriebsfälle unterteilt.



**Brennstoffzelle**      **Superkondensator**      **Batterie**      **Elektromotor**  
 ■ Statischer Betrieb    ■ Spitzen-Betrieb    ■ Spitzen-Betrieb    ■ Regen. Bremsen / Fahren  
 ■ Dynamischer Betrieb   ■ Kontinuierl. Betrieb   ■ Kontinuierl. Betrieb   ■ Betätigung Bremspedal

**Abbildung 25:** Betriebsfälle I bis VI innerhalb der Betriebsstrategie

In der vorherigen Abbildung sind die Betriebsfälle I bis VI dargestellt. Auf der Y-Achse sind die Geschwindigkeit des Fahrzeuges sowie die Leistung innerhalb des Antriebsstranges abgetragen, die X-Achse beschreibt hingegen den Zeitverlauf.

### Betriebsfall I: Stillstand

Der erste Zustand des Fahrzeuges umfasst den Stillstand bei angeschalteter Brennstoffzelle. In diesem Betriebsfall arbeitet die Brennstoffzelle in einem vorgegebenem statischen Betriebspunkt. Die erzeugte Leistung wird zum Laden der Batterie genutzt, solange sich der Ladezustand unter dem Zielwert befindet. Als Alternative zum Laden der Batterie, könnte ebenfalls der Superkondensator geladen werden. Jedoch kann dieser Zustand in Abhängigkeit des Ladezustandes nur eintreten, wenn ein ausreichend großer Energiespeicher im Antriebsstrang vorgesehen ist. Sollte dies nicht der Fall sein, wird die Brennstoffzelle im Stand-By mit einer Mindestleistung betrieben. Das Abschalten der Brennstoffzelle ist aufgrund der Auswertung des realen Systemverhaltens eines Stacks nach Möglichkeit nicht vorgesehen.

### Betriebsfall II: Beschleunigung mit $a > 0$

Im zweiten Modus wird das Fahrzeug für die Stadtfahrt moderat beschleunigt. Die Lastanforderung an den Elektromotor wird durch das Zusammenspiel von Brennstoffzelle, Batterie und Superkondensator erfüllt. Sowohl die Batterie als auch der Superkondensator, befinden sich im kontinuierlichen Betrieb und müssen aufgrund der moderaten Beschleunigung keine Lastspitzen ausgleichen. Aus diesem Grund wird kein Zähler zur Erfassung der kurzzeitigen Belastung benötigt. Die Brennstoffzelle erhöht mit der anfänglich festgelegten Dynamik ihre Leistung und passt sich somit der Lastanforderung an. Falls die Energiespeicher-Topologie in der Simulation nur als ein Puffer vorgesehen wäre, hätte dieser die Aufgabe, die Lastspitze im Rahmen seiner Randbedingungen auszugleichen. Je nach Brennstoffzellen-Dynamik und Lastanforderung kann ein kurzzeitiger Spitzenbetrieb resultieren. Nach Ablauf der maximal zulässigen Zeitdauer der Überlast wird die Beschleunigung des Fahrzeuges limitiert. Denn die Einhaltung der Betriebsparameter der Brennstoffzelle und der Energiespeicher ist eine höhere Priorität als der Erfüllung der Fahraufgabe zugewiesen. In der vorliegenden Simulation ist das Fahrprofil als Sollgröße fest vorgegeben. Eine mögliche Leistungsdifferenz zwischen Soll und Ist wird erfasst und als Strafterm in der integrierten Zielfunktion aufgeführt.

### Betriebsfall III: Konstantfahrt mit $v > 0$

In diesem Betriebsfall fährt das Fahrzeug mit einer mittleren konstanten Geschwindigkeit. Zunächst wird mit Hilfe der Gleichstromsammelschiene und dem zugehörigen Datenbus der Zustand der Energiespeicher überwacht. Sollte der Ladezustand nicht dem gewünschten Bereich entsprechen, wird die Leistung der Brennstoffzelle weiterhin mit der vorgegebenen

Dynamik erhöht. Der angestrebte Betriebspunkt der Brennstoffzelle liegt nach Möglichkeit im optimalen Effizienzbereich des Brennstoffzellen-Systems, der circa 38 % der Maximalleistung entspricht (vgl. [5, S. 115]). Sobald dieser Betriebsbereich erreicht ist, wird die Brennstoffzelle stationär betrieben, bis der angestrebte Ladezustand des Energiespeichers erreicht ist. Im Anschluss wird die Brennstoffzellen-Leistung reduziert, bis sie der benötigten Last des Elektromotors entspricht. Die überschüssige Leistung wird dabei weiterhin durch die Batterie gepuffert. Aus diesem Grund muss gelten, dass das Ladeziel ausreichend unterhalb des  $SOC_{max}$  liegt. Darüber hinaus sollte außerhalb der SOC-Grenzen ein Laden bzw. Entladen nur in Ausnahmefällen erfolgen. Der SOC der Batterie wird zwischen 30 bis 80 % angestrebt, sodass es in diesem Betriebsfall nicht zum Laden mit konstanter Ladeschlussspannung kommt, um die Lebensdauer der Batterie nicht negativ zu beeinflussen. Sollte im Antriebsstrang keine Batterie vorgesehen sein, wird anstelle der Batterie der Superkondensator geladen. Vorteilhaft gegenüber der Batterie ist, dass der Superkondensator einen physikalischen Betriebsbereich besitzt, der sich vollumfänglich nach der optimalen Betriebsführung richtet. Hingegen ist die Kapazität in der Regel geringer, sodass die Brennstoffzelle unter Umständen ihren optimalen Betriebsbereich nicht erreichen würde. Die Betriebsstrategie würde stattdessen in den nächsten Betriebsfall IV wechseln.

#### Betriebsfall IV: Konstantfahrt mit $v > 0$

Der Betriebsfall IV ist ebenso, wie im vorherigen, durch eine moderate Konstantfahrt gekennzeichnet. Jedoch erreicht der Ladezustand der Batterie seinen Zielwert. Daraus resultiert eine Reduzierung der Brennstoffzellen-Leistung mit vorgegebener Leistungsänderung, bis die durch den Elektromotor angeforderte Leistung der Brennstoffzellen-Leistung entspricht. Sobald dieser Zustand erreicht ist, ist der stationäre Betrieb des Stacks vorgesehen. Diese Betriebsform wird zur Erhöhung der Lebensdauer des Brennstoffzellen-Systems angestrebt. Zudem ist der Brennstoffzelle innerhalb des Antriebsstranges die höchste Priorität zugewiesen, da diese im Vergleich zu den Energiespeichern nicht überlastfähig ist. Der Fahraufgabe mit der vorgegebenen Beschleunigung zu folgen, hat hingegen die geringste Priorität. Sollte es zur Nicht-Erfüllung der Fahraufgabe kommen, resultiert eine Erhöhung der Strafterme innerhalb der Zielfunktion und damit einhergehenden Steigerung der Energiespeicher-Kapazität.

#### Betriebsfall V: Abbremsen mit $a < 0$

In diesem Modus kommt es zum Abbremsen des Fahrzeuges, sodass die Leistung der Brennstoffzelle reduziert wird. Die überschüssige Energie, die aus der geringen Brennstoffzellen-Dynamik resultiert, muss durch die Energiespeicher kompensiert werden. Zur Steigerung der Effizienz des Antriebstranges mittels Rekuperation kommt es zu einem Spitzenbetrieb der Batterie und des Superkondensators. Dieser Überlastbetrieb führt zur Erhöhung des integrierten Zählers, der für die Einhaltung der komponentenbedingten Randbedingungen notwendig ist. In der Betriebsstrategie mit beiden Energiespeichern ist dem kontinuierlichen Laden des Superkondensators eine höhere Priorität zugewiesen. Die Spitzenlastfähigkeit des Superkondensators wird für unvorhergesehene Laständerungen vorgesehen. Dementsprechend führt beim vorliegenden Beispiel erst das Erreichen des maximalen Ladezustandes der Batterie zum Überlastbetrieb des Superkondensators. Sollten die Ladezustände beider Energiespeicher keine Aufnahme der Leistung zulassen, wird die überschüssige Energie in Form von thermischer Energie über die mechanische Betriebsbremse an die Umgebung abgegeben. Dieser Fall ist in **Abbildung 26** im Betriebsfall IX dargestellt. Da der Brennstoffzelle jedoch die höchste Priorität zugewiesen ist, muss ein Mindestmaß an Speicherkapazität vorgesehen sein, da trotz des Verzichts auf Rekuperation die Betriebsparameter der Brennstoffzelle eingehalten werden müssen.

#### Betriebsfall VI: Anhalten

Dieser Betriebsfall sieht das Anhalten des Fahrzeuges vor. Aufgrund der maximalen Ladezustände beider Energiespeicher muss eine Leistungsreduktion der Brennstoffzelle durchgeführt werden. Es ist vorgesehen, die Brennstoffzelle nach Möglichkeit nicht vollständig abzuschalten, um auf Lastveränderungen reagieren zu können. Diese Anpassung wurde aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Validierung und Datenanalyse vorgenommen.

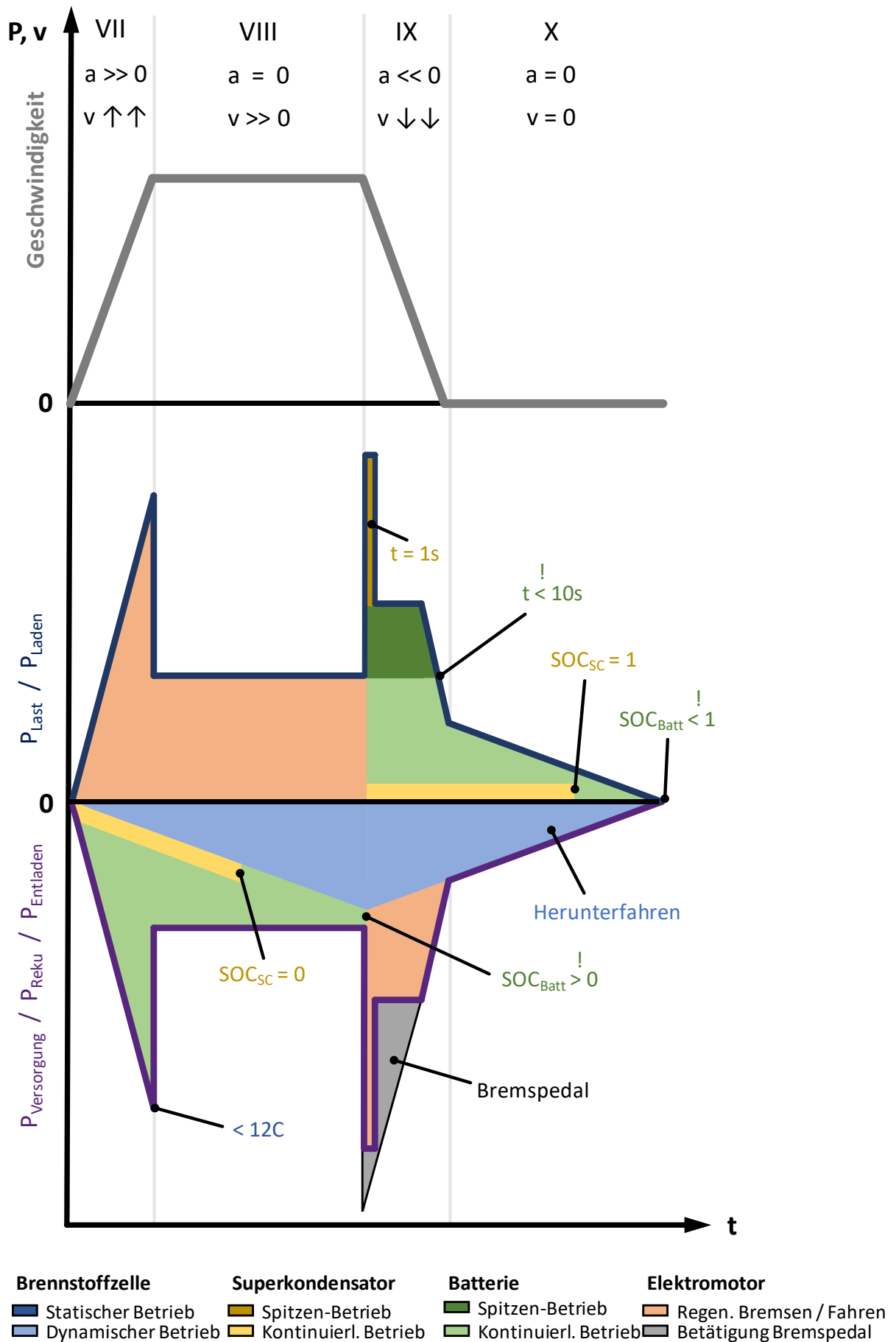


Abbildung 26: Betriebsfälle VII bis X innerhalb der Betriebsstrategie



### Betriebsfall VII: Beschleunigung mit $a \gg 0$

In **Abbildung 26** ist zunächst der Betriebsfall VII dargestellt, bei dem es sich um eine starke Beschleunigung des Fahrzeuges handelt. Die Lastanforderung an den Elektromotor weist eine deutliche Steigung auf, sodass alle energieliefernden Komponenten des Antriebsstranges zur Erfüllung der Fahraufgabe eingesetzt werden müssen. Zunächst wird die Brennstoffzellen-Leistung mit vorgegebener Dynamik erhöht. Da diese nicht ausreichend ist, haben die Batterie und der Superkondensator die Aufgabe ebenfalls Leistung zur Verfügung zu stellen. Jedoch gilt es dabei die Entladegrenzen einzuhalten und den Ladezustand zu beachten. Aufgrund der Prioritätensetzung innerhalb des Antriebsstranges müssen diese gegebenenfalls in den Überlastbetrieb wechseln, um die Lebensdauer der Brennstoffzelle nicht negativ zu beeinflussen.

### Betriebsfall VIII: Konstantfahrt mit $v \gg 0$

Der nächste Modus beschreibt die Konstantfahrt mit hoher Geschwindigkeit in Form einer Überlandfahrt. Die Leistung der Brennstoffzelle, wird ebenso wie im Betriebsfall VII, kontinuierlich erhöht. Allerdings kann sie nicht die gesamte benötigte Leistung des Elektromotors zur Verfügung stellen. Das resultierende Leistungsdefizit wird mit Hilfe der Batterie und des Superkondensators ausgeglichen. Die Kapazität der Energiespeicher zur Erfüllung der Fahraufgabe wird maßgeblich durch das dynamische Verhalten der Brennstoffzelle bestimmt. Je schneller sich diese an die Lastanforderung der Fahraufgabe anpassen kann, desto kleiner kann der Puffer in Form der Energiespeicher Batterie und Superkondensator gewählt werden.

### Betriebsfall IX: Abbremsen mit $a \ll 0$

In diesem Betriebsfall kommt es im Anschluss an die schnelle Konstantfahrt zum starken Abbremsen des Fahrzeuges. Daraus resultiert ein hohes Rekuperationspotential, welches nur im Rahmen der Komponentengrenzen genutzt werden kann. Während des Abbremsens wird die Leistung der Brennstoffzelle mit der maximal möglichen Dynamik reduziert. Die überschüssig erzeugte Energie der Brennstoffzelle muss ebenfalls gespeichert werden. Für die Aufnahme der Energie müssen die Energiespeicher in den kurzzeitigen Spitzenbetrieb wechseln, bis entweder der maximale Ladezustand oder das maximale Zeitfenster der Überlast erreicht sind. Die darüber hinaus anfallende Bremsenergie wird als thermische Energie über die mechanische Bremse an die Umgebung abgegeben. Dadurch sinkt zwar die Effizienz des Antriebsstranges, da nicht das gesamte Rekuperationspotential ausgeschöpft werden kann. Hingegen müssen aber die Randbedingungen der Komponenten des Antriebsstranges eingehalten werden.

Betriebsfall X: Abstellen des Fahrzeuges

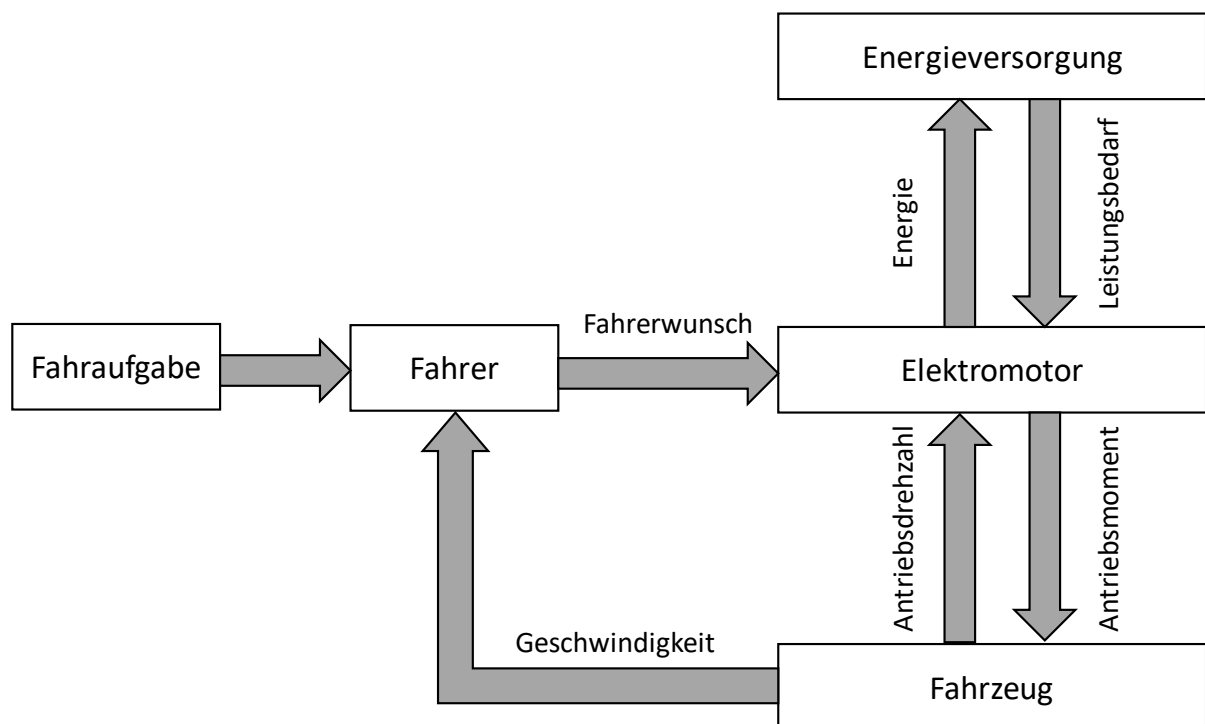
Im Betriebsfall X wird die Brennstoffzelle auf Basis ihrer ermittelten Funktion für optimiertes Stilllegen vollständig abgeschaltet, um das Fahrzeug abstellen zu können. Die Batterie sowie der Superkondensator haben die Aufgabe, die fehlende Dynamik der Brennstoffzelle zu kompensieren und entsprechend ihrer Systemgrenzen die von der Brennstoffzelle erzeugte Leistung aufzunehmen. Im Anschluss an das vollständige Herunterfahren des Brennstoffzellen-Systems wird das Fahrzeug abgestellt.

## 4.4 Umsetzung in *Matlab / Simulink*

Das Brennstoffzellen-Fahrzeug wurde innerhalb der Simulationsumgebung *Matlab / Simulink* als OD/1D-Simulationsmodell abgebildet. Es handelt sich um eine Rückwärtssimulation, die quasi-stationär das Verhalten des FCEV mit der Vorgabe eines Fahrzyklus berechnet. Das Modell beinhaltet neben dem elektrischen Antriebsstrang ein Längsdynamik-Modell des Fahrzeuges sowie einen Fahrer. Die Umsetzung der Modellierung innerhalb der Simulationsumgebung wird im folgenden Kapitel vorgestellt. [25] [35] [56]

### 4.4.1 Aufbau des FCEV-Modells

Das Simulationsmodell bildet den gesamten Antriebsstrang sowie die Längsdynamik des FCEV ab. Es besteht aus dem Einspur-Modell, dem Elektromotor sowie der Energieversorgung und wird mit Hilfe eines Fahrers mit einem Fahrprofil beaufschlagt. Der schematische Aufbau ist in **Abbildung 27** zu sehen.

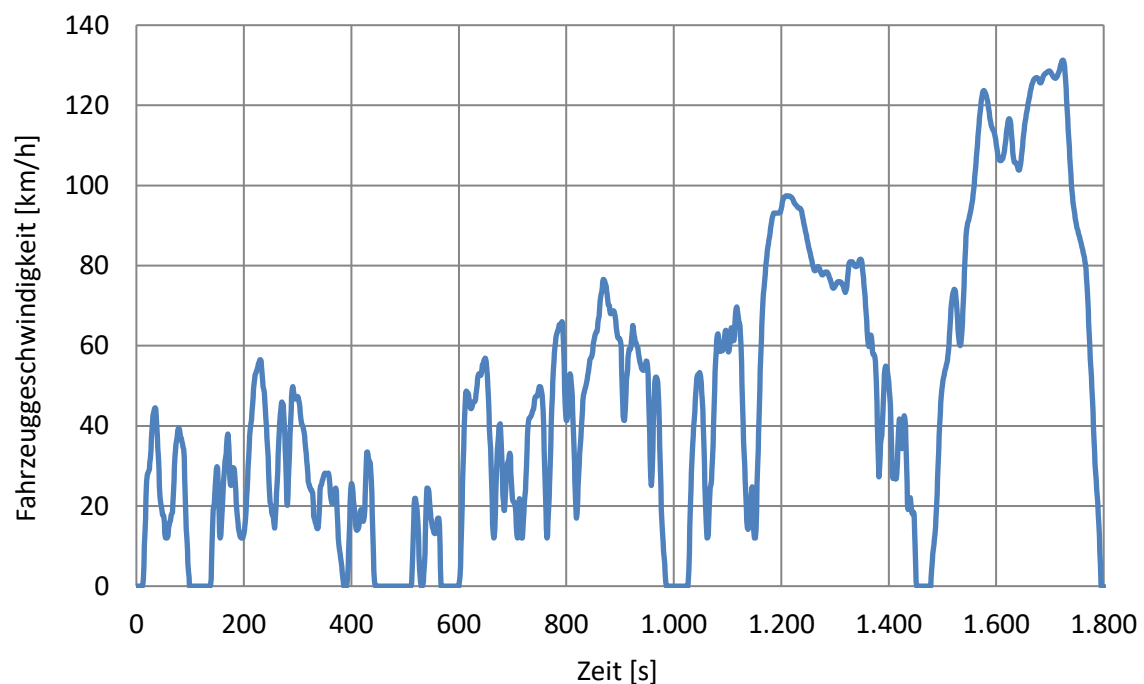


**Abbildung 27:** Schematischer Aufbau des Gesamtfahrzeugmodells

#### 4.4.2 Fahrer und Fahraufgabe

Im Bereich des Fahrers und der Fahraufgabe wird ein Fahrzyklus in Form eines Geschwindigkeit-Zeit-Profiles vorgegeben, welcher mit Hilfe eines Fahrers auf das Fahrzeug einwirkt. Der Fahrer ist als PI-Regler realisiert. Als Fahrzyklus wurde das „Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure“ (WLTP) herangezogen. Die Konzentration auf diesen gesetzlichen Fahrzyklus wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit realen Fahrzeugen vorgenommen. Der WLTP wurde auf Basis von weltweit erhobenen Fahrdaten entwickelt und im September 2017 als global einheitlicher Prüfzyklus für Personenkraftwagen sowie leichte Nutzfahrzeuge eingeführt. Die Parameter Beschleunigung, Durchschnitts- und Maximalgeschwindigkeit wurden erhöht, sodass er aufgrund seines Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofils das vermutliche Real-Fahrverhalten eines FCEV abbildet. Zusätzlich zur gestiegenen Anzahl an Beschleunigungsvorgängen, werden unterschiedliche Ausstattungsvarianten der Fahrzeuge berücksichtigt. Die Zusatzverbraucher werden für die Testphase zwar deaktiviert, jedoch können Gewichts- und Aerodynamikunterschiede identifiziert werden.

In **Abbildung 28** ist der Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf des WLTP dargestellt. Der Fahrzyklus fasst einen Zeitraum von 30 Minuten (1800 s) und berücksichtigt eine maximale Fahrzeuggeschwindigkeit von 130 km/h.



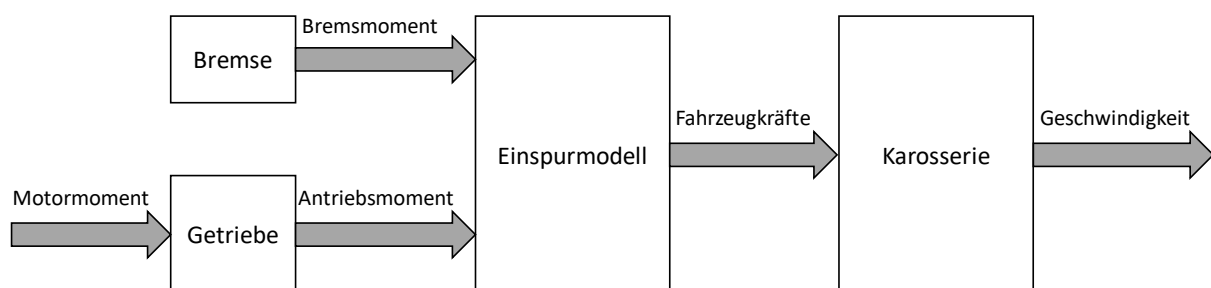
**Abbildung 28:** Geschwindigkeits-Zeit-Profil des WLTP

Zusätzlich zu diesem Fahrzyklus können auch weitere Fahraufgaben mit dem Simulationsmodell abgebildet werden. Das allgemeingültige Simulationsmodell des FCEV bietet die Möglichkeit jedes Geschwindigkeits-Zeit-Profil vorzugeben. Darüber hinaus sind die Komponenten des Antriebsstranges innerhalb der Betriebsstrategie variabel implementiert. Es können unter anderem die Parameter Kapazität, Ladezustand oder auch Dynamik variiert werden. Daher kann das Brennstoffzellen-Fahrzeug-Modell zukünftig auch für „Real Driving Emissions“ Zyklen (kurz: RDE) angewendet werden. Diese Zyklen dienen der Messung von Abgasemissionen unter realen Fahrbedingungen. Derzeit gibt es keinen standardisierten RDE-Zyklus, weshalb die Simulationsergebnisse aus Gründen der Vergleichbarkeit mit dem Fahrzyklus WLTP berechnet wurden.

#### 4.4.3 Fahrzeug

Bei der Simulation eines Fahrzeuges ist es notwendig den Detaillierungsgrad des Simulationsmodells hinsichtlich des betrachteten Fahr- und Bewegungsverhaltens festzulegen. Für die Beschreibung dieses Verhaltens gibt es verschiedene theoretische Modelle, die sich hinsichtlich ihrer Komplexität und ihres Detaillierungsgrades unterscheiden.

Der Fokus des generierten Simulationsmodells liegt bei der Betrachtung des Energiemanagements, sodass die Querdynamik als vernachlässigbar angenommen wurde. Das Fahrzeug ist dementsprechend als Einspur-Modell zur Abbildung der Längsdynamik implementiert.



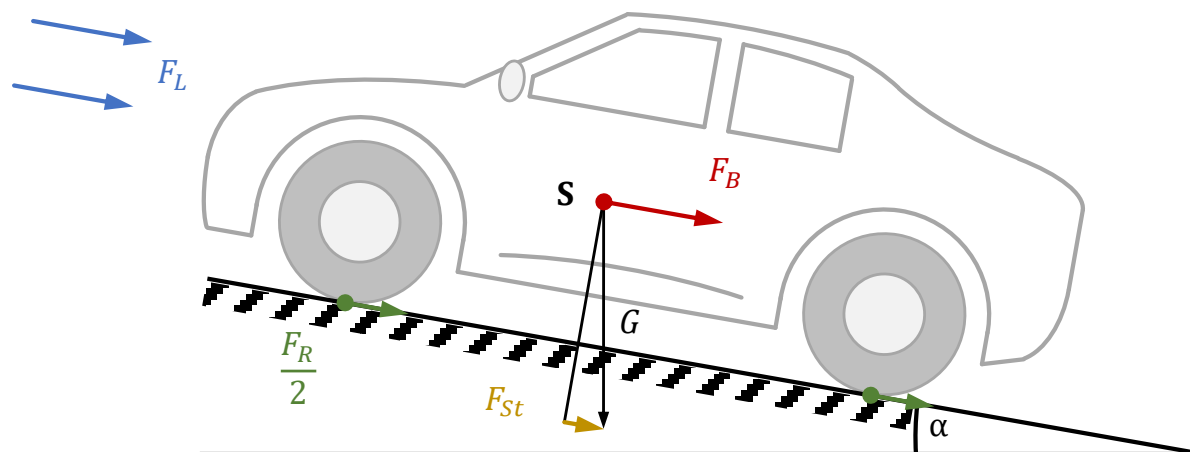
**Abbildung 29:** Fahrzeugmodell als Einspur-Modell in *Matlab / Simulink*

Für die Fortbewegung muss ein Fahrzeuge die sogenannten Fahrwiderstände überwinden. Diese werden in Summe als Gesamtfahrwiderstand bezeichnet und setzen sich wie folgt zusammen:

$$F_G = F_R + F_L + F_{St} + F_B \quad (12)$$

- $F_R$  Rollwiderstand  
 $F_L$  Luftwiderstand  
 $F_{St}$  Steigungswiderstand  
 $F_B$  Beschleunigungswiderstand

In **Abbildung 30** sind die Widerstände an einem Fahrzeug dargestellt. Es kann abgeleitet werden, dass der Gesamtfahrwiderstand aufgebracht werden muss, um das Fahrzeug zu bewegen. [57]



- |                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| $F_L$ = Luftwiderstand         | $G$ = Gewichtskraft               |
| $F_R$ = Rollwiderstand         | $F_B$ = Beschleunigungswiderstand |
| $F_{St}$ = Steigungswiderstand | $S$ = Schwerpunkt                 |

**Abbildung 30:** Fahrwiderstände an einem Fahrzeug [57]

Der Rollwiderstand ergibt sich aus der Gewichtskraft  $G$  und dem Rollreibungsfaktor  $f$ . Dieser entsteht durch die Verformung des Rades und der Fahrbahn. Die Umwandlung der Energie erfolgt in Form von Wärme, sodass keine Nutzung durch das System möglich ist.

$$F_R = f \cdot G = f \cdot m \cdot g \quad (13)$$

Der Luftwiderstand setzt sich aus dem Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$ , der Querschnittsfläche  $A$ , der Luftdichte  $\rho$  sowie der Anströmgeschwindigkeit  $v$  des Fahrzeuges zusammen. Er entsteht durch die Um- und Durchströmung des Fahrzeuges und dominiert bei steigender Geschwindigkeit den Gesamtfahrwiderstand. Dies resultiert wiederum in einer Steigerung des Kraftstoffverbrauches.

$$F_L = c_w \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (14)$$

Der anteilige Steigungswiderstand muss beim Fahren eines Gefälles vom Fahrzeug überwunden werden. Er wird mit Hilfe der Gewichtskraft  $G$  und dem Winkel der Steigung berechnet. Die umgewandelte Energie kann bei einer nachfolgenden Bergabfahrt rekuperiert werden.

$$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (15)$$

Der Beschleunigungswiderstand setzt sich aus einem translatorischen und rotatorischen Anteil zusammen. Der translatorische Anteil wird auf Basis der Fahrzeugmasse und der translatorischen Beschleunigung des Fahrzeuges berechnet. Im Vergleich dazu berücksichtigt der rotatorische Anteil die Beschleunigung des Rades.

$$F_B = F_{trans} + F_{rot} \quad (16)$$

Innerhalb des Simulationsmodells wurde das Fahrzeug entsprechend eines Referenzfahrzeuges angepasst. Als Referenzfahrzeug wurde ein Mercedes Benz GLC F-Cell gewählt. Dieser gehört zur Fahrzeugklasse J (SUV) dar, bedingt durch den hohen Bauraumbedarf des Brennstoffzellen-Systems, des Wasserstofftanks und der Batterie. Es wurde als Front-angetriebenes Fahrzeug mit einem Verteilergetriebe und einem Übersetzungsverhältnis von 9:1 realisiert. Das Fahrwerk sowie die Karosserie wurden ebenso der Fahrzeugklasse entsprechend angenähert. Die Parameter sind in der **Tabelle 2** aufgeführt. [58] [59]

**Tabelle 2:** Parameter des Referenzfahrzeuges im Simulationsmodell

<b>Fahrzeugparameter</b>	
<b>Fahrzeug</b>	Mercedes Benz GLC F-Cell
<b>Klasse</b>	J (SUV)
<b>Gewicht</b>	2130 kg
<b>Radstand</b>	2,87 m
<b>Länge</b>	4,66 m
<b>Breite</b>	1,89 m
<b>Höhe</b>	1,64 m
<b>Querschnittsfläche</b>	3,1 m <sup>2</sup>
<b>PEM-Brennstoffzelle</b>	75 kW
<b>Elektromotor</b>	140 kW (314 Nm)
<b>Batteriekapazität</b>	13,8 kWh
<b>Spannung des HV-Systems</b>	360 V
<b>Getriebeübersetzung</b>	9:1
<b>Reifen</b>	235/55 R19

#### 4.4.4 Elektromotor

Der Elektromotor des Referenzfahrzeuges stellt eine Asynchronmaschine mit einer Antriebsleistung von 147 kW bei einem maximalen Drehmoment von 350 Nm dar. Aufgrund der Verfügbarkeit der Parameter des Elektromotors, wurde dieser mit Hilfe einer Asynchronmaschine mit 140 kW und einem maximalen Drehmoment von 314 Nm implementiert.

Der Elektromotor ist innerhalb des Simulationsmodells zunächst auf Basis seines Kennfeldes in der Fahrzeug-Ebene integriert. Mit Hilfe dieses Kennfeldes werden, je nach benötigter Beschleunigung und Geschwindigkeit, das benötigte Motormoment und die benötigte Leistung berechnet. Aus dem Leistungsbedarf wird der Soll-Strom  $I$  ermittelt. Dies geschieht unter der Annahme, dass der Wechselrichter der Asynchronmaschine mit der konstanten Gleichspannung der Gleichstromsammelschiene versorgt wird. [16]



Die benötigte Leistung des Elektromotors resultiert aus dem Längsdynamik-Modell, der Lastanforderung sowie dem Motorkennfeld. Diese Leistungsanforderung kann entweder simulativ auf Basis des integrierten Fahrzeugmodells oder experimentell ermittelt werden. Sie ist aus Gründen der Rechenzeitoptimierung als zeitabhängiger Datenvektor in die Energieversorgung integriert. Mit Hilfe dieses Vektors wird die Leistungsanforderung des Elektromotors in Abhängigkeit des Fahrprofils und Fahrzeuges innerhalb der Energieversorgung hinterlegt. Die Leistungsanforderung dient der Verteilung auf der Gleichstromsammelschiene und der Betriebsführung des Brennstoffzellen-Fahrzeuges. [16] [22] [57] [60] [61]

$$P_{Soll} = P_{Brennstoffzelle} + P_{Batterie} + P_{Superkondensator} + \Delta P \quad (17)$$

mit

$$P = U \cdot I \quad (18)$$

und

$$U_{Sammelschiene} = \textit{konstant} \quad (19)$$

folgt

$$I_{Soll} = I_{Brennstoffzelle} + I_{Batterie} + I_{Superkondensator} + \Delta I \quad (20)$$

Aufgrund des konstanten Spannungsniveaus der Gleichstromsammelschiene ist der Antriebsstrang über den Strom geregelt. Bei der Stromverteilung innerhalb des Antriebsstranges kann es unter Umständen zu einer Differenz im Zeitverlauf kommen. Diese Differenz wird erfasst und geht als Strafterm in einer Zielfunktion ein. Mit Hilfe der Zielfunktion wird eine lineare Optimierung zur Identifizierung eines lokalen Minimums durchgeführt. Dies erfolgt mittels einer Quantifizierung unerwünschten Systemverhaltens der Komponenten des elektrischen Antriebsstranges. Die Quantifizierung erfolgt auf Basis von Straftermen und zugehörigen Gewichtungsfaktoren. Die Strafterme dienen der Analyse und somit Auslegung des Antriebsstranges und berücksichtigen Über- als auch Unterversorgungen der Komponenten Brennstoffzelle, Elektromotor, Batterie und Superkondensator.

#### 4.4.5 Leistungselektronik

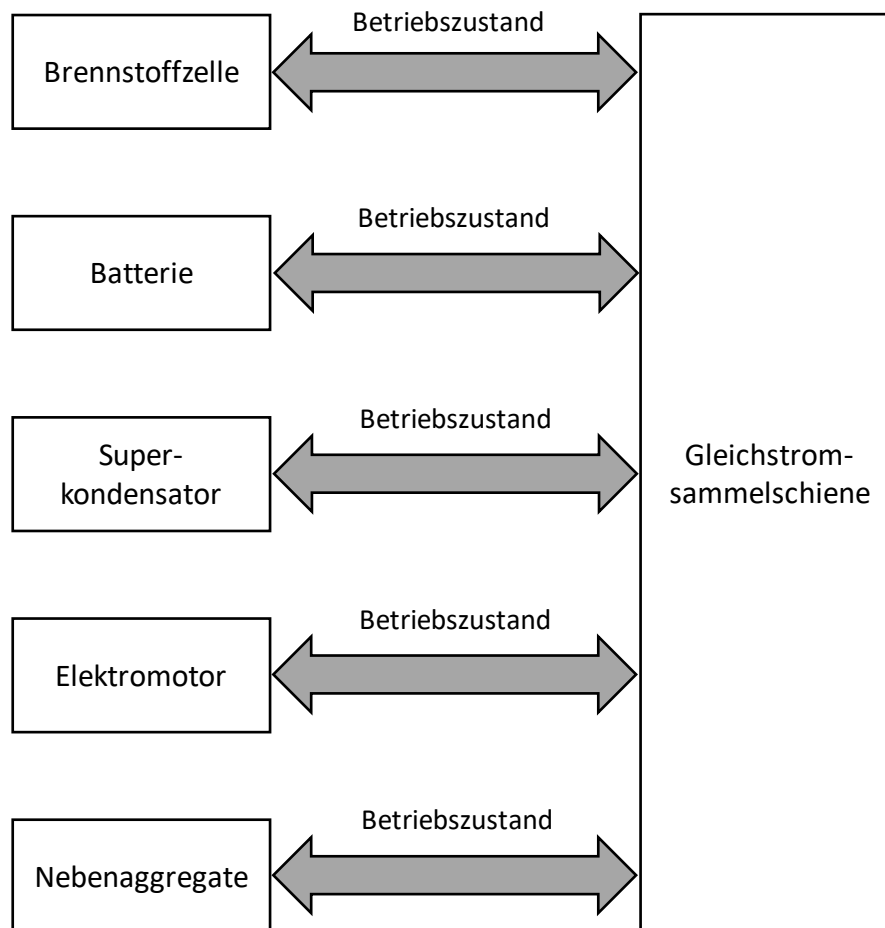
Innerhalb des Simulationsmodells beinhalten alle Komponenten des elektrischen Antriebsstranges eine Leistungselektronik. Diese kann zum einen die Aufgabe haben, die Spannung der Komponente für die Gleichstromsammelschiene umzusetzen. Zum anderen sollte sie im bidirektionalen Betrieb das für die jeweilige Komponente benötigte Spannungsniveau bereitstellen.

Bei der Leistungselektronik der Brennstoffzelle handelt es sich um einen unidirektionalen DC/DC-Wandler, da die Brennstoffzelle im Antriebsstrang nur Leistung zur Verfügung stellt. Dahingegen beinhalten die Energiespeicher - Batterie und Superkondensator - bidirektionale DC/DC-Wandler, da sie sowohl Energie bereitstellen als auch aufnehmen können.

Die Leistungselektronik der Asynchronmaschine stellt einen DC/AC-Wandler dar, der ebenfalls das Spannungsniveau in beide Richtungen anpassen muss. Die Asynchronmaschine ist für den hybriden Antriebsstrang äußerst vorteilhaft, da je nach Phasenverschiebung zwischen Rotor und Stator entweder Antriebsleistung benötigt oder Bremsenergie zur Verfügung gestellt wird. [16] [22]

#### 4.4.6 Aufbau der Energieversorgung

Im Bereich der Energieversorgung werden innerhalb des Simulationsmodells die Komponenten des Antriebsstranges sowie die Gleichstromsammelschiene und der zugehörige Datenbus abgebildet. Im Bereich der Energieversorgung sind alle Komponenten des Antriebsstranges implementiert, die entweder Leistung aufnehmen oder zur Verfügung stellen. Dazu gehören die Brennstoffzelle, die Batterie, der Superkondensator, der Elektromotor und die Nebenverbraucher. Der Aufbau in *Matlab / Simulink* ist der nachfolgenden Abbildung schematisch zu entnehmen.



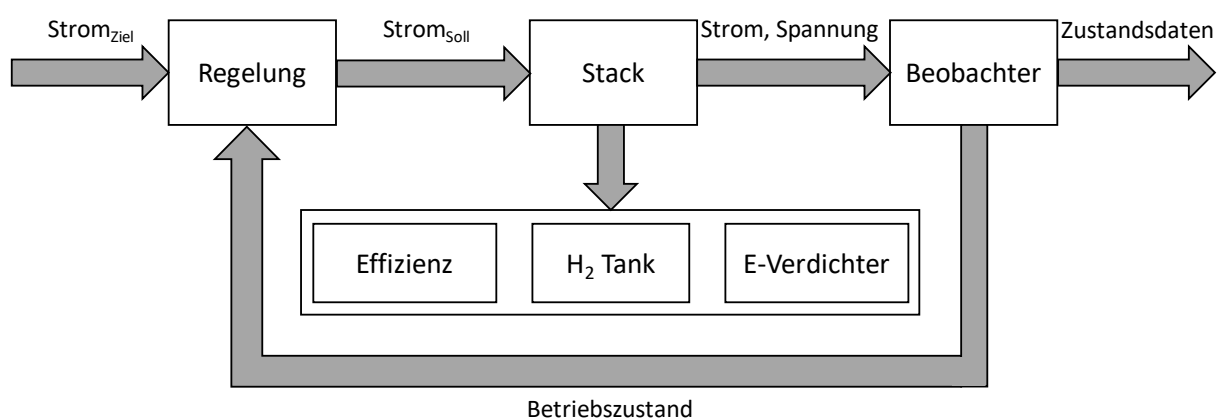
**Abbildung 31:** Aufbau der Energieversorgung in *Matlab / Simulink*

Aus **Abbildung 31** kann entnommen werden, dass die Komponenten des elektrischen Antriebsstranges mit der Gleichstromsammelschiene verbunden sind. Diese Kopplung wird mit einer komponentenbasierten Leistungselektronik gewährleistet und dient, wie bereits in Kapitel 4.4.5 beschrieben, der uni- oder bidirektionalen Wandlung der Spannung auf das Niveau der Gleichstromsammelschiene oder der Komponente. Aufgrund des vorgegebenen Spannungsniveaus werden die Komponenten der Energieversorgung über den Strom geregelt.

#### 4.4.7 Brennstoffzelle

Bei der im Modell verwendeten Brennstoffzelle handelt es sich um eine Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle, die eine Leistung von 75 kW und eine Zellenanzahl von 396 aufweist. Die aktive Zellfläche des Stacks beträgt 570 cm<sup>2</sup>. Die Charakteristik der abgebildeten Brennstoffzelle wurde entsprechend der in Kapitel 4.2 beschriebenen Validierung angepasst. Insofern werden eine reale Strom-Spannungs-Kurve sowie eine Hochlauf- und Abschaltkurve zur Abbildung des Systemverhaltens herangezogen. Zudem ist die Brennstoffzelle hinsichtlich ihres dynamischen Verhaltens als variabel integriert, sodass eine maximal zulässige Dynamik hinterlegt werden kann. Die für die Fahraufgabe benötigte Dynamik wird im Rahmen der Zielfunktion als Strafterm erfasst und dient der Analyse des Betriebsverhaltens der Brennstoffzelle für verschiedene Lastanforderungen und Energiespeicher-Topologien. Diese Annahme wurde getroffen, damit das Simulationsmodell allgemeingültig für verschiedene Brennstoffzellen angewendet werden kann. Zudem hat die Dynamik des Brennstoffzellen-Systems einen erheblichen Einfluss auf die benötigte Kapazität und Auslegung der Energiespeicher. Auch wird die Rekuperationsfähigkeit maßgeblich durch die Brennstoffzellen-Dynamik bestimmt, da bei größerer Leistungsvariabilität der Brennstoffzelle mehr Bremsenergie durch die Energiespeicher aufgenommen werden kann. Alternativ müssen die Energiespeicher aufgrund der höchsten zugewiesenen Priorität der Brennstoffzelle die von ihr erzeugte Leistung aufnehmen. [35] [48] [56] [58] [59] [62] [63] [64]

Die PEM-Brennstoffzelle ist innerhalb des Simulationsmodells entsprechend der nachfolgenden Abbildung integriert.



**Abbildung 32:** Schematischer Aufbau des Brennstoffzellen-Modells

Die erste Systemkomponente ist ein Regler, der als Eingang den von der Gleichstromsammelschiene und dem zugehörigen Datenbus vorgegebenen Strom erhält. Innerhalb der Regelung wird überprüft, ob der Zielwert sich innerhalb der jeweiligen Betriebsparameter befindet. Sollte die Vorgabe nicht erfüllbar sein, wird der maximal zulässige Wert an die Brennstoffzelle weitergegeben und der Komponentenstatus an den Datenbus übermittelt. Des Weiteren beinhaltet der Regler den Zähler zur Erfassung der zeitabhängigen Parameter und der maximalen Dynamik. Mit Hilfe dieses Zählers erfolgt eine Trendermittlung für die letzten fünf Sekunden, um identifizieren zu können, in welchem Betriebsfall sich die Brennstoffzelle befindet. Der Zeithorizont ist gewählt worden, da dieser eine Vielzahl von dynamischen Vorgängen wie kurzzeitiges Beschleunigen, Abbremsen oder Veränderung der Fahrpedalstellung abdeckt. [25] [55] [65] [66] [67] [68] [69] [70]

Im Anschluss an die Regelung erfolgt im Systembaustein des Stacks eine zellabhängige Zuordnung des notwendigen Betriebspunktes auf Basis der Strom-Spannungs-Kurve der Brennstoffzelle. Innerhalb dieses Systembausteins ist eine Matlab-Funktion enthalten, die auf Basis der Kenndaten der Brennstoffzelle und der validierten Strom-Spannungs-Kurve den Betriebspunkt in Form der Stack-Spannung und des Stack-Stroms auswählt. Als Eingangsparameter erhält die Brennstoffzelle folgende Kenndaten:

- Strom (Vorgabe der Regelung)
- Zellenanzahl
- Minimaler Zellstrom
- Maximaler Zellstrom
- Minimale Zellspannung
- Maximale Zellspannung
- Polynom 3. Ordnung zur Beschreibung des Hochlauf- sowie Abschaltverhaltens

Darüber hinaus wird innerhalb des Brennstoffzellen-Modells die maximal genutzte Dynamik erfasst. Zudem werden im Beobachter der Status und Zustand der Brennstoffzelle aufgezeichnet. Die Zustandsdaten dienen der Rückkopplung für den Datenbus und der Regelung. Der Beobachter ist notwendig, um für den nächsten Zeitschritt die Regelung durchführen zu können. Somit stellt der Beobachter die zusätzliche Rückkopplung des Stromreglers dar, welcher die Randparameter des Brennstoffzellenbetriebs mitberücksichtigt. Insofern gibt der Stromregler beispielsweise anstatt des minimal zulässigen Betriebsstromes

die Sollwertvorgabe von 0 A für das Abschalten des Stacks nur weiter, wenn der Beobachter die dafür notwendigen Voraussetzungen identifiziert hat.

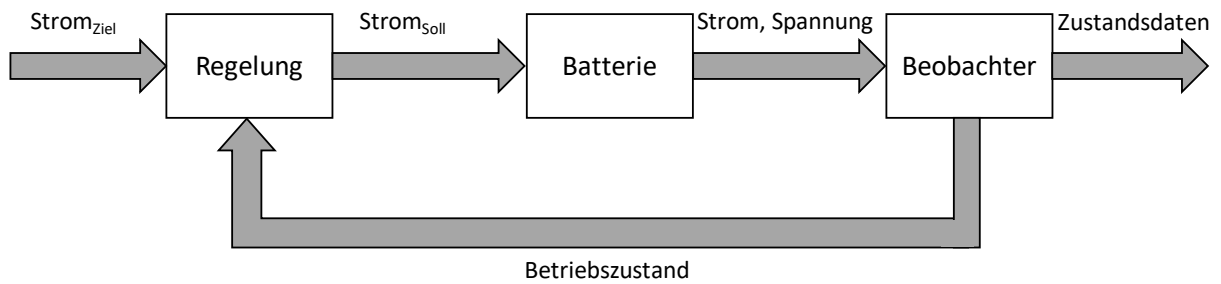
In der **Abbildung 32** sind darüber hinaus die drei Systembausteine - H<sub>2</sub> Tank, E-Verdichter sowie Effizienz - zu sehen. Innerhalb des Wasserstofftanks wird auf Basis des Betriebspunktes der Brennstoffzelle mit Hilfe der Faraday-Konstante und der Zellenanzahl der benötigte Wasserstoff berechnet. Auf Basis dessen kann der Verbrauch abgeleitet und somit auch der Füllstand des Tanks bestimmt werden.

Für die Abbildung des Kompressors ist ein elektrisch antriebener Radialturboverdichter auf Basis eines Kennfeldes hinterlegt. Als Kennfeld dienen zum einen das vom Massenstrom abhängige Druckverhältnis und zum anderen die daraus resultierende Leistungsaufnahme des Verdichters. Auf Basis des Betriebspunktes der Brennstoffzelle und mit Hilfe eines vorgegebenen stöchiometrischen Verhältnisses unter Zuhilfenahme der Faraday-Konstante wird innerhalb des Modells der benötigte Luftmassenstrom berechnet. Daraus resultiert der Betriebspunkt des Verdichters, der wiederum die Leistungsaufnahme bestimmt. Diese Leistungsaufnahme muss von der Brennstoffzelle zur Verfügung gestellt werden. [31] [32] [33] [52] [71] [72]

Innerhalb des Effizienzblockes ist die Wirkungsgradkurve des Brennstoffzellen-Gesamtsystems als Kennfeld hinterlegt. Es dient der Zuordnung der Stack-Effizienz auf Basis der angeforderten Brennstoffzellenleistung.

#### 4.4.8 Batterie

Die Batterie ist im Simulationsmodell als Hochleistungs-Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid-Zelle (kurz: Li-NMC) implementiert (siehe Kapitel 3.2.1). Diese Form der Batterie ist aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Entlade- und Ladegrenzen für die Anwendung im hybriden Antriebsstrang von Vorteil, da sie überschüssige Energie mit einem hohen Wirkungsgrad aufnehmen kann. Sie weist einen kontinuierlichen Ladestrom von 3C sowie einen kurzzeitigen ( $t < 10$  s) von 5C auf. Der Entladestrom beträgt hingegen 12C und bei Überlastbetrieb bis zu 15C ( $t < 10$  s) [20, S. 298]. Der schematische Aufbau des integrierten Batterie-Modells ist in **Abbildung 33** zu sehen.



**Abbildung 33:** Schematischer Aufbau des Batterie-Modells

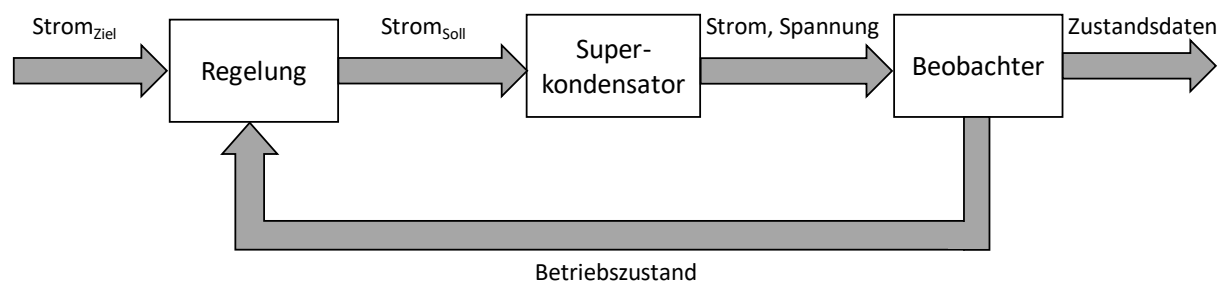
Die Batterie ist innerhalb der Energieversorgung des Brennstoffzellen-Fahrzeug-Modells zunächst auf Basis eines Kennfeldes einer Hochleistungs-Zelle hinterlegt. Dieses Kennfeld gibt das Systemverhalten wieder und bestimmt auf Basis des benötigten Stromes und der Temperatur die ladezustandsabhängige Spannungsabgabe. Die Spannungsabgabe der Zelle gibt Auskunft über deren Ladezustand und ist darüber hinaus temperaturabhängig. Das Thermomanagement wurde im Rahmen des Simulationsmodells nicht weiter berücksichtigt, sodass die Temperatur der Batterie als ideal angenommen wurde.

Der gewünschte Ladezustand der Batterie befindet sich zwischen 30 bis 80 % State of Charge (SOC) und wird von der Regelung nur in Ausnahmefällen über- bzw. unterschritten. Die Regelung übernimmt hierbei die Aufgabe des Batteriemanagementsystems. Dieses hat die Aufgabe, die Batterie entsprechend ihrer vorgegebenen Randparameter, wie der zeitabhängigen Strombegrenzung, zu betreiben. Folglich ist innerhalb der Regelung ein Zähler zur Erfassung der zeitabhängigen Parameter integriert, um die maximalen Lade- sowie Entladeströme vorgeben zu können. Neben der zeitlichen Limitierung der Überlastfähigkeit auf maximal 10 s gemäß [20] wird deren Nutzung ebenfalls bei einem Lastwechsel eingeschränkt. Des Weiteren beinhaltet das Batteriemanagementsystem eine Trendermittlung für die letzten vergangenen fünf Sekunden, um den jeweiligen Betriebsfall der Komponente des Batteriemodells zu erfassen.

Der Beobachter dient der Zustandserfassung der Batterie und hat ebenfalls die Aufgabe, diesen Zustand an den Datenbus weiterzugeben. Mit Hilfe der Informationen im Datenbus kann der Leistungsbedarf an die Batterie für den nachfolgenden Zeitschritt zugeordnet werden. Da innerhalb des Simulationsmodells drei Energiespeicher-Topologien möglich sind, kann die Batterie zu- oder abgeschaltet werden. Zudem besteht die Möglichkeit die Kapazität und das Verhalten, zum Beispiel zur Simulation einer idealen Batterie mit unbegrenzter Kapazität, vorzugeben. [17] [38] [49] [51] [56] [64] [73]

#### 4.4.9 Superkondensator

In der Energieversorgung des Brennstoffzellen-Fahrzeuges ist als zusätzlicher Energie-speicher ein Superkondensator implementiert. Dieser sogenannte Doppelschicht-Kondensator zeichnet sich durch sehr hohe Entlade- und Ladegrenzen sowie eine Überladefähigkeit aus. Der Superkondensator ist optimal für hybride Antriebsstränge geeignet, da mit ihm eine hohe Effizienz des Antriebsstranges erreicht werden kann. Die schematische Umsetzung innerhalb des Simulationsmodells ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 34:** Schematischer Aufbau des Superkondensator-Modells

Die Komponente des Superkondensators ist innerhalb des Simulationsmodells als *Matlab*-Funktion integriert. Diese Funktion dient der Abbildung des Systemverhaltens auf Basis von Differentialgleichungen des Superkondensators. Mit Hilfe dieses Modells wird die Spannung, der Strom sowie der Ladezustand des Energiespeichers bestimmt. Der Superkondensator ist ebenso wie die Batterie mit einer Leistungselektronik implementiert, welche die Aufgabe hat, die Spannungen innerhalb des Modells bidirektional zu wandeln. Darüber hinaus wird die Komponente geregelt, damit die vorgegebenen Parameter den minimal und maximal zulässigen Randbedingungen entsprechen. Der Ladezustand des Superkondensators kann im Normalbetrieb einen Wert zwischen 0 und 100 % annehmen. Wenn der Brennstoffzellenbetrieb es erfordern sollte, kann der Superkondensator jedoch zur Abfederung überladen werden und einen Ladezustand von bis zu 120 % erreichen. [17] [20] [39]

Neben der Regelung wird im Beobachter der Zustand des Superkondensators erfasst und an den Datenbus und die Regelung übermittelt. Mit Hilfe der Erfassung des Betriebszustandes kann die Regelung für den nächsten Zeitschritt erfolgen. Denn wie auch bei der Batterie, ist das Systemverhalten des Superkondensators durch ein sogenanntes Verzögerungsglied 1. Ordnung charakterisiert. [40] [49] [53]

Des Weiteren ist aufgrund der oben genannten veränderlichen Energiespeicher-Topologie die Möglichkeit integriert, den Superkondensator zu- bzw. abzuschalten.



#### 4.4.10 Nebenverbraucher

Innerhalb der Energieversorgung ist neben den Komponenten des elektrischen Antriebsstranges ein Funktionsblock zur Betrachtung von Nebenverbrauchern integriert. Denn die Nebenverbraucher können je nach Leistungsaufnahme einen enormen Einfluss auf das Energiemanagement haben. Die angeforderte Leistung muss von der Brennstoffzelle und den Energiespeichern zur Verfügung gestellt werden, woraus eine Anpassung des Antriebsstranges resultieren kann.

Der Einfluss der Nebenverbraucher ist allerdings schwer abbildbar, da diese sowohl konstant als auch kurzzeitig betrieben werden können. Darüber hinaus können sie in sicherheitsrelevante Verbraucher, wie beispielsweise einer aktiven Wankstabilisierung, und Komfortfunktionen, wie zum Beispiel einer Klimaanlage, unterteilt werden.

Die konstanten Verbraucher sind vorteilhaft, da sie im elektrischen Antriebsstrang als Anstieg des benötigten Leistungsniveaus berücksichtigt werden können. Hingegen resultieren kurzzeitig betriebene Funktionen in einer Erhöhung des Freiheitsgrades des Gesamtsystems, sodass ein Puffer in Form einer höheren Energiespeicherkapazität vorgehalten werden muss. Diese Funktionen müssen wiederum in Sicherheits- und Komfortfunktionen unterschieden werden. Denn Komfortfunktionen könnten durch die Integration in die Gleichstromsammelschiene und den damit verbundenen Datenbus bei Überlastbetrieb der Energiespeicher aufgrund der Fahraufgabe in einen kurzzeitigen Aussetzbetrieb wechseln. Dieser beschreibt eine kurzzeitige Abschaltung von Komfortfunktionen - wie beispielsweise des Kompressors der Klimaanlage, der Sitzheizung oder der beheizbaren Scheiben - und könnte der Entlastung des Antriebsstranges dienen.

Die Sicherheitsfunktionen, die von der Fahrsituation abhängig sind und eine variable Leistungsaufnahme aufweisen, sind allerdings weder kurzzeitig ausschalt- noch prognostizierbar.

Innerhalb des Simulationsmodells sind derzeit nur stationäre Nebenverbraucher mit einer Grundlast von 1 kW implementiert. Diese Grundlast resultiert aus der Sicherstellung der Sicherheits- und Komfortfunktionen, wie Tagfahrlicht oder Infotainment-System.

#### 4.4.11 Lineare Optimierung

Im Rahmen der Modellierung wurde eine lineare Optimierung auf Basis einer Zielfunktion durchgeführt. Das Ziel besteht in der Minimierung der Funktion, die aus mehreren Variablen und zugehörigen Gewichtungsfaktoren ohne Nebenbedingungen besteht. Mit Hilfe dieser Optimierung findet eine Übertragung eines mehrdimensionalen Problems auf ein eindimensionales Problem statt. Die Zielfunktion dient der Identifikation eines lokalen Minimums.

Mit Hilfe der linearen Optimierung können kritische Betriebszustände, wie beispielsweise Über- und Unterversorgungen des Antriebsstranges, identifiziert und lokalisiert werden. Im Anschluss kann eine Auslegung des Antriebsstranges unter Berücksichtigung von komponentenspezifischen Entscheidungsvariablen erfolgen.

Für die Durchführung einer linearen Optimierung war es zunächst notwendig, den Antriebsstrang und insbesondere die Zusammenhänge zwischen den Komponenten zu beschreiben. Dies wurde im Rahmen der Entwicklung und Implementierung der Betriebsstrategie durchgeführt. Im Anschluss wurden die Betriebsparameter der Komponenten des Antriebsstranges analysiert, um die physikalischen Grenzen und Betriebsbereiche identifizieren zu können. Auf Basis dieser Untersuchung wurden sowohl die Entscheidungsvariablen und komponentenspezifischen Strafterme als auch eine Zielfunktion definiert.

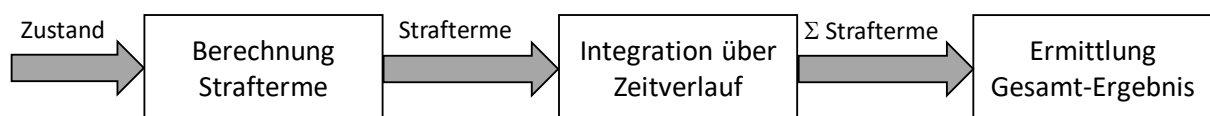
Die Zielfunktion hat die Aufgabe die Zustände der Komponenten des Antriebsstranges zu erfassen und zu quantifizieren. Diese Zustände lassen sich in die drei Bereiche Über- sowie Unterversorgung und Lebensdauer einteilen.

Eine Überversorgung tritt auf, wenn mehr Energie im Antriebsstrang bereitgestellt, als tatsächlich benötigt wird. Daraus resultiert ein ineffizienter Ressourceneinsatz, der beispielsweise einen höheren Kraftstoffverbrauch zur Folge hat. Zusätzlich dazu kann eine Überversorgung zu einer Verringerung der Rekuperationsfähigkeit führen, da unter Umständen überschüssige Energie, je nach Zustand der Energiespeicher, nicht rekuperiert werden kann. Die Erfassung einer Überversorgung dient somit der effizienten Auslegung und Dimensionierung der Komponenten des Antriebsstranges.

Im Vergleich dazu beschreibt eine Unterversorgung eine unzureichende Energiebereitstellung innerhalb des Antriebsstranges. Daraus kann entweder eine Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit sowie -beschleunigung oder eine Nicht-Erfüllung der Fahraufgabe resultieren. Der Zustand einer Unterversorgung sollte vermieden werden.

Im Bereich der Lebensdauer werden alle Zustände erfasst, die eine Degradation einer Komponente des Antriebsstranges begünstigen. Zu diesen Zuständen gehören beispielsweise die Anforderung einer hohen Brennstoffzellen-Dynamik oder ein Lastwechsel des Energiespeichers bei hoher Last. Eine Erfassung der kritischen Betriebszustände dient der Identifikation von hohen Beanspruchungen an die Komponenten des Antriebsstranges und trägt somit zur optimalen Auslegung eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges bei.

Innerhalb des Simulationsmodells ist die Zielfunktion über Strafterme implementiert, wie in **Abbildung 35** dargestellt ist. Insofern resultieren Werte, wenn ein für das Gesamt-Optimum negatives Ereignis eintritt. In der Abbildung ist zu sehen, dass zunächst eine Zustands-erfassung erfolgt. Auf Basis dessen können Strafterme berechnet werden, die über die Simulationszeit integriert werden und somit ein Gesamt-Ergebnis wiedergeben.



**Abbildung 35:** Schematische Umsetzung der Zielfunktion in *Matlab / Simulink*

Als Entscheidungsvariablen der Zielfunktion dienen die Komponenten des elektrischen Antriebsstranges, bestehend aus der Brennstoffzelle, der Batterie, dem Superkondensator und dem Elektromotor. Auf Basis dieser Variablen werden Strafterme für negative Ereignisse erfasst. Die Strafterme dienen der Allokation des Einflusses der jeweiligen Komponente auf das Gesamtergebnis. Als negatives Ereignis wird unter anderem das Über- oder Unterschreiten der SOC-Grenzen der Energiespeicher betrachtet. Die Erfassung erfolgt auf Basis von Zustandsdaten der Gleichstromsammelschiene und dem zugehörigen Datenbus.

Die Strafterme werden zusätzlich mit einem spezifischen Gewichtungsfaktor in der Zielfunktion belegt. Dieser spezifische Gewichtungsfaktor resultiert aus der Tragweite des eingetretenen Ereignisses für die jeweilige Komponente. So ist beispielsweise ein Lastwechsel der Batterie für die Lebensdauer problematischer anzusehen als für den Superkondensator.

Die Zielfunktion sowie das Optimierungsziel sind in den **Formeln 21** und **22** aufgeführt.

$$\min F(\underline{x}); (a, b, c, d \geq 0) \quad (21)$$

$$F(\underline{x}) = a \cdot K_{BZ}(\underline{x}) + b \cdot K_{Batt}(\underline{x}) + c \cdot K_{Superk}(\underline{x}) + d \cdot K_{Elektrom}(\underline{x}) \quad (22)$$

Die Untergliederung der Variablen der Zielfunktion sind in **Tabelle 3** aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass die Variable der Brennstoffzelle in die genutzte Dynamik und das Hochfahren bzw. Abschalten unterteilt sind. Beide Zustände sind als kritisch für die Lebensdauer der Brennstoffzelle anzusehen. Aufgrund der höchsten zugewiesenen Priorität innerhalb der Betriebsstrategie kann es nicht zu kurzzeitigen Über- oder Unterversorgungen des Brennstoffzellen-Systems kommen. Die Komponente des Elektromotors ist in die Bereiche der Rekuperation und der Erfüllung der Fahraufgabe untergliedert. Der Rekuperation ist ein geringerer Gewichtungsfaktor zugewiesen, da dieser Wert der Identifikation von Effizienzpotentialen dient und keine Auswirkung auf die Lebensdauer oder sonstige kritische Zustände hat. Hingegen ist einer Nicht-Erfüllung der Fahraufgabe die größte Gewichtung zugewiesen, da ein Abbruch der Fahraufgabe nicht eintreten darf. Die beiden Energiespeicher Batterie und Superkondensator sind in die Strafterme der genutzten Zwischenspeicherung bzw. dem Über- oder Unterschreiten der SOC-Grenzen und Lastwechsel bei hoher Last gegliedert. Beide Zustände haben einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer des Energiespeichers. Insbesondere die Lastwechsel können die Haltbarkeit der Batterie negativ beeinflussen. Aufgrund der hohen Stromtoleranz ist dieser Effekt beim Superkondensator als weniger kritisch für die Lebensdauer anzusehen, weshalb ihm ein geringerer Gewichtungsfaktor von 0,5 zugeordnet ist.

**Tabelle 3:** Variablen der Zielfunktion

<b>Faktoren der Zielfunktion</b>			
<b>Komponente</b>	<b>Faktor</b>	<b>Notwendige Zustandsdaten</b>	<b>Resultierender Strafterm</b>
<b>Brennstoffzelle</b>	1	Brennstoffzellen-Dynamik	Genutzte Dynamik
		Hochlauf oder Abschalten	Hochlauf / Abschalten der Brennstoffzelle
<b>Elektromotor</b>	2	$\Delta$ -Strom der Gleichstromsammelschiene	Erfüllung der Fahraufgabe (Beschleunigung, Abbruch)
	0,5	Status der Rekuperation	Ungenutzte Rekuperation
<b>Batterie</b>	1	Status des Pufferspeichers (u.a. State-of-Charge)	Genutzte Zwischenspeicherung, Über- oder Unterschreiten der SOC-Grenzen
		Lade- und Entladestatus	Lastwechsel bei hoher Last
<b>Superkondensator</b>	1	Status des Pufferspeichers (u.a. State-of-Charge)	Genutzte Zwischenspeicherung, Über- oder Unterschreiten der SOC-Grenzen
		0,5	Lade- und Entladestatus

---

## 5 Ergebnisse

Innerhalb dieses Kapitels werden die mit Hilfe des generierten Simulationsmodells eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges berechneten Ergebnisse vorgestellt. Als Fahrzyklus dient, wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben, das Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP). Innerhalb der Auswertung erfolgt eine Betrachtung von drei Energiespeicher-Konstellationen - Batterie, Superkondensator und die Kopplung beider. Die drei Varianten werden hinsichtlich ihrer Energie- und Leistungsverteilung, ihrer Systemparameter und der Zielfunktion untersucht.

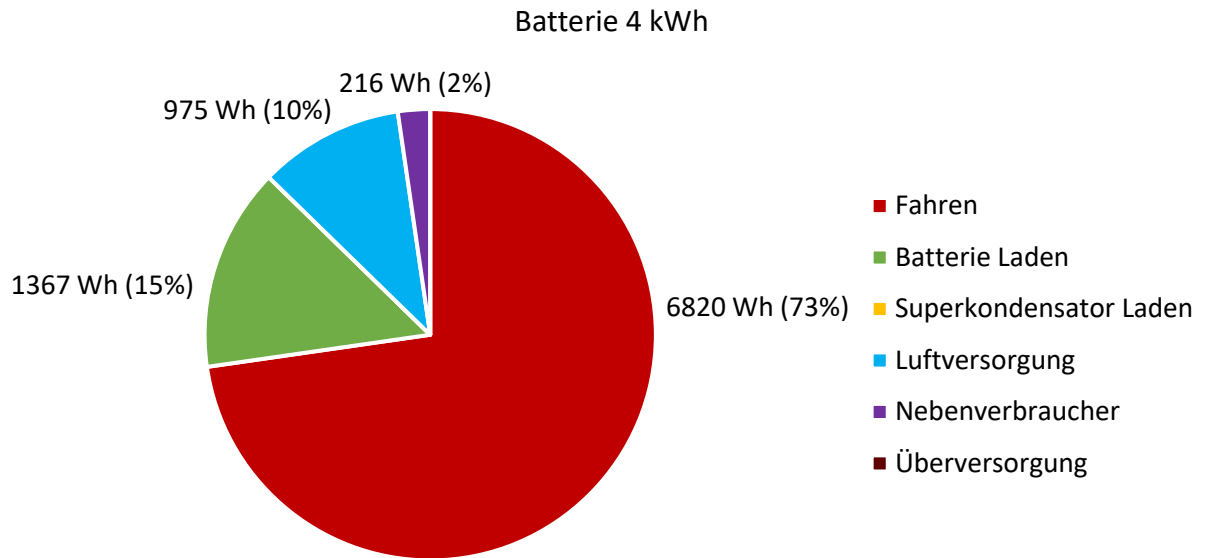
### 5.1 Variante 1: Batterie

Die Berechnungen des elektrischen Antriebsstranges erfolgen zunächst für den Einsatz einer Batterie als Energiespeicher. Denn auf dem Markt verfügbare Brennstoffzellen-Fahrzeuge verfügen über eine Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterie, welche die dynamischen Anforderungen an die Brennstoffzelle reduziert. Auch bietet sie den Vorteil der langfristigen Speicherung, welches eine Konditionierung des Brennstoffzellen-Systems beim Starten oder Abstellen des Fahrzeuges ermöglicht. Die Simulation wurde für eine Lithium-Ionen-Hochleistungs-Zelle mit einer Kapazität von 4 kWh durchgeführt.

#### 5.1.1 Energieverteilung

Im Rahmen der Berechnungen ist es notwendig, die Energieverteilung innerhalb des elektrischen Antriebsstranges zu betrachten. Dafür wurden die Ergebnisse zunächst in die zur Verfügung gestellte Energie und genutzte Energie untergliedert. In **Abbildung 36** ist die genutzte Energie dargestellt, die in die folgenden Zustände eingeteilt wurde:

- Fahren ( $v \neq 0$ )
- Laden der Energiespeicher
- Betreiben der Luftversorgung
- Nebenverbraucher
- Überversorgung

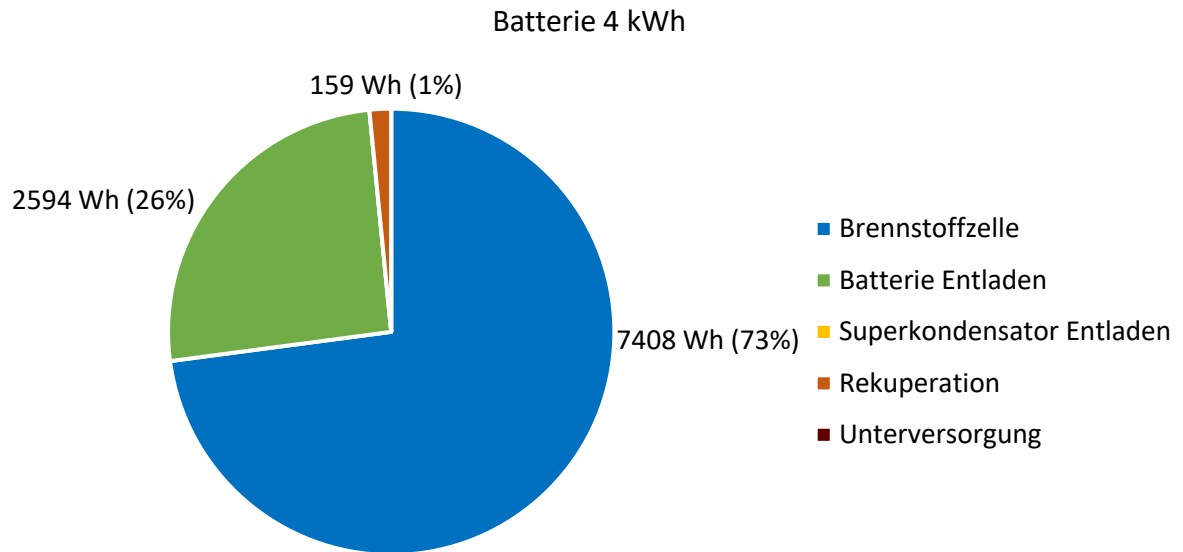


**Abbildung 36:** Genutzte Energie des Antriebsstranges bei Nutzung einer 4 kWh Batterie

Aus **Abbildung 36** geht hervor, dass bei der Durchführung des Zyklus WLTP 73 % der Energie für das Fahren und somit für den Elektromotor genutzt wurden. Von der restlichen Energie wurden 15 % zum Laden der Batterie verwendet. Die Gewährleistung der Luftversorgung hat 10 % der Gesamt-Energie benötigt, wohingegen die Nebenverbraucher mit der angenommenen Grundlast 2 % der Energie in Anspruch genommen haben. Der Zustand der Übersversorgung ist nicht eingetreten. Es kann festgehalten werden, dass es bei einer Batteriekapazität von 4 kWh zu keinem kritischen Betriebszustand im Bereich der Nutzung der Energie gekommen ist.

Für die Analyse des elektrischen Antriebsstrang wird neben der genutzten Energie auch die zur Verfügung gestellte Energie berechnet. Diese ist wiederum unterteilt in die Quellen:

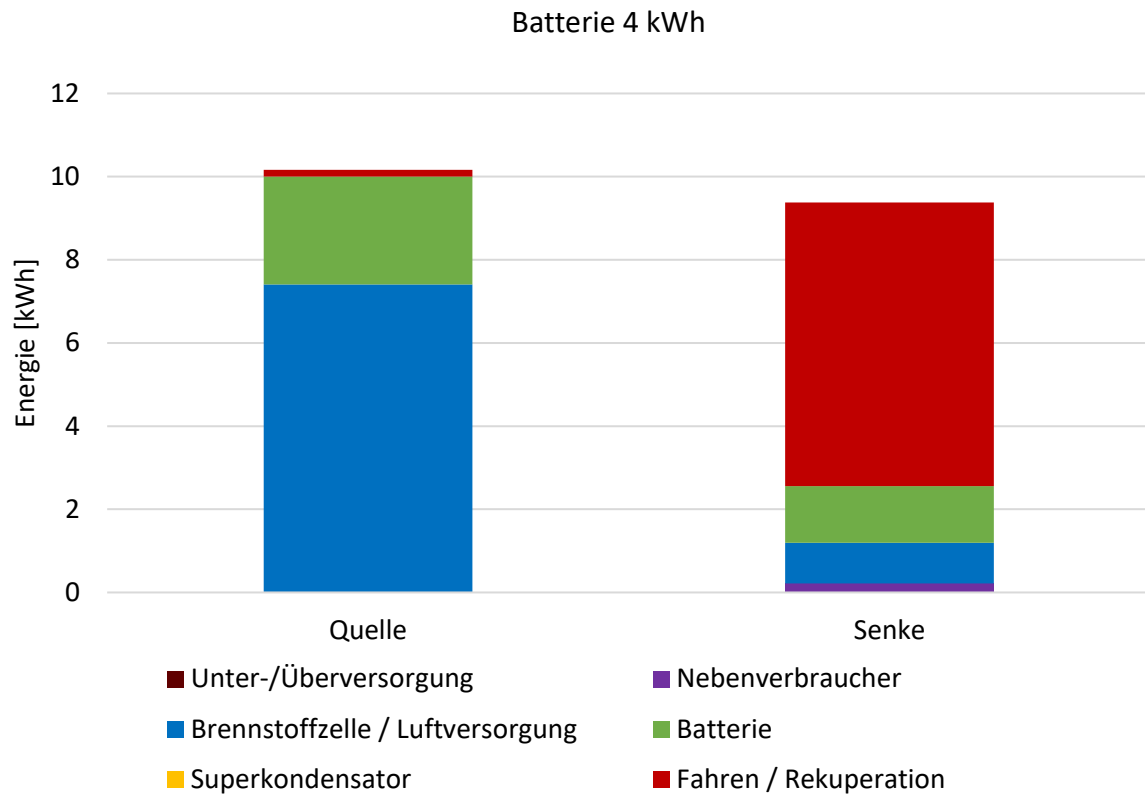
- Brennstoffzelle
- Entladen der Energiespeicher
- Rekuperation
- Unterversorgung



**Abbildung 37:** Zur Verfügung gestellte Energie des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie

Die **Abbildung 37** zeigt die zur Verfügung gestellte Energie des Antriebsstranges bei Nutzung einer Batteriekapazität von 4 kWh. Es ist ersichtlich, dass die meiste Energie zum Betreiben des Fahrzeuges von der Brennstoffzelle erzeugt wird. Diese liefert im WLTP 7408 Wh bzw. 73 %. Im Vergleich dazu stellt die Batterie 26 % der Energie im Antriebsstrang zur Verfügung. Es kann zudem geschlussfolgert werden, dass die genutzte Rekuperation mit einem Anteil von 1 % eine geringe Effizienzsteigerung des Antriebsstranges zur Folge hat.



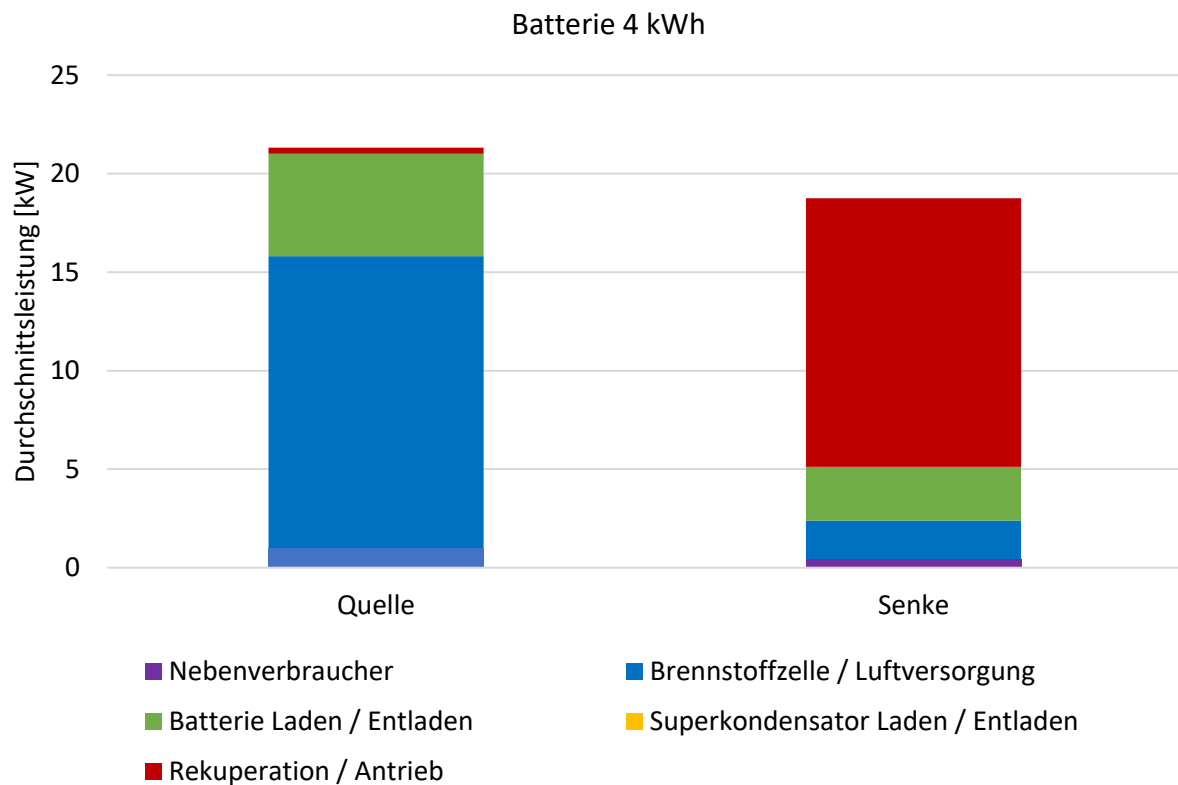


**Abbildung 38:** Energieverteilung des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie

Die Betrachtung der gesamten Energieverteilung, die in **Abbildung 38** zu sehen ist, dient der Gegenüberstellung der genutzten und zur Verfügung gestellten Energie im elektrischen Antriebsstrang des FCEV. Es geht aus der Abbildung hervor, dass das Fahren größtenteils von der Brennstoffzelle umgesetzt wird. Die Batterie mit einer Kapazität von 4 kWh gleicht die dynamischen Lastanforderung aus, steigert allerdings kaum die Rekuperationsfähigkeit.

### 5.1.2 Leistungsverteilung

Im Rahmen der Auswertung erfolgt neben der Betrachtung der Energieverteilung auch die Berücksichtigung der Leistungsverteilung. Diese gibt Auskunft darüber, welche Durchschnittsleistung durch welche Komponente zur Verfügung gestellt bzw. genutzt wird. Insofern erfolgt eine komponentenbasierte Unterteilung in die Energieflussrichtung.



**Abbildung 39:** Leistungsverteilung des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie

Aus **Abbildung 39** geht hervor, dass die Brennstoffzelle beim Fahrzyklus WLTP eine Durchschnittsleistung von 14,8 kW dem Antriebsstrang zur Verfügung stellt. Davon werden allerdings 1,95 kW von der Luftversorgung in Anspruch genommen. Ebenfalls ist ersichtlich, dass die Rekuperation einen sehr geringen Anteil aufweist.

### 5.1.3 Systemparameter

Im Rahmen der Simulation wurden die Systemparameter des Antriebsstranges erfasst. Zu diesen gehören

- die durchschnittliche Effizienz des Brennstoffzellen-Systems,
- der Anteil des dynamischen Betriebes für die Brennstoffzelle, die Energiespeicher und den Elektromotor,
- der durchschnittliche Ladezustand der Energiespeicher sowie
- der prozentuale Anteil der rekuperierten Energie.

Diese Systemparameter geben Auskunft über die Effizienz und den Zustand der Komponenten des elektrischen Antriebsstranges.

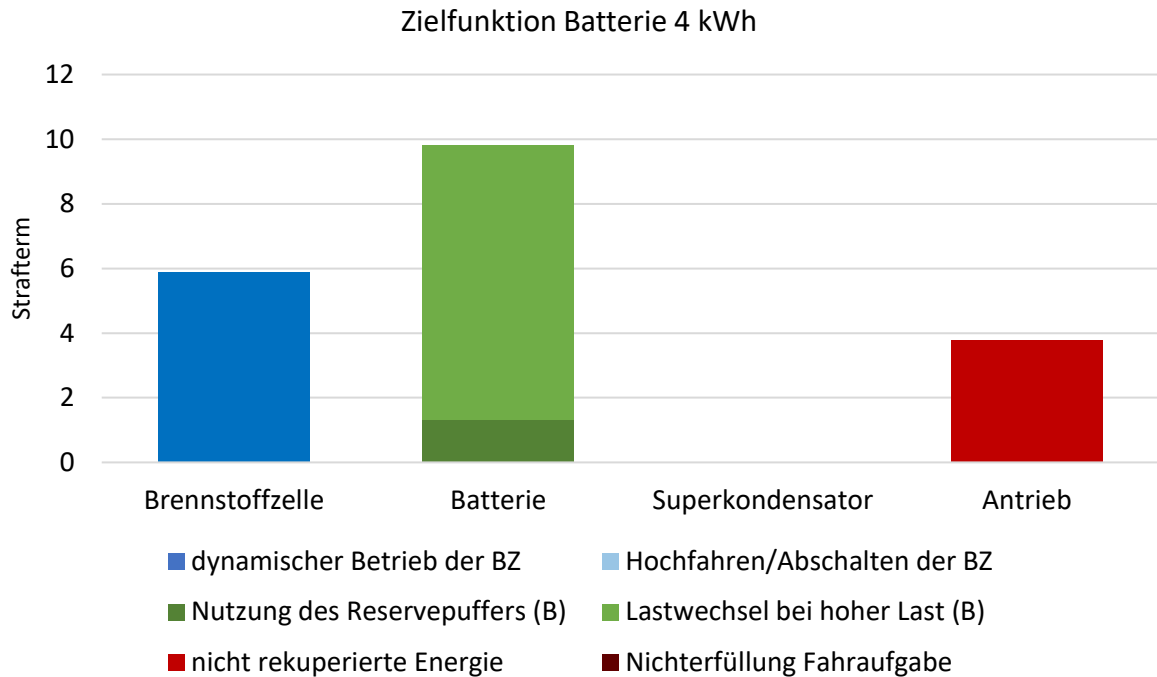
**Tabelle 4:** Systemparameter des Antriebsstranges bei Nutzung einer Batterie mit 4 kWh Kapazität

Systemparameter 4 kWh Batterie				
Komponente	Ø-Effizienz	Dynamikanteil	Ø-Ladezustand	Rekuperation
Brennstoffzelle	48,7 %	38,5 %		
Batterie		64,1 %	37,2 %	
Superkondensator				
Antrieb		86,3 %		20 %

Aus **Tabelle 4** ist ersichtlich, dass die Effizienz des Brennstoffzellen-Systems durchschnittlich einen Wert von 48,7 % aufweist. Neben der energieintensiven Luftversorgung wird diese Effizienz durch die dynamischen Lastwechsel, die einen Anteil von 38,5 % haben, reduziert. Die dynamischen Lastwechsel werden größtenteils durch die Batterie ausgeglichen, aber haben dennoch eine Anpassung des Lastpunktes der Brennstoffzelle zur Folge. Eine Verschiebung des Lastpunktes findet auf Basis der hinterlegten Strom-Spannungs-Kurve der Brennstoffzelle statt. Der größte Anteil des dynamischen Betriebs obliegt dem Elektromotor, da dieser der Fahraufgabe folgt.

#### 5.1.4 Zielfunktion

Innerhalb des Simulationsmodells ist eine Zielfunktion implementiert. Diese dient der linearen Optimierung und unterstützt die Auslegung des Antriebsstranges. In **Abbildung 40** ist die Zielfunktion für eine Batteriekapazität von 4 kWh dargestellt.



**Abbildung 40:** Zielfunktion bei 4 kWh Batterie

Aus **Abbildung 40** geht hervor, dass bei dieser Auslegung des Antriebsstranges ein Strafterm durch dynamischen Betrieb der Brennstoffzelle resultiert. Diese Lastwechsel sind bereits in der Auswertung der Systemparameter dargestellt. Des Weiteren hat die Batterie trotz ihrer vergleichsweise hohen Kapazität einen hohen Strafterm durch Lastwechsel zugeordnet. Die Lastwechsel erfolgen bei hoher Last, es kommt also zum kurzzeitigen Spitzenbetrieb der Batterie. Darüber hinaus ist auf Basis der Zielfunktion nochmals der geringe Anteil an rekuperierter Energie zu sehen.

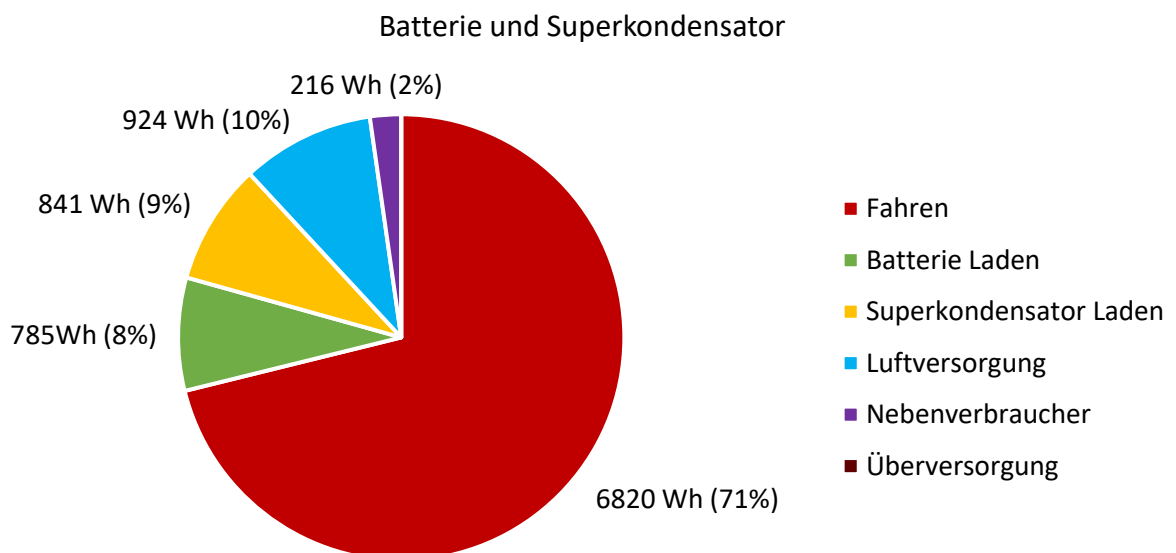
Abschließend kann festgehalten werden, dass es trotz einer Batteriekapazität von 4 kWh häufig zu einer Lastpunktverschiebung der Brennstoffzelle kommt. Zudem weist der Antriebsstrang ein hohes Potential für Rekuperation auf, welches bei der alleinigen Nutzung einer Batterie nicht ausgeschöpft wird. Diese Tatsache ist begründet auf den Systemparametern der Lithium-Ionen-Hochleistungs-Zelle, die auf einen kurzzeitigen Spitzenbetrieb ausgelegt ist. Der Überlastbetrieb wird für den Ausgleich der dynamischen Lastanforderung des Brennstoffzellen-Systems bereits in Anspruch genommen, da der Brennstoffzelle die höchste Priorität innerhalb des Antriebsstranges zugewiesen ist. Die Rekuperation hat einen geringeren Stellenwert in der Betriebsstrategie, da sie die Lebensdauer der Komponenten nicht beeinflusst und somit keinen kritischen Betriebszustand zur Folge hat.

## 5.2 Variante 2: Batterie und Superkondensator

Im Rahmen der Analyse der Ergebnisse der Variante 1, die nur die Batterie als Energiespeicher vorsieht, wurden Effizienzpotentiale identifiziert. Insbesondere die Spitzenlastfähigkeit der Batterie hatte einen negativen Einfluss auf die Rekuperationsfähigkeit und somit Effizienz des Antriebsstranges. Aus diesem Grund wurde ein Superkondensator als zweiter Energiespeicher in das Simulationsmodell implementiert.

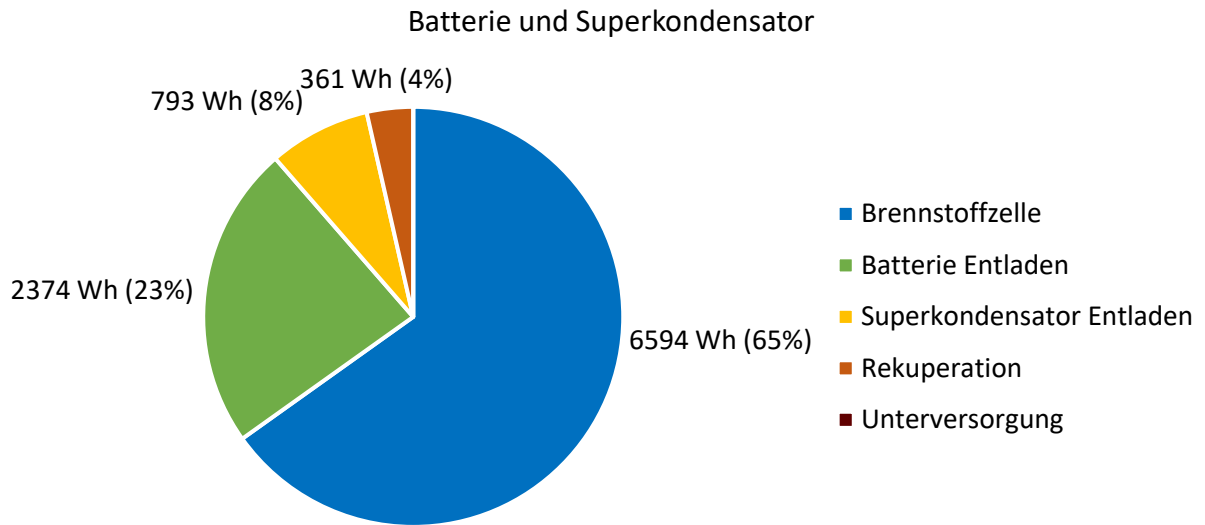
### 5.2.1 Energieverteilung

Zunächst ist in **Abbildung 41** die genutzte Energie des Antriebsstranges bei der Energie-speicherkonstellation Batterie und Superkondensator dargestellt. Zusätzlich zur Batterie mit einer Kapazität von 3 kWh wurde ein gering dimensionierter Superkondensator mit einer Kapazität von 1 F integriert.



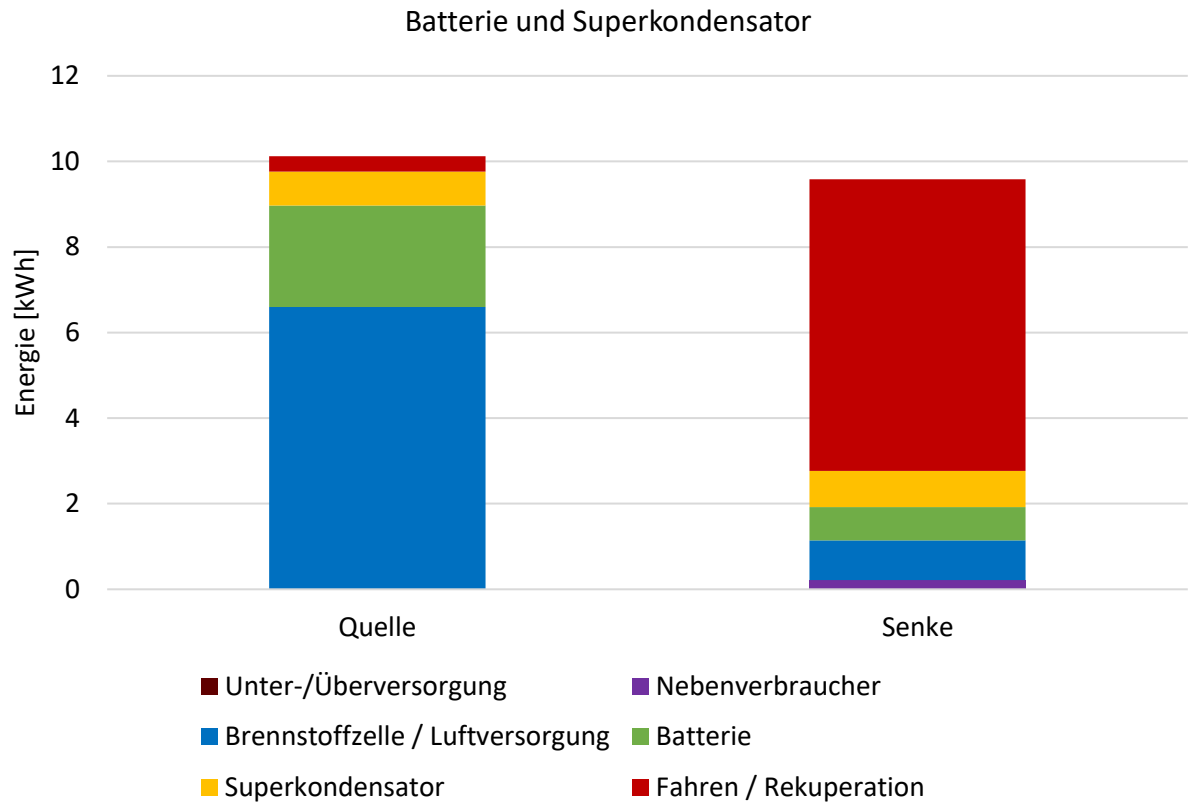
**Abbildung 41:** Genutzte Energie des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator

Es kann festgehalten werden, dass ebenso wie in Variante 1, der größte Anteil der Energie zum Fahren genutzt wird. Auch kann aus der Abbildung entnommen werden, dass die energieintensive Luftversorgung der Brennstoffzelle gewährleistet wird. Darüber hinaus wird die vom Antriebsstrang zur Verfügung gestellte Energie zum Laden beider Energiespeicher in nahezu gleichen Teilen verwendet.



**Abbildung 42:** Energiebereitstellung des elektrischen Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator

Im Bereich der zur Verfügung gestellten Energie ist zu sehen, dass es zu einer Reduzierung der Brennstoffzellenleistung kommt. Der Anteil ist von 73 % in Variante 1 auf 65 % gesunken. Diese Reduktion ist dadurch bedingt, dass zusätzlich zur Batterie der Superkondensator dem Antriebsstrang Energie zur Verfügung stellt. Darüber hinaus ist eine Vervielfachung von 1 % auf 4 % der rekuperierten Energie zu beobachten.

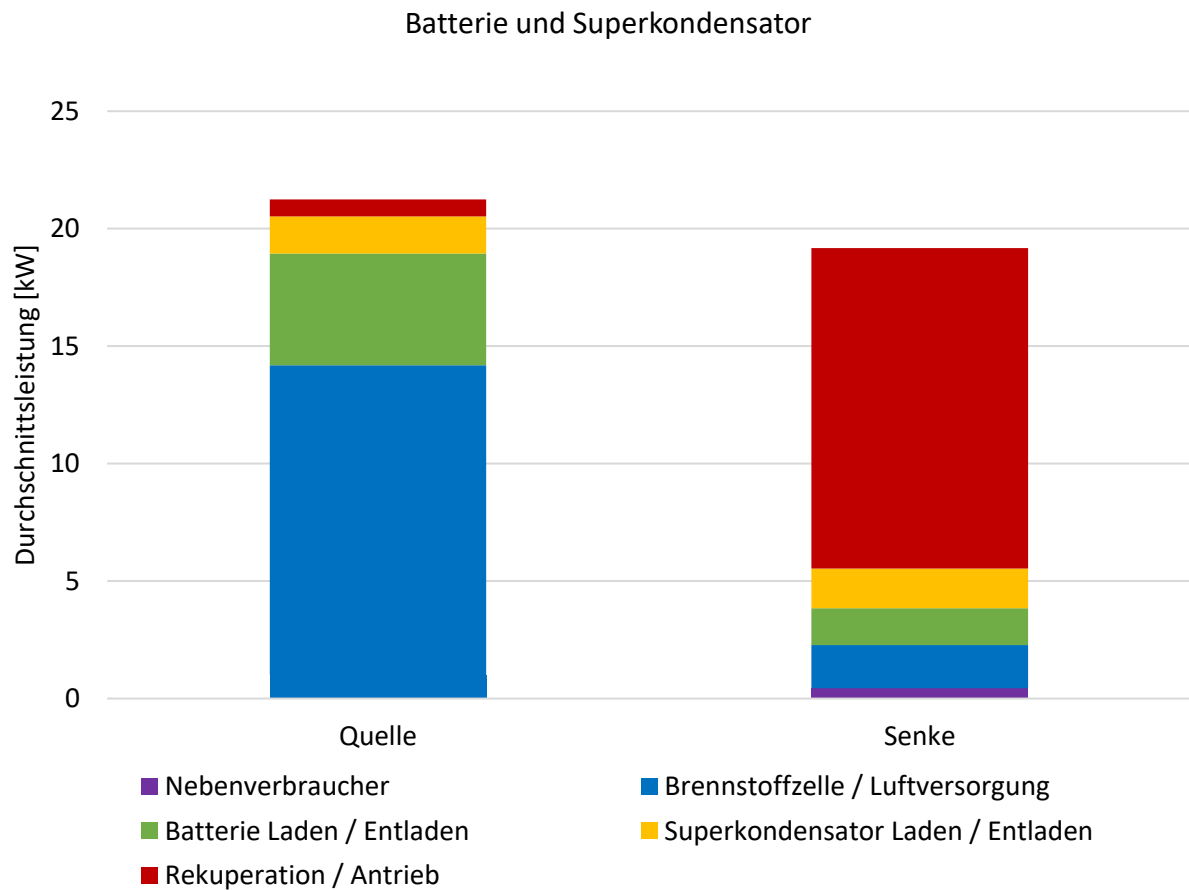


**Abbildung 43:** Energieverteilung des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator

Bei der Gegenüberstellung der Energieverteilung des gesamten Antriebsstranges in der vorherigen Abbildung ist deutlich zu sehen, dass der Elektromotor vermehrt Energie durch die Energiespeicher zur Verfügung gestellt bekommt. Die Konstellation der beiden Energiespeicher hat eine Reduktion der benötigten Brennstoffzellenleistung und eine Erhöhung der rekuperierten Energie zur Folge.

### 5.2.2 Leistungsverteilung

Im Rahmen der Betrachtung der Leistungsverteilung ist diese Entwicklung ebenfalls zu beobachten. Es findet eine Umverteilung der zur Verfügung gestellten Leistung statt, sodass die Brennstoffzelle bei geringerer Last betrieben werden kann.



**Abbildung 44:** Leistungsverteilung des elektrischen Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator



### 5.2.3 Systemparameter

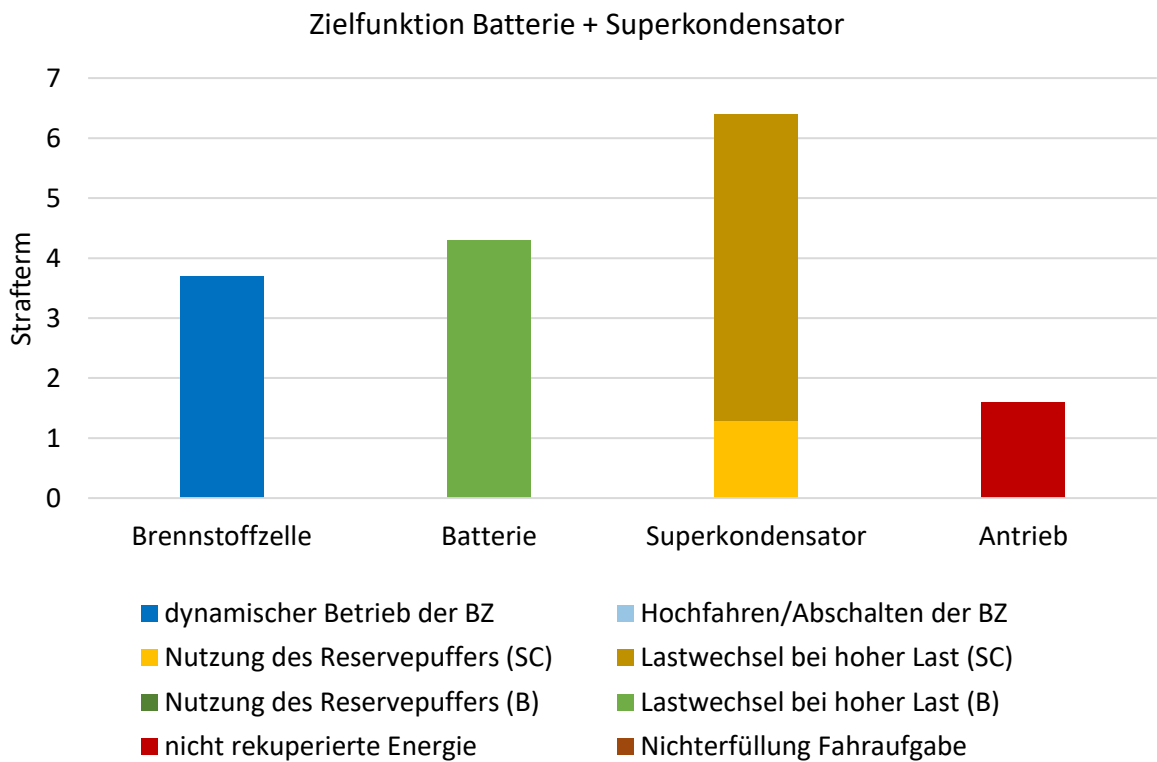
Die Analyse der Systemparameter spiegelt diesen Trend ebenfalls wieder. Es ist zu sehen, dass die Effizienz der Brennstoffzelle aufgrund ihres vermehrten Teillastbetriebes auf über 50 % ansteigt. Auch ist der Anteil des dynamischen Betriebes von 38,5 % auf 27,4 % gesunken. Des Weiteren ist zu beobachten, dass der Anteil des dynamischen Betriebes der Batterie konstant bleibt. Jedoch ist dieser dynamische Anteil beim Superkondensator deutlich höher, welches durch die hohe Lade- und Entladestromtoleranz bedingt ist. Zusätzlich zu dieser Entwicklung hat sich der Anteil der rekuperierten Energie mehr als verdoppelt.

**Tabelle 5:** Systemparameter des Antriebsstranges bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator

<b>Systemparameter 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator</b>				
<b>Komponente</b>	<b>Ø-Effizienz</b>	<b>Dynamikanteil</b>	<b>Ø-Ladezustand</b>	<b>Rekuperation</b>
Brennstoffzelle	52,8 %	27,4 %		
Batterie		41,7 %	41,9 %	
Superkondensator		79,5 %	57,1 %	
Antrieb		86,3 %		45,9 %

### 5.2.4 Zielfunktion

Die **Abbildung 45** zeigt die Zielfunktion der Variante 2. Es ist klar ersichtlich, dass der Anteil des dynamischen Betriebes der Brennstoffzelle reduziert ist. Darüber hinaus entfällt der Strafterm durch Nutzung des Reservepuffers, sprich Über- oder Unterschreiten der vorgegebenen SOC-Grenzen, bei der Batterie. Hingegen entsteht ein Strafterm durch Lastwechsel beim Superkondensator. Jedoch haben diese Lastwechsel beim Superkondensator im Vergleich zur Batterie einen geringeren Einfluss auf die Lebensdauer des Energiespeichers.



**Abbildung 45:** Zielfunktion bei 4 kWh Batterie und 1 F Superkondensator

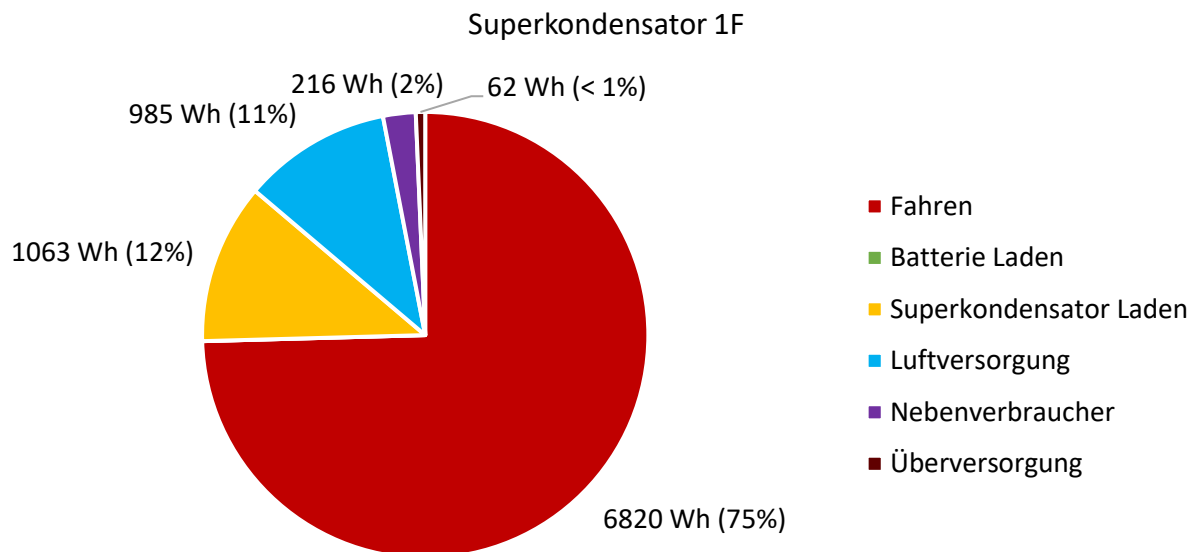
### 5.3 Variante 3: Superkondensator 1F / 3F

In Variante 3 wird die alleinige Nutzung eines Superkondensators untersucht. Die Kapazität des Superkondensators wurde zunächst mit 1 F angenommen. Im Zuge der Berechnungen hat sich allerdings herausgestellt, dass bei Entfall der Batterie mit 4 kWh ein kleiner Superkondensator kritische Betriebszustände zur Folge hat. Aus diesem Grund wurden weitere Berechnungen mit einer Kapazität von 3 F durchgeführt.

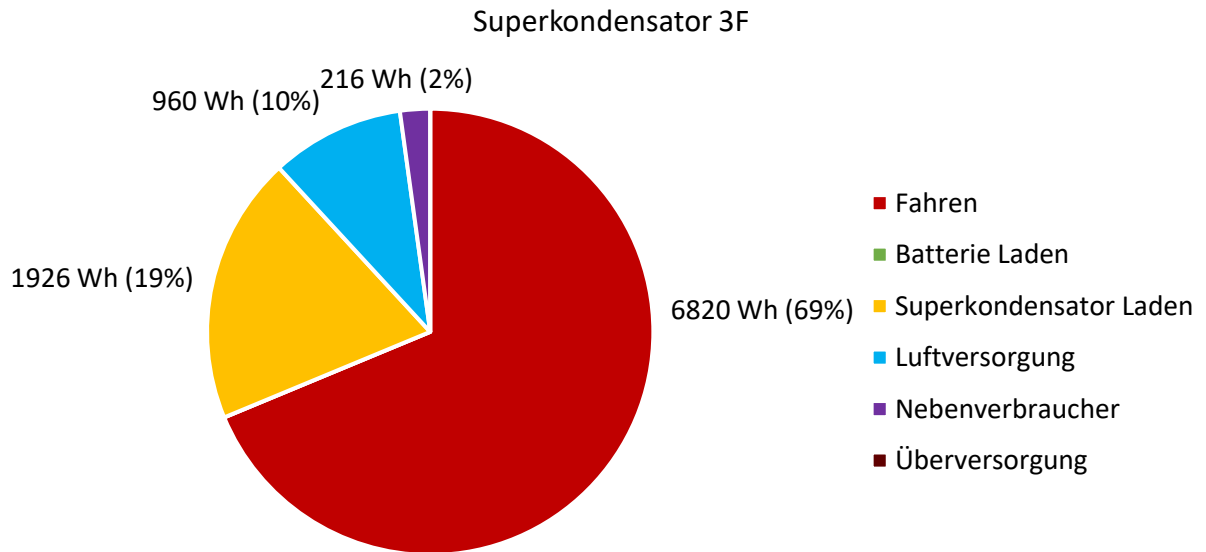
#### 5.3.1 Energieverteilung

In den nachfolgenden Abbildungen ist der Energieverbrauch des Antriebsstranges für die beiden Superkondensator-Kapazitäten 1 F und 3 F dargestellt.

Aus **Abbildung 46** geht hervor, dass es zur einer kurzzeitigen Überversorgung gekommen ist. Es konnte dementsprechend bei kleiner Kapazität nicht die dynamische Anforderung des Antriebsstranges erfüllt werden. Zusätzlich dazu ist zu sehen, dass bei größerer Kapazität mehr Energie vom Superkondensator zum Laden genutzt wird - 19 % anstatt 12 %.

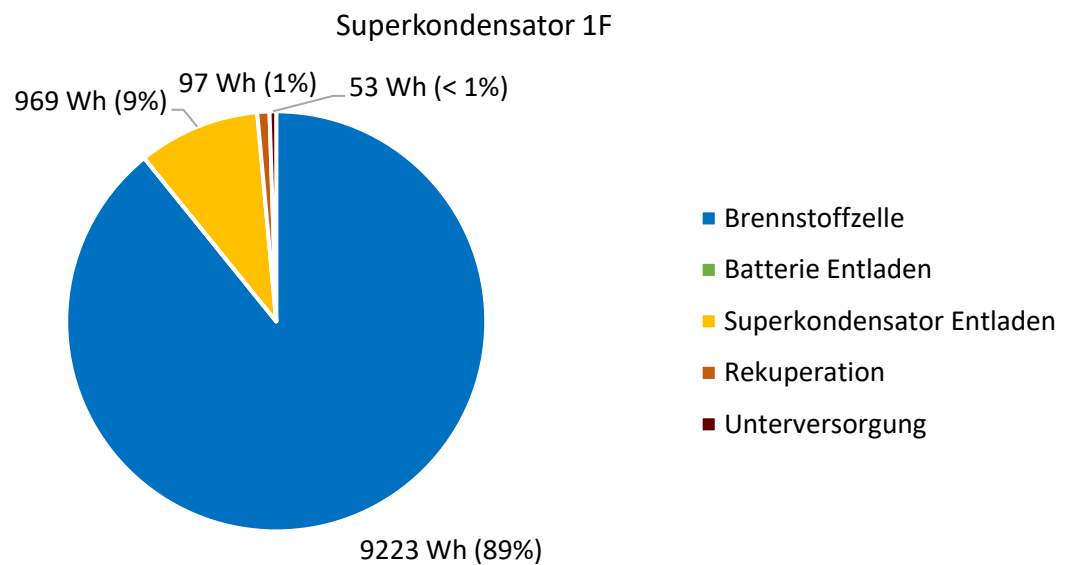


**Abbildung 46:** Energieverbrauch des Antriebsstranges bei 1 F Superkondensator

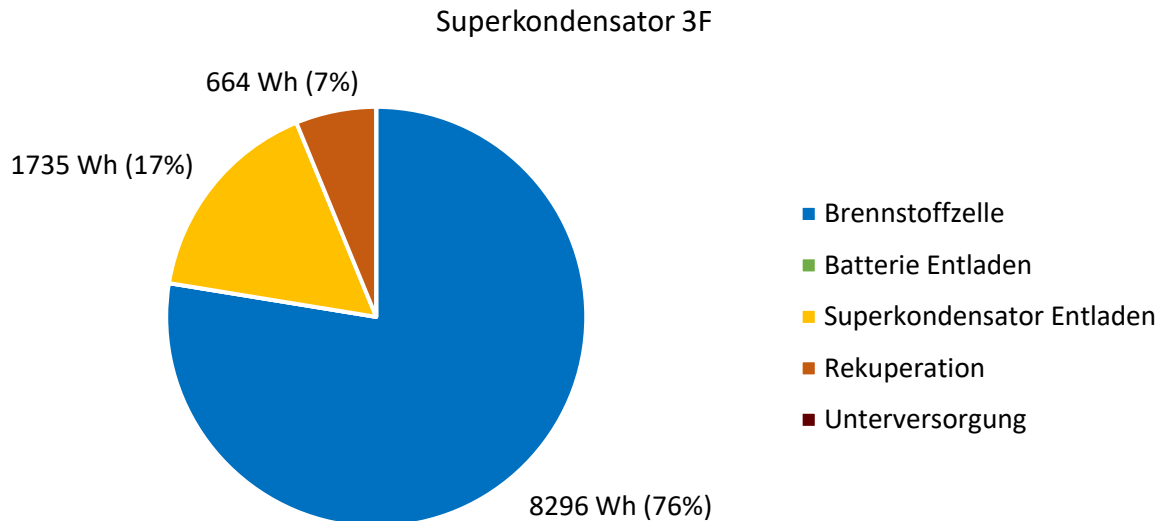


**Abbildung 47:** Energieverbrauch des Antriebsstranges bei 3 F Superkondensator

Zusätzlich zum Energieverbrauch ist in den nachfolgenden **Abbildungen 48** und **49** die zur Verfügung gestellte Energie des elektrischen Antriebsstranges für beide Kapazitäten dargestellt.

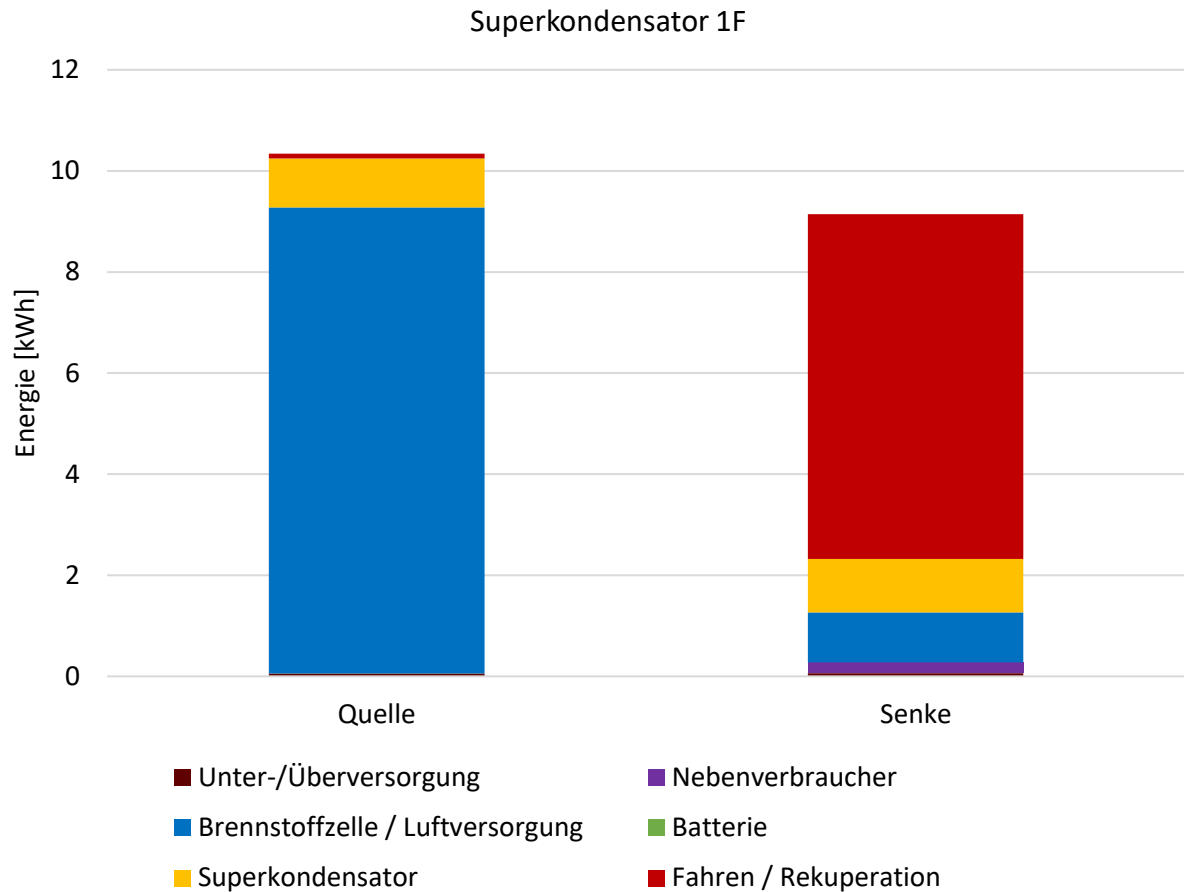


**Abbildung 48:** Zur Verfügung gestellte Energie des Antriebsstranges bei 1 F Superkondensator



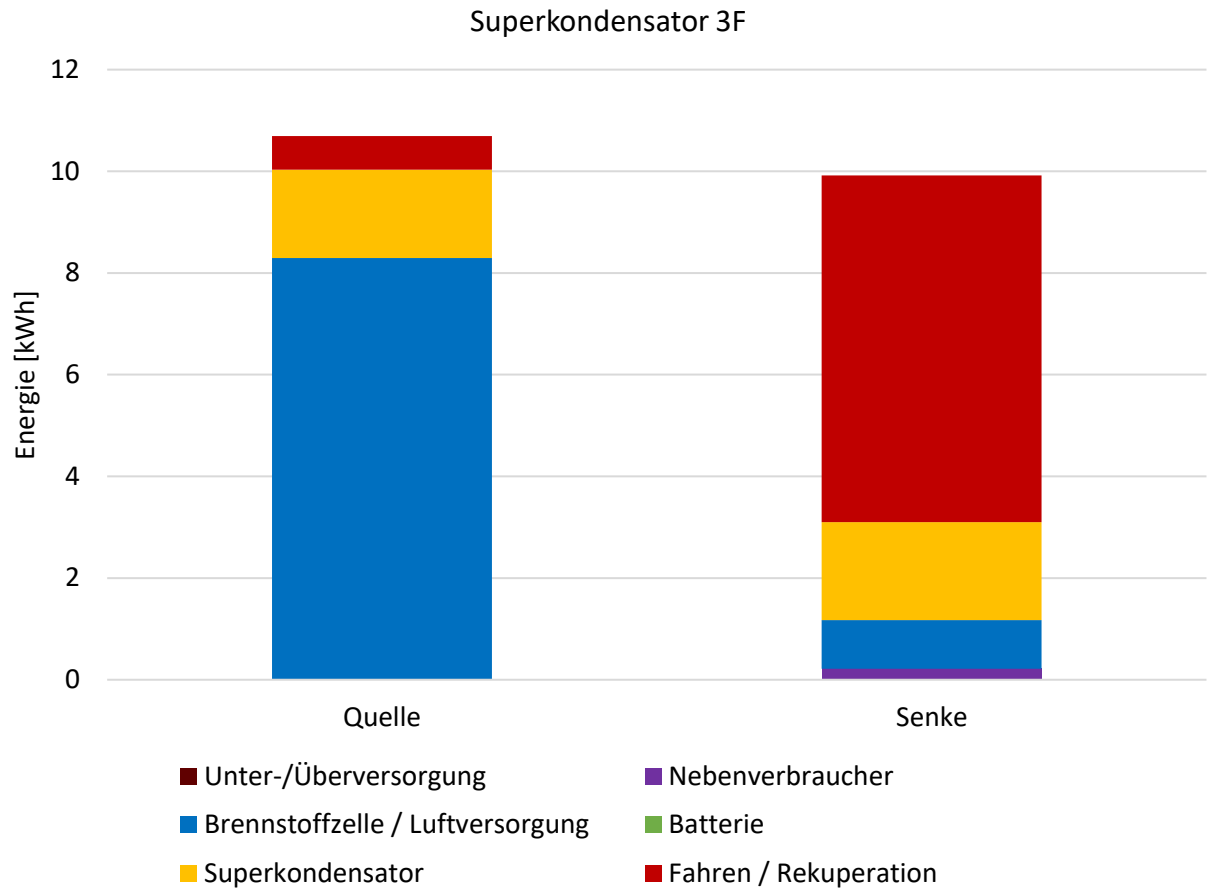
**Abbildung 49:** Zur Verfügung gestellte Energie des Antriebsstranges bei 3 F Superkondensator

Aus den Abbildungen kann entnommen werden, dass die Brennstoffzelle bei einer Kapazität von 1 F 89 % der Energie zur Verfügung stellen muss. Dennoch konnte die Brennstoffzelle der dynamischen Anforderung des Elektromotors nicht vollumfänglich folgen, da es zu einer kurzzeitigen Unterversorgung des Antriebsstranges gekommen ist. Des Weiteren ist in **Abbildung 48** dargestellt, dass die Rekuperation einen Anteil von 1 % aufweist. Hingegen kann bei größerer Kapazität ein Anteil von 7 % genutzt werden. Dies entspricht nahezu einer Verdopplung der Rekuperationsfähigkeit im Vergleich zu Variante 2. Insofern kann geschlussfolgert werden, dass der Superkondensator aufgrund der hohen Stromtoleranz einen enormen Einfluss auf die Rekuperationseffizienz des Antriebsstranges hat.



**Abbildung 50:** Energieverteilung des Antriebsstranges bei 1 F Superkondensator

Im Rahmen der Gegenüberstellung der genutzten und zur Verfügung gestellten Energie ist ebenfalls erkennbar, dass die Brennstoffzelle bei kleiner Kapazität einen erheblichen Anteil der Energie zur Verfügung stellen muss. Die Brennstoffzelle muss der dynamischen Anforderung des Elektromotors gerecht werden, um die Fahraufgabe zu erfüllen. Dieser dynamische Betrieb hat einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer der Brennstoffzelle sowie die Effizienz des Systems.



**Abbildung 51:** Energieverteilung des Antriebsstranges bei 3 F Superkondensator

Bei Nutzung eines größeren Superkondensators wird hingegen die Leistung der Brennstoffzelle reduziert. Die zur Verfügung gestellte Energie wird zu einem größeren Anteil für das Laden des Superkondensators genutzt, sodass dieser die dynamische Lastanforderung an die Brennstoffzelle reduzieren kann. Zudem kann mit Hilfe des Superkondensators die Rekuperationsfähigkeit optimiert werden.

5.3.2 Leistungsverteilung

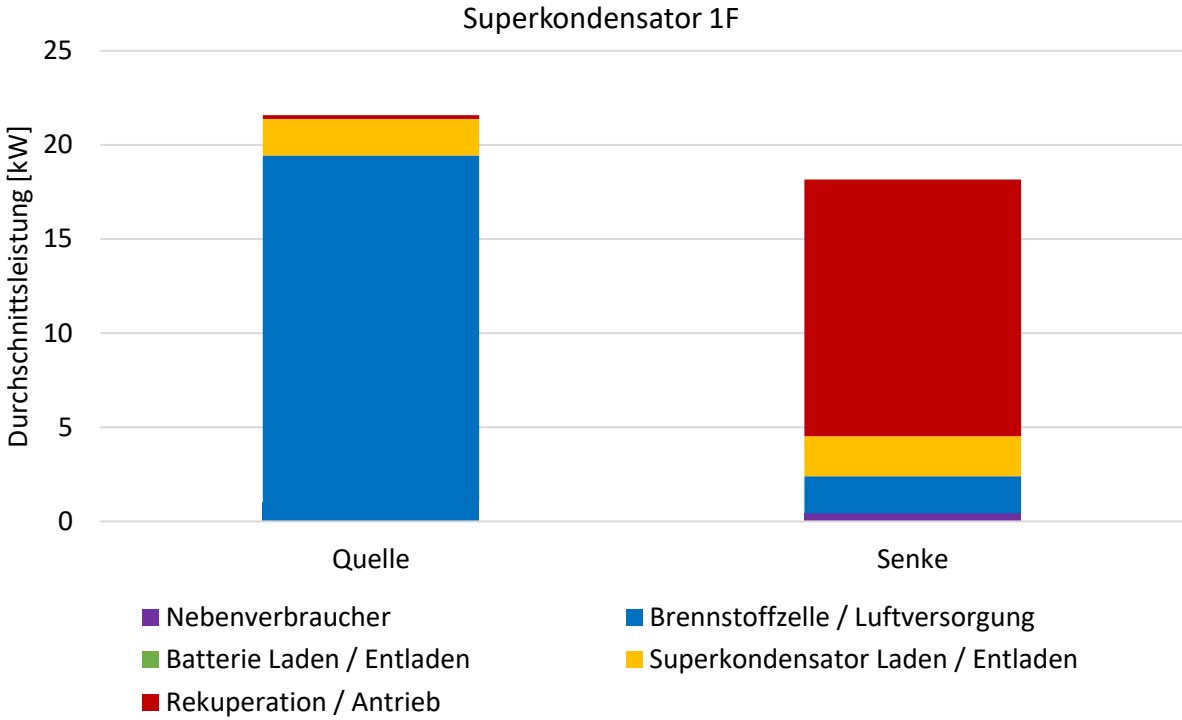


Abbildung 52: Leistungsverteilung des Antriebsstranges bei 1 F Superkondensator

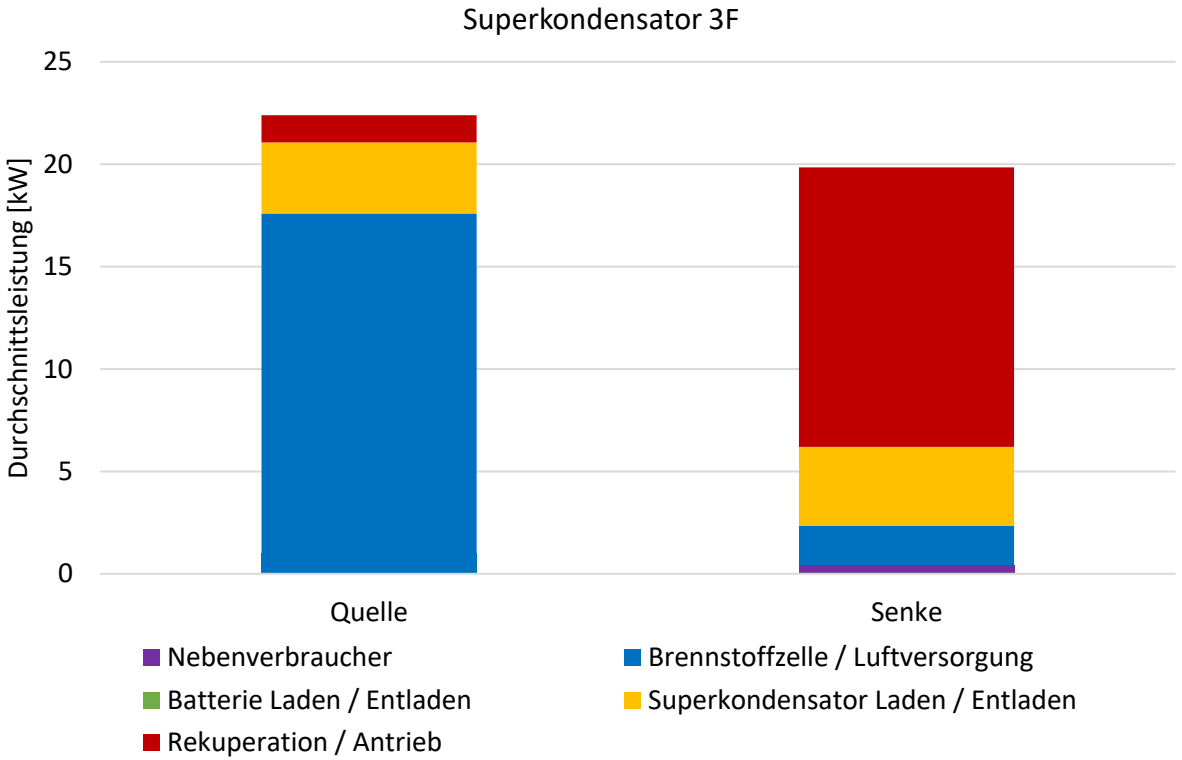


Abbildung 53: Leistungsverteilung des Antriebsstranges bei 3 F Superkondensator



In **Abbildung 52** sowie **Abbildung 53** sind die Leistungsverteilungen dargestellt. Aus dem Vergleich ist zu entnehmen, dass die Leistung der Brennstoffzelle bei größerer Kapazität nur wenig reduziert wird. Die zur Verfügung gestellte Energie wird hingegen nicht zum Fahren, sondern zum Laden des Superkondensators genutzt. Ebenso verhält es sich mit dem Anteil der rekuperierten Energie, die bei beiden Varianten eine ähnliche Durchschnittsleistung zur Verfügung stellt. Allerdings kann diese Energie bei kleinerer Kondensatorkapazität nicht durch den Superkondensator aufgenommen werden, sondern muss über die Betriebsbremse thermisch abgeführt werden.

### 5.3.3 Systemparameter

Die **Tabelle 6** zeigt die Systemparameter des elektrischen Antriebsstranges für eine Kapazität von 1 F. Es ist zu sehen, dass die Effizienz der Brennstoffzelle trotz des hohen Anteils an dynamischen Betriebszuständen einen Wert von 53,5 % annimmt. Diese Tatsache ist bedingt durch die hohe Stromtoleranz des Superkondensators, denn somit kann eine bessere Lastpunktverschiebung der Brennstoffzelle erfolgen. Dadurch nimmt zwar der Anteil des dynamischen Betriebs nicht ab, aber die Lastpunkte können entsprechend der Parameter der Brennstoffzelle angepasst werden. Darüber hinaus kann geschlossen werden, dass der Ladezustand des Superkondensators sehr hoch ist. Diese Tatsache kann im Wesentlichen auf die geringe Kapazität zurückgeführt werden.

**Tabelle 6:** Systemparameter des Antriebsstranges bei 1 F Superkondensator

Systemparameter 1 F Superkondensator				
Komponente	Ø-Effizienz	Dynamikanteil	Ø-Ladezustand	Rekuperation
Brennstoffzelle	53,5 %	45,3 %		
Batterie				
Superkondensator		82,4 %	61,9 %	
Antrieb		86,3 %		12,2 %

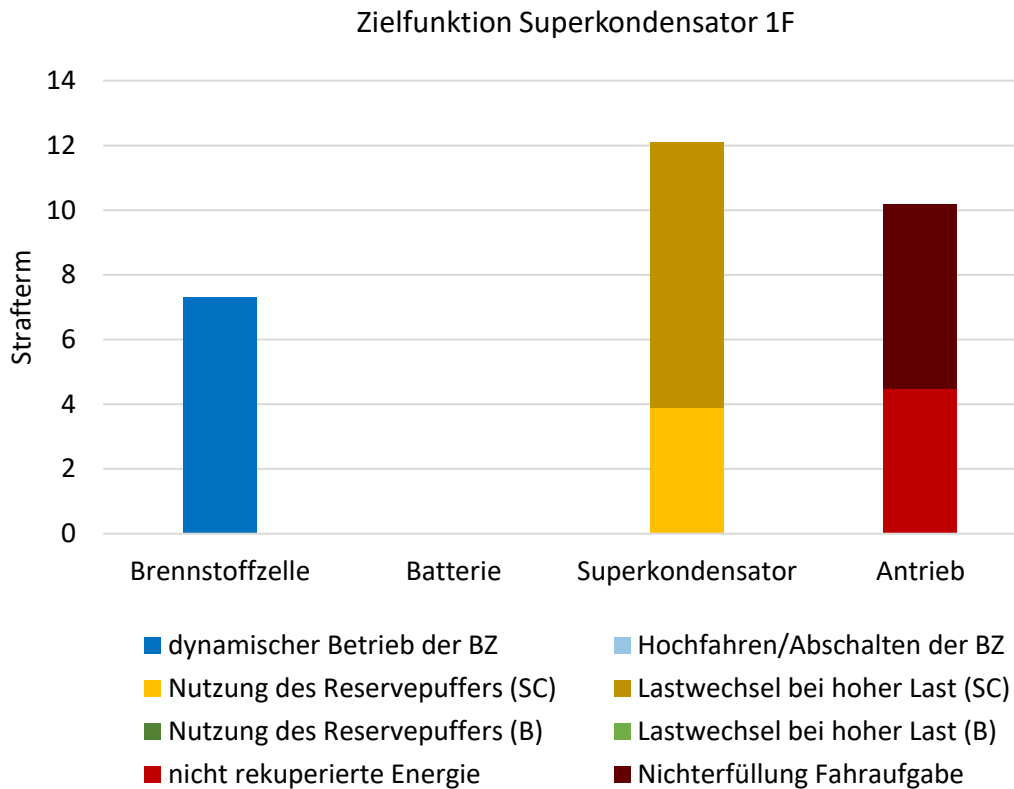
Die **Tabelle 7** zeigt die Systemparameter des Antriebsstranges bei einem Superkondensator mit einer Kapazität von 3 F. Es ist ersichtlich, dass der Anteil des dynamischen Betriebs der Brennstoffzelle von 45,3 % auf 34,7 % reduziert wurde. Dadurch kann ein positiver Effekt auf die Lebensdauer der Brennstoffzelle erreicht werden. Zudem kann entnommen werden, dass der Anteil der rekuperierten Energie trotz des konstanten Anteils des dynamischen Betriebes des Superkondensators stark angestiegen ist. Dies ist begründet durch die größere Kapazität und den geringeren durchschnittlichen Ladezustand.

**Tabelle 7:** Systemparameter des Antriebsstranges bei 3 F Superkondensator

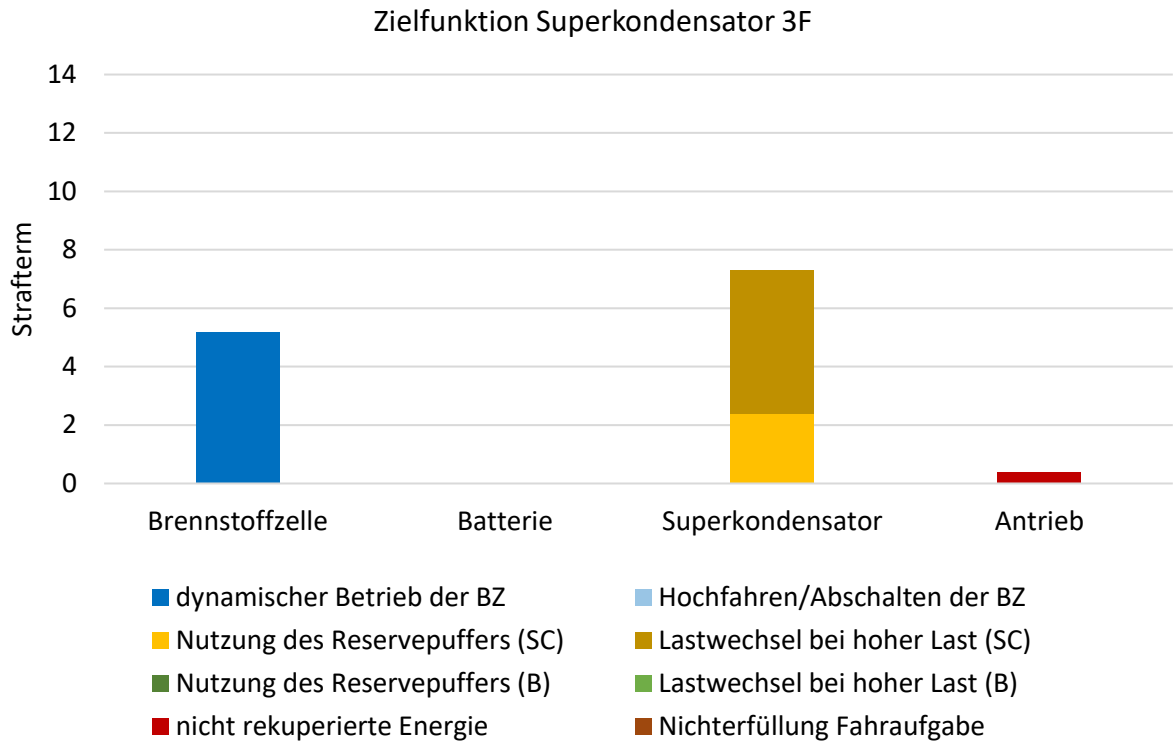
<b>Systemparameter 3 F Superkondensator</b>				
<b>Komponente</b>	<b>Ø-Effizienz</b>	<b>Dynamikanteil</b>	<b>Ø-Ladezustand</b>	<b>Rekuperation</b>
Brennstoffzelle	53,2 %	34,7 %		
Batterie				
Superkondensator		81,6 %	52,4 %	
Antrieb		86,3 %		83,3 %

### 5.3.4 Zielfunktion

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Strafterme der Zielfunktion für die Komponenten des Antriebsstranges aufgeführt. In **Abbildung 54** ist zu sehen, dass der dynamische Betrieb der Brennstoffzelle einen hohen Strafterm zur Folge hat. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass bei einer Kapazität von 1 F die vorgegebenen Lade- und Entladegrenzen des Superkondensators über- und unterschritten werden. Dies betrifft insbesondere die Überladefähigkeit des Superkondensators, die zugunsten der Brennstoffzelle genutzt wird. Darüber hinaus kann festgehalten werden, dass die Leistungsanforderung gemäß des Fahrzyklus bei geringerer Kapazität des Superkondensators nicht vollständig erfüllt werden konnte.



**Abbildung 54:** Zielfunktion bei 1 F Superkondensator



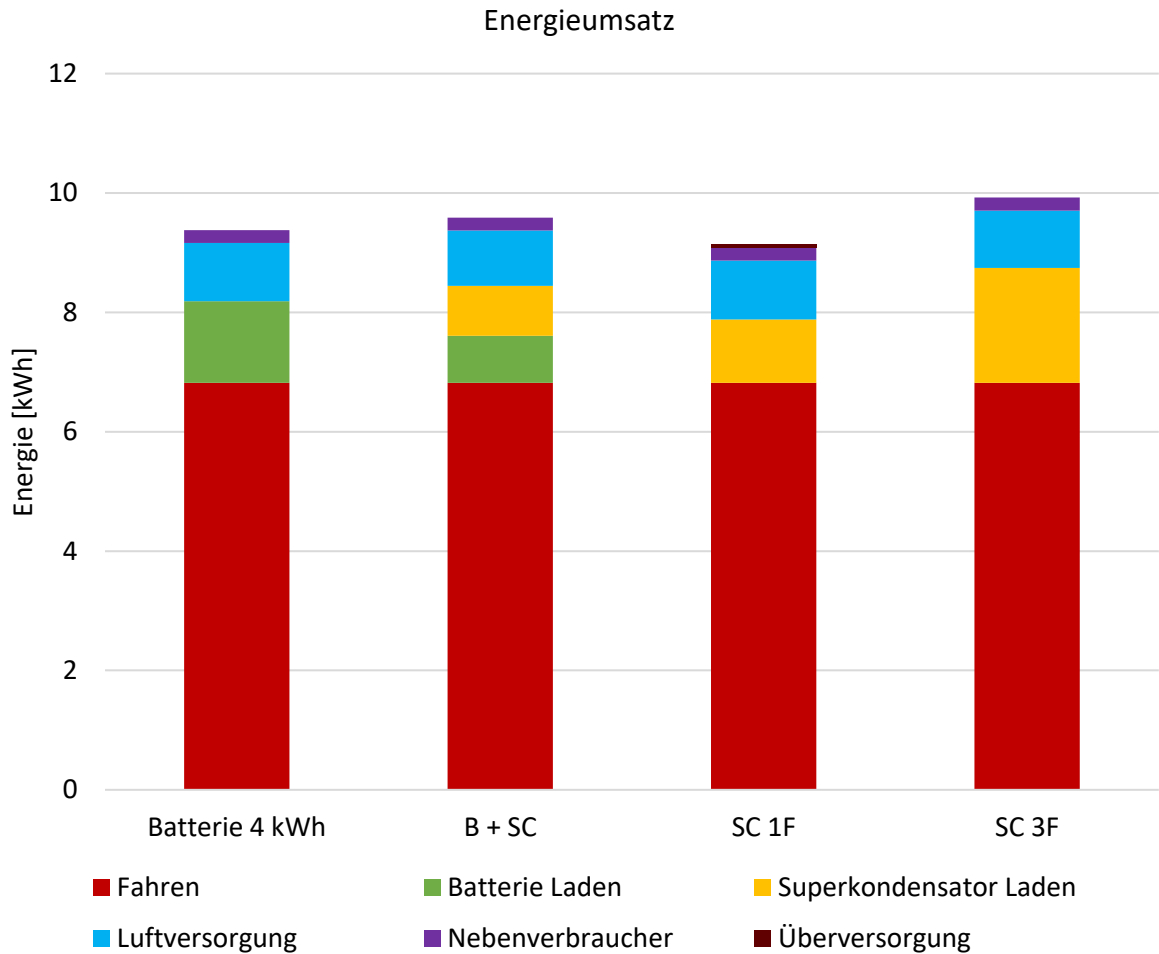
**Abbildung 55:** Zielfunktion bei 3 F Superkondensator

Im Vergleich zu **Abbildung 54** ist in **Abbildung 55** die Zusammensetzung der Zielfunktion für eine Kapazität von 3 F dargestellt. Es wird ein geringerer Strafterm durch dynamischen Betrieb der Brennstoffzelle erfasst. Zusätzlich dazu wird der Superkondensator im Vergleich geringer belastet, obwohl ein deutlich größerer Anteil an Energie rekuperiert wird. Es kann festgehalten werden, dass die Nutzung eines Superkondensators mit größerer Kapazität Vorteile im Vergleich zu Variante 2 mit sich bringt. Die Effizienz des Antriebsstranges kann trotz Wegfall eines zweiten Energiespeichers durch die höhere Rekuperationsfähigkeit gesteigert werden. Zudem hat ein Superkondensator mit einer Kapazität von 3 F keine negativen Auswirkungen auf die Brennstoffzelle.

## 5.4 Vergleich der Varianten

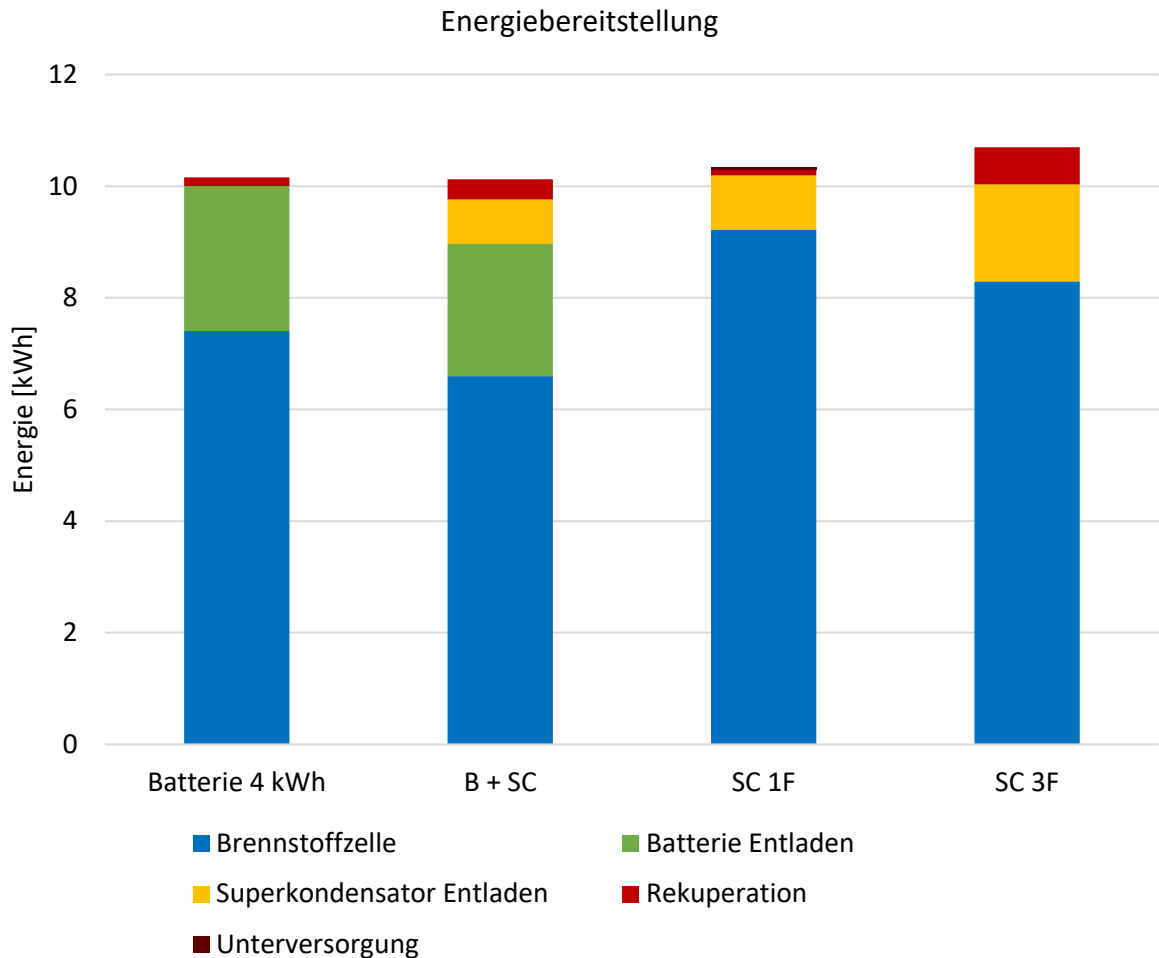
In diesem Kapitel werden die vorgestellten Varianten hinsichtlich ihrer Energieverteilung und der Zielfunktion miteinander verglichen. Diese Gegenüberstellung dient der Identifikation der optimalen Auslegung eines Fuel Cell Electric Vehicle.

### 5.4.1 Vergleich Energieverteilung



**Abbildung 56:** Energieumsatz des Antriebsstranges für die drei Energiespeicherkonstellationen

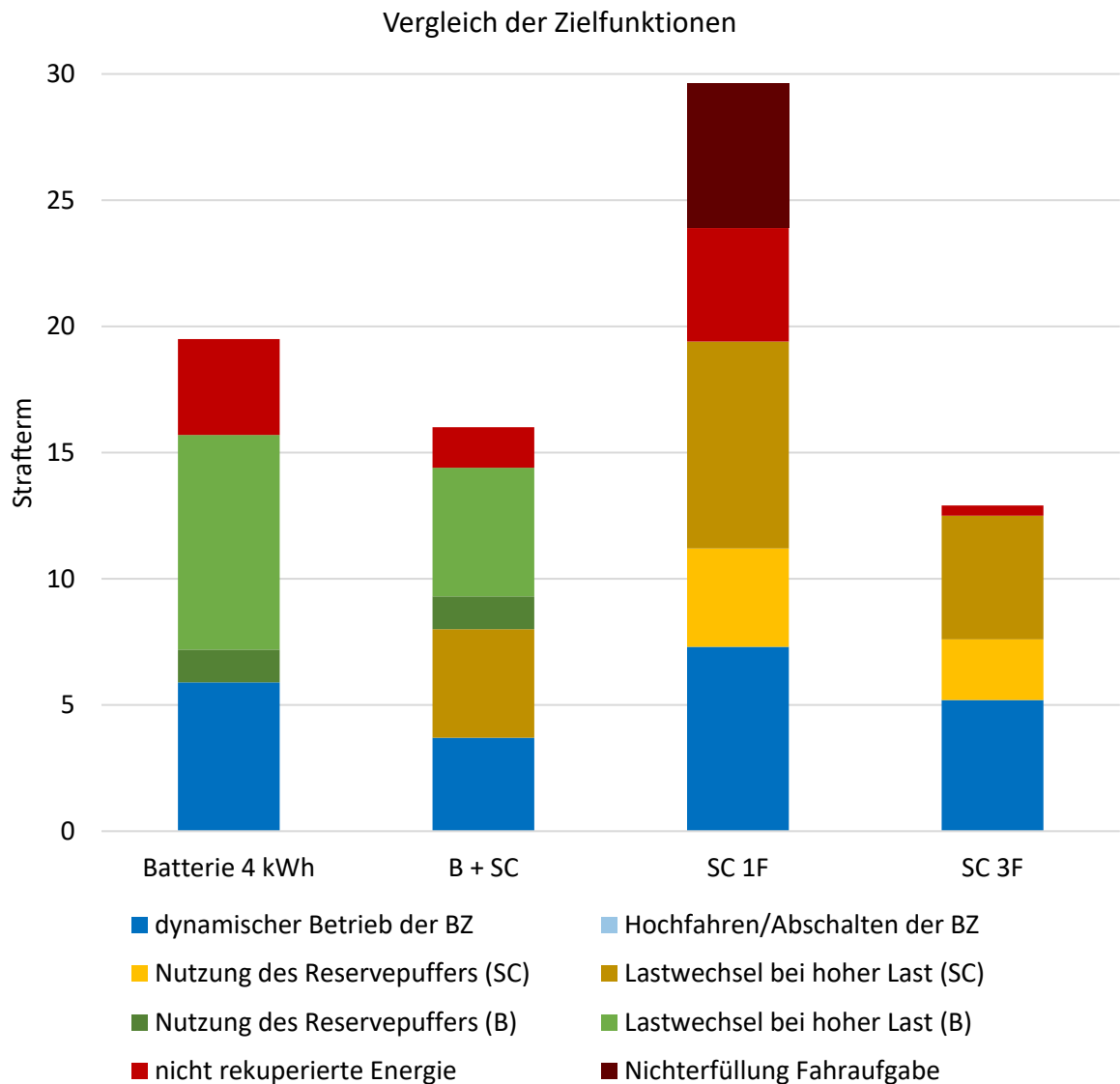
In **Abbildung 56** ist der Energieumsatz des elektrischen Antriebsstrangs für die drei untersuchten Energiespeicherkonstellationen dargestellt. Dieser Umsatz befindet sich für alle Varianten auf einem ähnlichen Niveau. Allerdings kann festgestellt werden, dass bei der Nutzung eines Superkondensators mit einer Kapazität von 3 F der größte Anteil an Energie zum Laden des Energiespeichers genutzt werden kann, was durch die hohe Ladestromtoleranz des Superkondensators bedingt ist. Der Gesamt-Energieumsatz dieser Variante ist am höchsten, da die Effizienz des Antriebsstranges durch das hohe Maß an Rekuperationsfähigkeit und die Systemparameter des Superkondensators erhöht werden kann.



**Abbildung 57:** Anteil zur Verfügung gestellter Energie für die drei Energiespeicherkonstellationen

Die **Abbildung 57** zeigt den Anteil der zur Verfügung gestellten Energie des Antriebsstranges für die untersuchten Konstellationen der Energiespeicher. Ebenso wie in **Abbildung 56** kann geschlussfolgert werden, dass die Effizienz des Antriebsstranges mit einem Superkondensator mit 3 F am höchsten ist, da der Superkondensator eine hohe Entladestromtoleranz sowie hohe Rekuperationsfähigkeit aufweist. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass hinsichtlich der Effizienz des Antriebsstranges die Variante mit alleiniger Nutzung eines ausreichend großen Superkondensators optimal ist. Alternativ kann auch die Variante 2 mit Batterie und Superkondensator bevorzugt werden. Diese Variante weist allerdings einen hohen Regelungsaufwand hinsichtlich der Betriebsstrategie auf. Zusätzlich dazu muss der Kostenanteil bei Verwendung eines zweiten Energiespeichers in Betracht gezogen werden.

### 5.4.2 Vergleich Zielfunktion

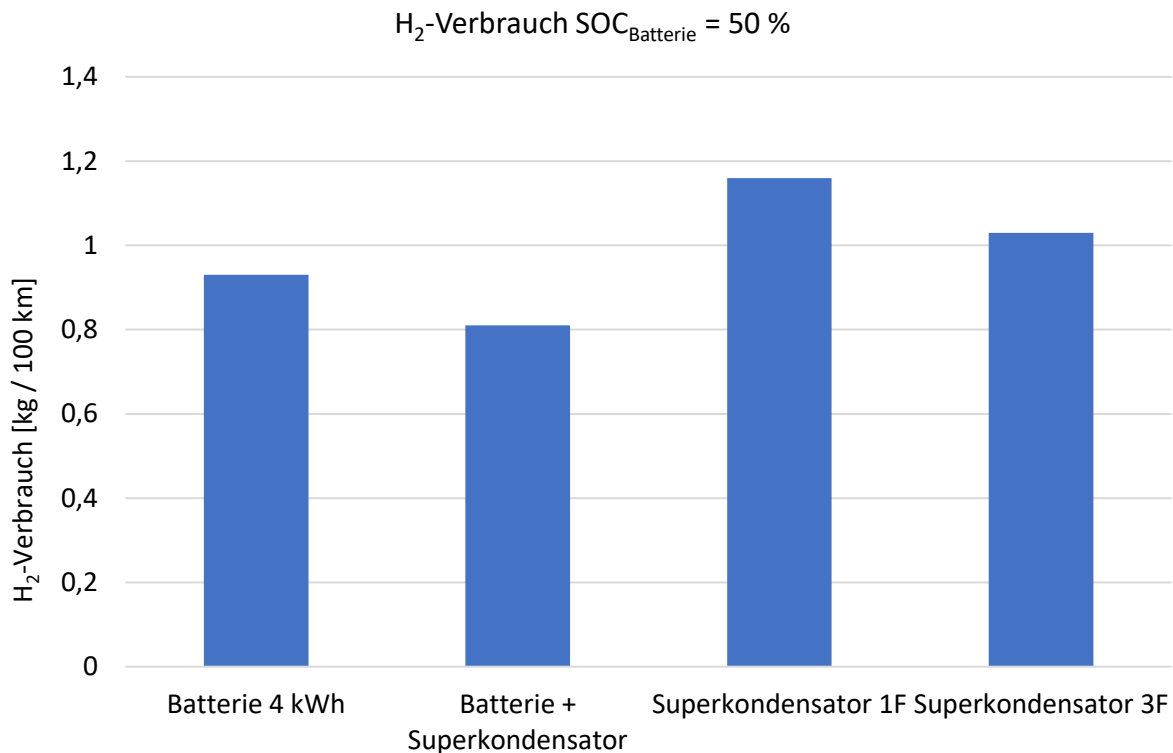


**Abbildung 58:** Vergleich der Zielfunktionen der drei Energiespeicherkonstellationen

Die **Abbildung 58** stellt die Ergebnisse der Zielfunktionen für die drei Energiespeicherkonstellationen dar. Es kann ebenso, wie in Kapitel 5.4.1, zusammengefasst werden, dass ein ausreichend großer Superkondensator die geringsten Strafterme erzeugt. Aus diesem Grund ist diese Variante zu bevorzugen.

### 5.4.3 Wasserstoffverbrauch

In diesem Kapitel erfolgt der Vergleich des Wasserstoffverbrauchs der untersuchten Varianten. Denn neben der Analyse der Energieverteilung und Bewertung der Zielfunktion, ist es notwendig den Wasserstoffverbrauch in die Betrachtung miteinzubeziehen. Der Wasserstoffverbrauch gibt Auskunft über die Gesamteffizienz des elektrischen Antriebsstranges und kann somit für die optimale Auslegung eines Brennstoffzellenfahrzeuges herangezogen werden.



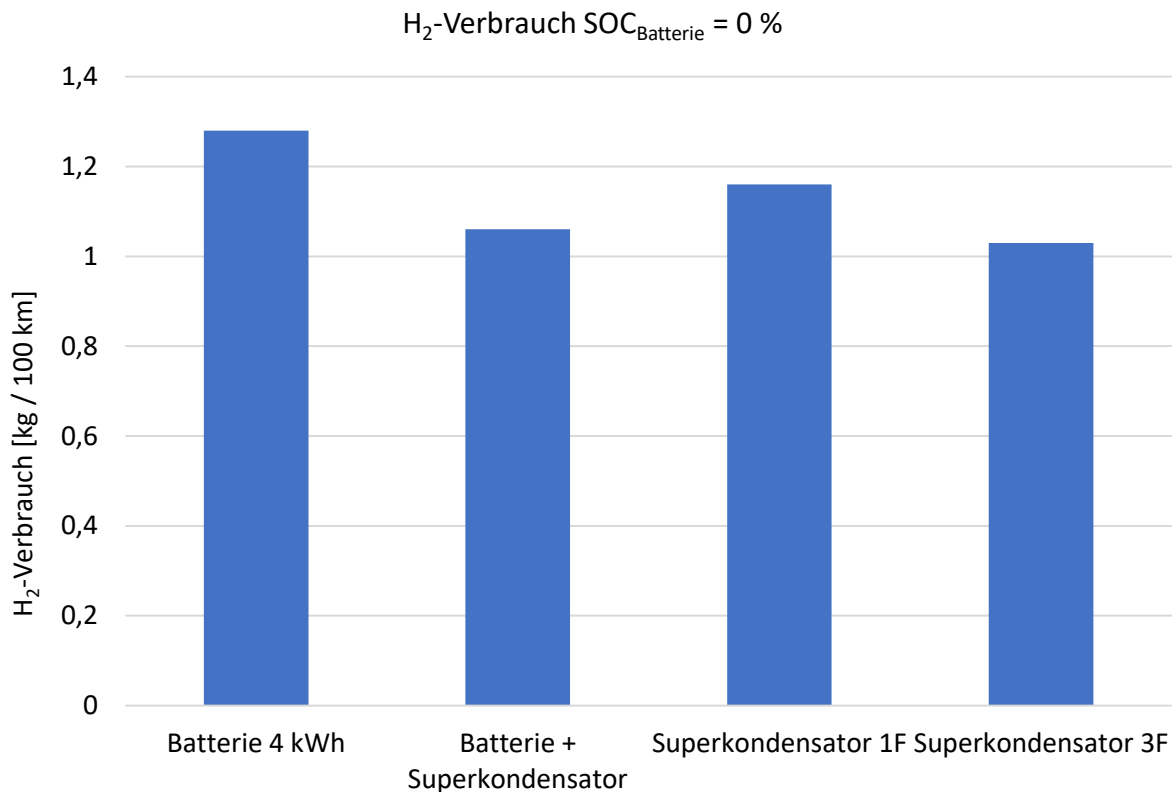
**Abbildung 59:** Wasserstoffverbrauch bei einem Batterieladezustand von 50 %

Die **Abbildung 59** stellt den Wasserstoffverbrauch der untersuchten Energiespeicher-Varianten für einen Batterieladezustand von 50 % dar. Als Fahraufgabe wurde der WLTP untersucht, der einen Zeitraum von 30 Minuten umfasst. Es kann aus der Abbildung entnommen werden, dass der Verbrauch bei der Kopplung von Batterie und Superkondensator einen Wert von 0,81 kg H<sub>2</sub>/100 km annimmt und am geringsten ist.

Des Weiteren ist ersichtlich, dass die Varianten mit einem Superkondensator trotz höherer Antriebsstrangeffizienz einen höheren Wasserstoffverbrauch als die Varianten 1 und 2 mit Batterie aufweisen. Diese Tatsache liegt darin begründet, dass ein Batterieladezustand von 50 % angenommen wurde. Somit muss die Brennstoffzelle zunächst weniger Energie zur



Verfügung stellen, um der Fahraufgabe folgen zu können, da die Energie aus der Batterie genutzt werden kann. Aufgrund der Effizienzsteigerung des Antriebsstranges durch die Nutzung eines Superkondensators, ist der Wasserstoffverbrauch von Variante 2 - Batterie und Superkondensator - geringer als von Variante 1 - Batterie.



**Abbildung 60:** Wasserstoffverbrauch bei einem Batterieladezustand von 0 %

In **Abbildung 60** ist der Wasserstoffverbrauch ebenso für die untersuchten Varianten dargestellt, jedoch wurde ein Batterieladezustand von 0 % angenommen. Aus diesem Grund kann bei den Varianten 1 und 2 zu Beginn keine Energie zur Erfüllung der Fahraufgabe von der Batterie zur Verfügung gestellt werden. Es ist hingegen ersichtlich, dass entsprechend der Gesamteffizienz des Antriebsstranges die Variante 3 Superkondensator mit einer Kapazität von 3 F den geringsten Wasserstoffverbrauch aufweist. Bei den Varianten 1 und 2 wird die Batterie parallel zur Erfüllung der Fahraufgabe geladen, weshalb diese einen höheren Wasserstoffverbrauch haben. Die Variante 3 Superkondensator mit einer Kapazität von 1 F hat aufgrund des hohen Maßes an von der Brennstoffzelle bereitgestellter Energie einen Verbrauch von 1,16 kg  $H_2$ /100 km. Die Brennstoffzelle muss in einem höheren Lastpunkt mit mehr angeforderter Dynamik arbeiten, um die fehlende Kapazität des Energiespeichers auszugleichen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass neben der Art und Kapazität des Energiespeichers, auch der Ladezustand einen erheblichen Einfluss auf den Wasserstoffverbrauch hat. Darüber hinaus ist der Verbrauch vom Lastpunkt und der angeforderten Dynamik der Brennstoffzelle abhängig. Zusammenfassend ist zu erkennen, dass je nach Ladezustand die Variante 3 Superkondensator mit 3 F und Variante 2 Batterie und Superkondensator den geringsten Wasserstoffverbrauch aufweisen. Diese Tatsache korreliert mit dem Energieumsatz sowie hohen Maß an Effizienz des Antriebsstranges.

#### 5.4.4 Treibhausgas-Emissionen FCEV vs. BEV

Im nachfolgenden Kapitel erfolgt eine Gegenüberstellung der Treibhausgas-Emissionen (kurz: THG-Emissionen) von Brennstoffzellen- und batterieelektrischen Fahrzeugen. Der Vergleich wird für den Betrieb durchgeführt, sodass die THG-Emissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro km berechnet werden.

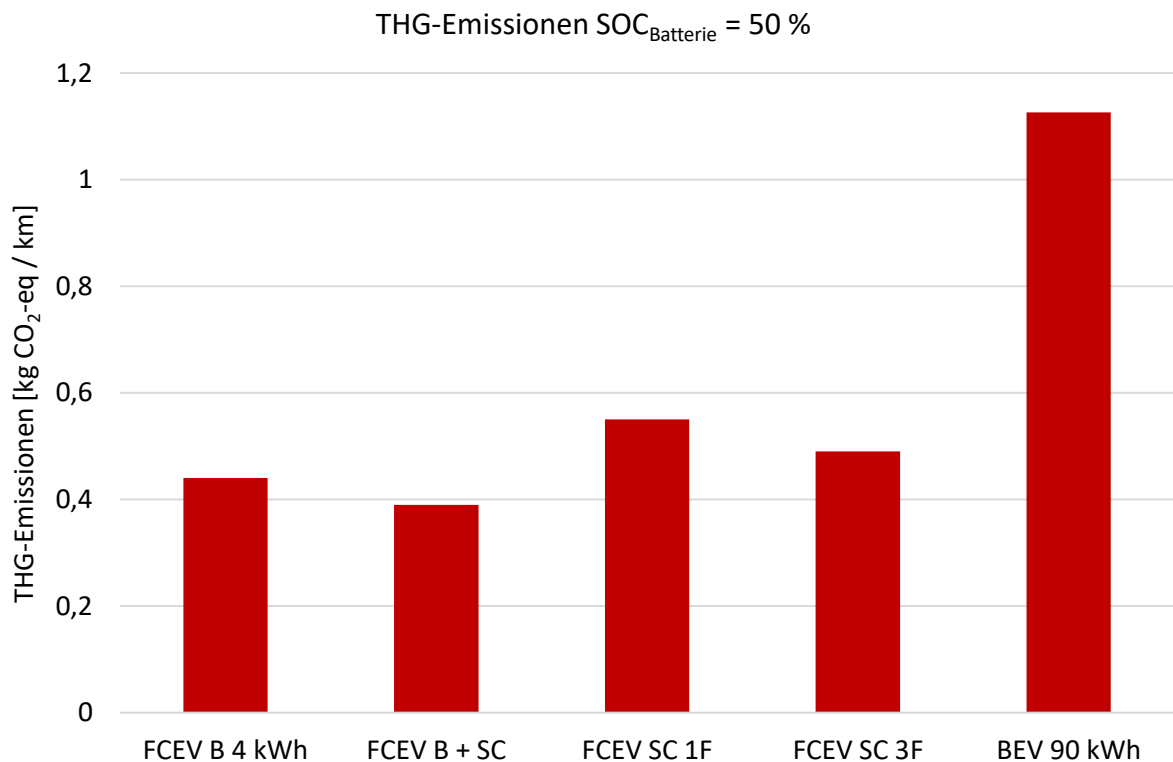
Dieser Vergleich ist insbesondere von Relevanz, um die Umweltauswirkungen der beiden Antriebsarten bewerten zu können. Auf Basis einer solchen Bewertung kann zukünftig die Auswahl der optimalen Antriebslösung technologieoffen je nach spezifischem Anwendungsfall erfolgen.

Der Vergleich der Treibhausgas-Emissionen wurde zum einen für die untersuchten Varianten des FCEV durchgeführt. Zum anderen wurde ein batterieelektrisches Fahrzeug in die Betrachtung miteinbezogen. Das „Battery Electric Vehicle“ (kurz: BEV) verfügt über eine Reichweite von circa 450 km bei einer Batteriekapazität von 90 kWh. Die angenommenen Randparameter der Untersuchung können **Tabelle 8** entnommen werden.

**Tabelle 8:** Annahmen für den Vergleich der THG-Emissionen von FCEV und BEV [7]

Annahmen des Fahrzeugbetriebes		
Parameter	BEV	FCEV
Reichweite	ca. 450 km	ca. 500 km
Energiespeicher	90 kWh	variantenabhängig
Verbrauch	20,4 kWh / 100 km	0,81 – 1,16 kg H <sub>2</sub> / 100 km
Quelle der reg. Energie	Photovoltaik (dezentral)	Wind (zentral)
THG-Emissionen Strom	48 g CO <sub>2</sub> -eq / kWh	11 g CO <sub>2</sub> -eq / kWh
Annahmen	Ladungsverluste 15 %	H <sub>2</sub> -Verdichtung 2,7 kWh / kg H <sub>2</sub> -Erzeugung über Elektrolyse mit 0,18 kg CO <sub>2</sub> -eq / kg H <sub>2</sub>

Die Annahmen basieren auf der Studie des Fraunhofer Institutes für Solare Energiesysteme (ISE) mit dem Titel „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km“ [7]. Die Ergebnisse der THG-Emissionen für FCEV wurden für einen Batterieladezustand des FCEV von 50 % berechnet.

**Abbildung 61:** Treibhausgas-Emissionen für den Betrieb von FCEV und BEV

In **Abbildung 61** ist zu sehen, dass die Treibhausgas-Emissionen pro Kilometer für alle untersuchten Varianten des Brennstoffzellen-Fahrzeuges deutlich unter den THG-Emissionen des batterieelektrischen Fahrzeuges liegen. Diese Tatsache ist zum einen in dem hohen Stromverbrauch des BEV mit hoher Reichweite begründet. Zum anderen geht aus **Tabelle 8** hervor, dass die erneuerbare Energiequelle einen enormen Einfluss auf die Treibhausgas-Emissionen hat. Die THG-Emissionen bei einer dezentralen Stromerzeugung mit Hilfe von Photovoltaik-Anlagen weist einen nahezu fünffachen Wert im Vergleich zur Erzeugung aus Windenergie auf.

Dennoch kann zusammengefasst werden, dass bei den zugrundeliegenden Annahmen die Treibhausgas-Emissionen während des Betriebes bei Brennstoffzellen-Fahrzeugen deutlich unter den Werten des batterieelektrischen Fahrzeuges mit hoher Reichweite liegen. Insofern stellen FCEV, je nach Anwendungsfall und Auslegung, eine ressourcenschonende Alternative zu BEVs dar.

---

## 6 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation untersucht das Energiemanagement eines Fahrzeug-Brennstoffzellen-Systems. Das Energiemanagement ist untrennbar mit dem Medienmanagement eines Brennstoffzellen-Systems verbunden. Zwingend muss auch der elektrische Antriebsstrang und die zugehörigen Komponenten in die Betrachtung miteinbezogen werden.

Die Grundlage des Brennstoffzellenfahrzeuges bildet die in mobilen Anwendungen genutzte Technologie der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (kurz: PEM-BZ). Bei dieser Form der Brennstoffzelle ist ein aufwändiges Betriebsmedienmanagement erforderlich. Jedoch bedarf es im vorherigen Schritt einer elementaren Betrachtung des Energiewandlungssystems Brennstoffzelle. Die Vorteile, wie insbesondere der zukünftige Einsatz von erneuerbaren Energien, stellen die Gründe dar, die zum vermehrten Einsatz führen. Auch der Reaktionsmechanismus mit ausschließlich entstehendem Produktwasser erklärt den Emissionsvorteil.

Bei der Anwendung einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle in einem Fahrzeug, bedarf es einer Vielzahl an Komponenten. Insofern ist es notwendig, im weiteren Schritt das Gesamtfahrzeug zu betrachten. Das Brennstoffzellenfahrzeug, welches hier Fuel Cell Electric Vehicle (kurz: FCEV) genannt wird, wurde zu diesem Zweck in drei Ebenen hinsichtlich Detaillierungsgrad und Funktionsumfang gegliedert. Die Ebene 1 umfasst die Zellebene und beschreibt die physikalischen und elektrochemischen Wirkzusammenhänge. Diese ist als *Matlab*-Funktion umgesetzt und dient der Abbildung des Systemverhaltens der PEM-Brennstoffzelle. Hingegen liegt in Ebene 2 der Fokus auf dem Medienmanagement, welches das Luft-, Wasserstoff- und Wassermanagement umfasst. In der Ebene 3 erfolgt die Betrachtung der Brennstoffzelle als Antriebstechnologie im elektrischen Fahrzeug. Es bildet das Gesamtfahrzeug ab und dient der Analyse des Energiemanagements mit dem Ziel der optimalen Auslegung.

Zusätzlich zur Brennstoffzelle wird im FCEV ein Energiespeicher zum Ausgleich dynamischer Lastanforderungen verwendet. Es wurden zwei Arten von Energiespeichern untersucht – zum einen die Batterie und zum anderen der Superkondensator. Bei der Batterie wurde eine Hochleistungs-Lithium-Ionen-Zelle betrachtet, welche aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Lade- und Entladestromtoleranz optimal für hybride Anwendungen

geeignet ist. Des Weiteren wurde ein Superkondensator, welcher auch als Doppelschicht-Kondensator bezeichnet wird, in die Betrachtung miteinbezogen. Der Superkondensator weist hohe Gesamtkapazitäten bei gleichzeitig hohen Lade- und Entladestromtoleranzen auf.

Das Brennstoffzellen-Fahrzeug wurde für die weitere Betrachtung als allgemeingültiges Gesamtfahrzeugmodell in der Simulationsumgebung *Matlab / Simulink* implementiert. Die Basis stellt die ebenenbasierte Modellierung dar, welche der Detektion der Einflussparameter auf das Energiemanagement dient. Dafür wurden Übergabeparameter zwischen den drei Ebenen identifiziert und integriert. Im weiteren Schritt wurde eine Validierung des Brennstoffzellen-Verhaltens durchgeführt. Die Validierung dient neben der Bestimmung des Systemverhaltens auch der Entwicklung einer optimalen Betriebsstrategie. Für die Koordination der Komponenten des elektrischen Antriebsstranges dient im Gesamtfahrzeug eine „kausale“ Betriebsstrategie, die auf aktuell zur Verfügung stehenden Fahrzeugdaten basiert. Die Aufgabe der Betriebsstrategie besteht in der Erfassung und Zuordnung der Zustände der Komponenten des Antriebsstranges auf Basis der Gleichstromsammelschiene und dem zugehörigen Datenbus. Die implementierte Betriebsstrategie wurde für variable Betriebszustände der einzelnen Komponenten und des Fahrzeuges entwickelt, um das gesamte Fahrprofil eines FCEV abzudecken.

Für die weitere Bewertung der untersuchten Varianten, wurde eine Zielfunktion in das Simulationsmodell integriert. Diese dient der linearen Optimierung mit dem Ziel der Identifizierung eines lokalen Minimums. Die Zielfunktion besteht aus verschiedenen Variablen mit zugehörigen Gewichtungsfaktoren ohne Nebenbedingungen und hat die Aufgabe ein mehrdimensionales Problem auf ein eindimensionales Problem zu übertragen. Die Implementierung innerhalb des Simulationsmodells erfolgt über Strafterme, sodass Werte resultieren, wenn ein für das Gesamtoptimum negatives Ereignis eintritt.

Auf Basis des generierten Simulationsmodells eines FCEV wurden drei Konstellationen an Energiespeichern untersucht. Zum einen der Einsatz einer Batterie, zum anderen der Einsatz eines Superkondensator und darüber hinaus die Kopplung beider Varianten. Für die optimale Auslegung eines Brennstoffzellenfahrzeuges wurden die Energie- und Leistungsverteilung innerhalb des Antriebsstranges untersucht. Ebenso wurden die Systemparameter - Effizienz, Dynamik, Ladezustand und Rekuperationsfähigkeit - analysiert. Zusätzlich dazu wurden der Wasserstoffverbrauch der betrachteten Varianten sowie die Treibhausgas-Emissionen des

Betriebes im Vergleich zu einem batterieelektrischen Fahrzeug untersucht. Die Ergebnisse wurden aufgrund der Vergleichbarkeit für den gesetzlichen Fahrzyklus WLTP berechnet.

Im Rahmen der Analyse hat sich gezeigt, dass insbesondere der Energieumsatz des Antriebsstranges einen enormen Einfluss auf das Energiemanagement des Brennstoffzellenfahrzeuges hat. Zusätzlich dazu ist es von Relevanz, welchen Betriebszustand die Komponenten des Antriebsstranges einnehmen. Denn beispielsweise eine hohe angeforderte Brennstoffzellendynamik resultiert in einer Verschiebung des Lastpunktes, welches einen negativen Einfluss auf die Effizienz und den Wasserstoffverbrauch zur Folge hat. Anhand der Simulationsergebnisse kann abgeleitet werden, dass ein Superkondensator aufgrund seiner hohen Lade- und Entladestromtoleranz einen positiven Einfluss auf das Energiemanagement eines Brennstoffzellenfahrzeuges hat.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Rahmen der vorliegenden Dissertation ein FCEV ganzheitlich betrachtet wurde. Zu diesem Zweck wurde ein allgemeingültiges Simulationsmodell eines Brennstoffzellenfahrzeuges in der Simulationsumgebung *Matlab / Simulink* generiert, welches die Einflussparameter der einzelnen Ebenen auf das Energiemanagement des Fahrzeuges abbildet. Mit Hilfe des Modells wird die optimale Auslegung eines Brennstoffzellenfahrzeuges, je nach Anwendungsfall und Energiespeicher, ermöglicht.

---

## 7 Ausblick

Ein Ausblick auf zukünftig relevante Problemstellungen im Bereich des Energiemanagements von Brennstoffzellenfahrzeugen bietet aus heutiger Sicht einige Potentiale. Mit Hilfe von weiteren Untersuchungen in den folgenden Themenfeldern können die bisherigen Erkenntnisse erweitert werden:

- Experimentelle Untersuchungen der einzelnen Komponenten des elektrischen Antriebsstranges
- Reale Fahrversuche mit einem Versuchsträger zur Validierung der implementierten Betriebsstrategie
- KI-gestützte Entwicklungsmethoden zur Identifizierung der optimalen Energiespeicher-Konstellation sowie -Kapazität

Im Bereich der Komponenten des elektrischen Antriebsstranges eines Brennstoffzellen-Fahrzeuges ist es vorteilhaft experimentelle Untersuchungen durchzuführen. Diese dienen der Bestimmung des realen Systemverhaltens der jeweiligen Komponente. Das ermittelte Systemverhalten kann im weiteren Schritt in das entwickelte allgemeingültige Simulationsmodell implementiert werden.

Zukünftig sollten Fahrversuche mit einem Versuchsträger durchgeführt werden, um die Betriebsstrategie validieren zu können. Die Validierung sollte für verschiedene Konstellationen an Energiespeichern des elektrischen Antriebsstranges durchgeführt werden, um das reale Fahrverhalten des FCEV abdecken zu können.

Die Nutzung KI-gestützter Entwicklungsmethoden kann für die optimale Auslegung des Brennstoffzellenfahrzeuges einen wichtigen Beitrag leisten. Denn mit Hilfe dieser digitalen Methoden kann unter anderem eine Identifizierung der optimalen Energiespeicher-Konstellation erfolgen. Zudem kann die für verschiedene Fahraufgaben benötigte Kapazität des jeweiligen Energiespeichers bestimmt werden.



---

## Literaturverzeichnis

- [1] Statista Research Department: „Pkw-Bestand mit Elektroantrieb weltweit bis 2021“, (Online). Verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168350/umfrage/bestandsentwicklung-von-elektrofahrzeugen> [Zugriff am 13.05.2023].
- [2] Statista Research Department: „Zugelassene E-Autos in Deutschland bis 2022“, (Online). Verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland> [Zugriff am 13.05.2023].
- [3] Europäisches Parlament: „EU-Verkaufsverbot für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge ab 2035 – Was bedeutet das?“, (Online). Verfügbar unter <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20221019STO44572/verkaufsverbot-fur-neue-benzin-und-dieselfahrzeuge-ab-2035-was-bedeutet-das> [Zugriff am 13.05.2023].
- [4] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: „Klimaabkommen von Paris“, (Online). Verfügbar unter <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602> [Zugriff am 13.05.2023].
- [5] P. Kurzweil: *Brennstoffzellentechnik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [6] K. Goldammer, F. Grüger: „Brennstoffzelle oder Batteriefahrzeug – was wird der Antrieb der Zukunft?“, (Online). Verfügbar unter <https://www.energie-klimaschutz.de/antrieb-bev-versus-fcev/> [Zugriff am 13.05.2023].
- [7] N.N.: *Treibhausgasemissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km*, Fraunhofer ISE, H2 Mobility, Freiburg, 2019.
- [8] Umweltbundesamt: „Wasserstoff im Verkehr: Häufig gestellte Fragen (FAQs)“, (Online). Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/kraftstoffe-antriebe/wasserstoff-im-verkehr-haeufig-gestellte-fragen#einleitung> [Zugriff am 13.05.2023].
- [9] N.N.: *DIE ÖKOBILANZ VON PERSONENKRAFTWAGEN*, Umweltbundesamt GmbH, Hrsg., Wien, 2021.

- [10] J. Scholta: „Dynamischer Betrieb von PEM-Brennstoffzellen“, (Online). Verfügbar unter <https://www.zsw-bw.de/projekt/h2-und-brennstoffzellen/dynamischer-betrieb-von-pem-brennstoffzellen.html> [Zugriff am 13.05.2023].
- [11] P. Kurzweil: *Angewandte Elektrochemie*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [12] F. Barbir: *PEM fuel cells*, Second edition, Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Francisco; Singapore; Sydney; Tokyo: Elsevier, S. 518, 2013.
- [13] R. P. O'Hayre, S.-W. Cha, W. G. Colella, F. B. Prinz: *Fuel cell fundamentals*, Third edition, Hoboken, New Jersey: Wiley, S. 580, 2016.
- [14] B. Höhlein, R. Menzer, „Brennstoffzelle,“ in *Regenerative Energiequellen*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 103–116, 1997.
- [15] K. E. Noreikat: „Brennstoffzelle,“ in *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 105–122, 2015.
- [16] H. Tschöke, P. Gutzmer, T. Pfund: *Elektrifizierung des Antriebsstrangs*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [17] K. Borgeest: *Elektronik in der Fahrzeugtechnik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [18] J. Töpler, J. Lehmann: *Wasserstoff und Brennstoffzelle*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [19] M. Klell, H. Eichlseder, A. Trattner: *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [20] M. Sterner, I. Stadler: *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [21] N.N.: *Fuel cell engines*, Hoboken, NJ: Wiley, S. 515, 2008.
- [22] M. Doppelbauer: *Grundlagen der Elektromobilität*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.

- 
- [23] G. Reich, M. Reppich: *Regenerative Energietechnik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [24] A. Elgowainy: *Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*, New York, NY: Springer New York, 2021.
- [25] C. Spiegel: *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB*, Amsterdam; Boston: Academic Press/Elsevier, S. 443, 2011.
- [26] V. Crastan: *Elektrische Energieversorgung 2*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [27] DiLiCo Engineering: „Brennstoffzellen“, (Online). Verfügbar unter <https://www.dilico.de/de/brennstoffzellen.php> [Zugriff am 13.05.2023].
- [28] T. Unwerth: *Vorlesung: Brennstoffzellen und Brennstoffzellensysteme I*, Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, 2015.
- [29] N. Konno, S. Mizuno, H. Nakaji, Y. Ishikawa: „Development of Compact and High-Performance Fuel Cell Stack“, *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, Bd. 4, Nr. 1, S. 123–129, 2015.
- [30] E. Gallagher, F. Berg, J. Rechberger, H. Sorger: „Entwicklung von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellenstapeln“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 81, Nr. 9, S. 40–45, 2020.
- [31] D. Metz, J. Werner, S. Münz, M. Becker: „Luftversorgung für Brennstoffzellen“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 74, Nr. 4, S. 316–319, 2013.
- [32] O. Lang, S. Pischinger, C. Schönfelder, T. Steidten: „Verdichter und Expander für mobile Brennstoffzellensysteme“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 65, Nr. 7-8, S. 592–599, 2004.
- [33] K.-M. Han, G. Spinner, J. Werner: „Effiziente Luftversorgung von Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen“, *ATZ heavy duty*, Bd. 14, Nr. 4, S. 28–31, 2021.
- [34] E. Wallnöfer-Ogris, P. Pertl, A. Trattner: „Quasi-stationary UI-characteristic model of a PEM fuel cell—Evaluating the option of self-humidifying operation“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 45, Nr. 56, S. 32464–32477, 2020.

- 
- [35] P. Bernstein: „Modellgestützte optimale Betriebsführung von PEM-Brennstoffzellen für autonome Anlagen“, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2015.
- [36] A. Hakenjos: „Untersuchung zum Wasserhaushalt von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen“, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Freiburg im Breisgau. 2006.
- [37] P. W. Atkins, J. Paula: *Atkins' physical chemistry*, 8th ed. Hrsg., New York: W.H. Freeman, 2006, S. 1053.
- [38] R. Korthauer: *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [39] P. Hofmann: *Hybridfahrzeuge*, Wien: Springer Vienna, 2014.
- [40] J. Hong, S. Jung, P. D. Thang, K. Nam: „Hybridization fuel cell with supercapacitor for FCEV“, IEEE, S. 286–290, 2008.
- [41] A. Gloria: *Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society*, Bd. 289, Cham: Springer International Publishing, 2014.
- [42] A. Trattner, F. Mair, P. Pertl, M. Klell: „Innovative Antriebe mit Brennstoffzelle - Potenziale und Beispiele“, in *15. Symposium Energieinnovation - Neue Energie für unser bewegtes Europa*, 2018.
- [43] M. Pundt, M. Kirchner, T. Stremlau, G. Märker: „Fahrzeugintegration eines Brennstoffzellensystems“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 120, Nr. 2, S. 40–45, 2018.
- [44] N.N.: „Fahrzeugkonzepte mit Brennstoffzelle“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 114, Nr. 12, S. 938–939, 2012.
- [45] A. L. Lazar, S. C. Konradt, H. Rottengruber: „Open-Source Dynamic Matlab/Simulink 1D Proton Exchange Membrane Fuel Cell Model“, *Energies*, Bd. 12, Nr. 18, S. 3478, 2019.
- [46] K.-D. Kreuer: *Fuel Cells*, New York, NY: Springer New York, 2013.
- [47] F. Weiß: *Optimale Konzeptauslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.

- 
- [48] N.N.: „Messdaten Fuel Cell Dyno Data“, Segula Technologies GmbH, Rüsselheim, 2021.
- [49] I. Azizi, H. Radjeai: „A new strategy for battery and supercapacitor energy management for an urban electric vehicle“, *Electrical Engineering*, Bd. 100, Nr. 2, S. 667–676, 2018.
- [50] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, M. Hinaje: „Comparative Study of Fuel-Cell Vehicle Hybridization with Battery or Supercapacitor Storage Device“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 58, Nr. 8, S. 3892–3904, 2009.
- [51] A. Rousseau, P. Sharer, R. Ahluwalia: „Energy Storage Requirements for Fuel Cell Vehicles“, SAE, Warrendale, PA, United States, 2004.
- [52] W. Ki Na, B. Gou: „Feedback-Linearization-Based Nonlinear Control for PEM Fuel Cells“, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Bd. 23, Nr. 1, S. 179–190, 2008.
- [53] E. Schaltz, A. Khaligh, P. O. Rasmussen: „Influence of Battery/Ultracapacitor Energy-Storage Sizing on Battery Lifetime in a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 58, Nr. 8, S. 3882–3891, 2009.
- [54] K. Sim, R. Vijayagopal, N. Kim, A. Rousseau: „Optimization of Component Sizing for a Fuel Cell-Powered Truck to Minimize Ownership Cost“, *Energies*, Bd. 12, Nr. 6, S. 1125, 2019.
- [55] A. K. Saha, S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, Y. H. Song: „Software simulation of PEM fuel cell system for dynamic performance analysis“, *IEEE*, S. 758–762, 2007.
- [56] J. C. Wurzenberger, T. Glatz, D. Rašić, G. Tavčar, I. Mele, A. Kregar, T. Katrašnik: „FCEV simulation – Electrochemical battery and fuel cell models on vehicle level“, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 219–233, 2020.
- [57] S. Pischinger, U. Seiffert: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [58] C. Mohrdieck, S. Dehn: „Das intelligente Brennstoffzellen-Plug-in-Hybrid-Antriebssystem des Mercedes-Benz GLC F-Cell“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 80, Nr. 1, S. 32–41, 2019.

- [59] G. Frank: *Seminar Brennstoffzellentechnik bei Daimler*, Karlsruhe, Hochschule Karlsruhe, EIT, 2018.
- [60] J. Doerr, T. Attensperger, L. Wittmann, T. Enzinger: „Die neuen elektrischen Achsantriebe von Audi“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 79, Nr. 6, S. 16–25, 2018.
- [61] J. Doerr, N. Ardey, G. Mendl, G. Fröhlich, R. Straßer, T. Laudenschlager: „The new full electric drivetrain of the Audi e-tron“, in *Der Antrieb von morgen 2019*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 13–37, 2019.
- [62] P. Wingelaar, J. L. Duarte, M. Hendrix: „Dynamic Characteristics of PEM Fuel Cells“, *IEEE*, S. 1635–1641, 2005.
- [63] A. A. Abd El Monem, A. M. Azmy, S. A. Mahmoud: „Effect of process parameters on the dynamic behavior of polymer electrolyte membrane fuel cells for electric vehicle applications“, *Ain Shams Engineering Journal*, Bd. 5, Nr. 1, S. 75–84, 2014.
- [64] Q. Ning, D.-j. Xuan, Y.-h. Nan, Y.-b. Kim: „Modeling and Simulation for Fuel Cell-Battery Hybrid Electric Vehicle“, *IEEE*, S. 53–57, 2009.
- [65] S. M. Sharifi Asl, S. Rowshanzamir, M. H. Eikani: „Modelling and simulation of the steady-state and dynamic behaviour of a PEM fuel cell“, *Energy*, Bd. 35, Nr. 4, S. 1633–1646, 2010.
- [66] N.N.: *Handbuch für Schunk Brennstoffzellen-Stacks*, Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH, Wettenberg, 2007.
- [67] N.N.: *Technology Assessment of a Fuel Cell Vehicle: 2017 Toyota Mirai*, Argonne National Laboratory, Lemont, IL, United States.
- [68] A. Rabbani: „Dynamic Performance of a PEM Fuel Cell System“, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, 2013.
- [69] N.N.: *Auto-Stack-Tool*, ZSW, Ulm.
- [70] N.N.: *Auto-Stack CORE*, ZSW, Ulm.
- [71] N.N.: *Datenblatt CT-22-12000.GB*, Celeroton AG, Volketswil.

- [72] N.N.: *Datenblatt CT-25-10000.GB*, Celeroton AG, Volketswil.
- [73] T. Fletcher, K. Ebrahimi: „The Effect of Fuel Cell and Battery Size on Efficiency and Cell Lifetime for an L7e Fuel Cell Hybrid Vehicle“, *Energies*, Bd. 13, Nr. 22, S. 5889, 2020.
- [74] M. Wietschel: *Energiotechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung*, Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, S. 178, 2010.
- [75] M. Westerhoff: „Vom Hybrid zur Brennstoffzelle“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 78, Nr. 5, S. 16–17, 2017.
- [76] A. Z. Weber, J. Newman: „Transport in Polymer-Electrolyte Membranes“, *Journal of The Electrochemical Society*, Bd. 150, Nr. 7, S. A1008, 2003.
- [77] A. Z. Weber, J. Newman: „Modeling transport in polymer-electrolyte fuel cells“, *Chemical reviews*, Bd. 104, Nr. 10, S. 4679–4726, 2004.
- [78] R. van Basshuysen: *Fahrzeugentwicklung im Wandel*, Wiesbaden: Vieweg Teubner, 2010.
- [79] S. Rothgang, S. Nigrin, M. Benra, M. Becker: „Brennstoffzellenantrieb für Nutzfahrzeuge“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 81, Nr. 5, S. 16–23, 2020.
- [80] J. M. Ratzinger, S. Buchberger, H. Eichlseder: „Electrified powertrains for wheel-driven non-road mobile machinery“, *Automotive and Engine Technology*, Bd. 6, Nr. 1-2, S. 1–13, 2021.
- [81] R. Peters: *Brennstoffzellensysteme in der Luftfahrt*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [82] M. Paulweber, K. Lebert: *Mess- und Prüfstandstechnik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [83] K. E. Noreikat: „10. Brennstoffzelle Einführung Und Grundlagen“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 74, Nr. 3, S. 246–251, 2013.
- [84] N.N.: *Fortschrittsbericht 2018 - Markthochlaufphase*, Nationale Plattform Elektromobilität, Berlin, 2018.

- [85] A. Lange, F. Küçükay: „A new, systematic approach to determine the global energy optimum of a hybrid vehicle“, *Automotive and Engine Technology*, Bd. 1, Nr. 1-4, S. 35–46, 2016.
- [86] R. Krüger: „Der Focus FCEV Hybrid“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 105, Nr. 6, S. 568–573, 2003.
- [87] S. C. Konradt, H. Rottengruber: „Determination of the optimal battery capacity of a PEM fuel cell vehicle taking into account recuperation and supercapacitors“, *Automotive and Engine Technology*, Bd. 6, Nr. 3-4, S. 181–189, 2021.
- [88] B. James: *2018 Cost Projections of PEM Fuel Cell Systems for Automobiles and Medium-Duty Vehicles*, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, DC, United States, 2018.
- [89] N.N.: *Wasserstoff als Schlüssel zur erfolgreichen Energiewende: Den Einstieg jetzt ermöglichen*, IN4CLIMATE.NRW, Gelsenkirchen, 2019.
- [90] E. Hoepke: „30 Mercedes-Benz-Omnibusse mit Brennstoffzelle im Flottenversuch“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 105, Nr. 6, S. 574–577, 2003.
- [91] R. Helmrich, A. Mönnig, C. Schneemann, E. Weber, G. Zika: *Elektromobilität 2035*, Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung der Bundesagentur für Arbeit, Nürnberg, 2018.
- [92] H. Hamann, D. Munning, P. Gorzalka, M. Zillmer, P. Eilts: „Efficiency scaling method of gasoline engines for different geometries and the application in hybrid vehicle simulation“, *International Journal of Engine Research*, Bd. 18, Nr. 7, S. 732–751, 2017.
- [93] B. Gou, W. Na, B. Diong: „Linear and Nonlinear Control Design for Fuel Cells“, in *Fuel Cells*, CRC Press, S. 75–103, 2016.
- [94] J. Feldhusen, K.-H. Grote: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [95] N.N.: *Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Herstellung bis zur Nutzung*, EnergieAgentur.NRW, Düsseldorf, 2018.



- [96] M. A. Danzer: *Dynamik und Effizienz von Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen*, Tönning; Lübeck; Marburg: Der Andere Verlag, S. 199, 2009.
- [97] A. Burkert: „Die Langstrecken — Elektromobilität“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 74, Nr. 5, S. 380–385, 2013.
- [98] S. Brandstätter, M. Macherhammer, P. Pertl, A. Trattner: „Applications and Development Potential of Fuel Cell Propulsion Systems“, in *17th Conference „The Working Process of the Internal Combustion Engine“*, 2019.
- [99] T. Aicher, L. Blum, M. Specht: „Wasserstoffgewinnung aus Erdgas – Anlagenentwicklung und Systemtechnik“, *FVS Themen*, 2004.
- [100] M. Papageorgiou, M. Leibold, M. Buss: *Optimierung*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [101] N.N.: *Kurzinformation Elektromobilität bzgl. Strom- und Ressourcenbedarf*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Dessau-Roßlau.