

Florian Mitterer, BSc

Masterarbeit

Mehrdimensionale Optimierung des Antriebsstrangs eines Fuel Cell Electric
Vehicles

Multidimensional optimization of the powertrain of a FCEV

Angestrebter akademischer Grad: Dipl.-Ing.

Technische Universität Graz

Institut für Fahrzeugtechnik

Member of Frank Stronach Institute

Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Fischer

Betreuer: Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Mario Hirz und Dipl.-Ing. Ackerl Martin

Graz, 9.März 2016

Restricted access until 9.März 2021



Diese Masterarbeit wurde in Kooperation mit AVL List GmbH, in der Entwicklungsabteilung–Brennstoffzelle unter der Leitung von Dipl.-Ing. Jürgen Rechberger erstellt. Die Betreuung dieser Arbeit führte Dr. Farzaneh Moradi durch.

Danksagung

Ich möchte mich bei Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Mario Hirz und Dipl.-Ing. Martin Ackerl herzlich für die Betreuung und die Durchsicht der Masterarbeit bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Jürgen Rechberger bedanken, der es mir ermöglicht hat, bei AVL List GmbH im Bereich PTE, in der Entwicklungsabteilung Brennstoffzelle meine Masterarbeit durchzuführen.

Besonderer Dank gilt auch Dr. Farzaneh Moradi, die mir fachlich immer zur Seite stand. Sie konnte mir einen tollen Einblick in den Bereich Brennstoffzellentechnik geben.

Dem Hybrid Systems Simulation Team in AVL List GmbH möchte für die Bereitstellung des zur Simulation verwendeten Modells in AVL Cruise danken.

Spezieller Dank gilt meiner Freundin Mag. Carina Ströbitzer, meinen Kommilitonen, meinen Freunden und meiner Familie, die mich während meines Studiums und bei der Durchführung meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Kollegen bei AVL List GmbH bedanken, welche mir immer bei Fragen und Anliegen zur Seite standen.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 2.3.2016



I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material, which has been quoted either literally or by content from used sources.

Graz, 2.3.2016



Abstract

This Thesis deals with the optimization of a PEM fuel cell powertrain for an Audi A3–e-tron. Besides hybrid vehicles, battery electric vehicles and battery electric range extended vehicles, vehicles with a proton exchange membrane fuel cell as energy source for a powertrain exist, too.

In this paper, different PEM fuel cell powertrains and a battery electric vehicle powertrain are compared regarding acceleration performance, elasticity, top speed, range, electric energy consumption, hydrogen consumption and costs. The variables of the powertrain optimization are the power of the fuel cell and the capacity of the battery. The fixed components of the PEM fuel cell powertrain are the hydrogen tank and the power of the electric motor. At the beginning, four powertrains with different fuel cell powers and battery capacities, but constant power of electric motor and hydrogen tank are defined.

In the first part of this Master Thesis, the different fuel cell and the battery electric powertrains are simulated with AVL Cruise. The powertrain model, which is built up by a team at AVL was simulated with different driving cycles to get results for the performance data of the powertrains. The acceleration performance, top speed, range and consumption were calculated in Microsoft Excel and the results were shown in graphs.

The second part deals with the cost analysis of the examined powertrains. The costs for the whole powertrain and the operating costs are determined under consideration of cost development for the future and production learning curves for different production volumes.

With the results of these two parts, the best of the examined powertrains is found and some issues are discussed for optimization for the future. To find the optimal powertrain, other different combinations of fuel cell and batteries, beside the predefined powertrains, are simulated and analyzed in terms of costs and the results were evaluated in a cost-benefit analysis. The results of the cost-benefit analysis show, that the best fuel cell to battery combination for a hydrogen tank of 4,5 kg pressurized hydrogen and an electric motor with 85 kW power has a fuel cell system power of 50 kW and a battery capacity of 4,1 kWh.

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Optimierung eines PEM-Brennstoffzellenantriebsstranges für einen Audi A3-etrón.

Neben Hybridfahrzeugen, Elektrofahrzeugen und Elektrofahrzeugen mit einer Verbrennungskraftmaschine als Range Extender existieren bereits Antriebsstränge mit einer PEM Brennstoffzelle als Energielieferant. In dieser Arbeit werden verschiedene PEM-Brennstoffzellenantriebsstränge und ein ausschließlich durch die Batterie betriebenes Elektrofahrzeug hinsichtlich Beschleunigung, Spitzengeschwindigkeit, Elastizität, Strom- und Wasserstoffverbrauch, Reichweite und Kosten miteinander verglichen. Als variable Größen für die Optimierung dienen die Leistung des Brennstoffzellensystems und die Kapazität der Batterie; fixe Größen des Antriebsstranges sind die Leistung des Elektromotors und die Speicherkapazität des Wasserstofftanks. Zu Beginn der Optimierung wurden vier verschiedene Antriebsstränge zur Untersuchung definiert.

Der erste Teil dieser Masterarbeit beschäftigt sich mit der Ermittlung der leistungsspezifischen Werte der untersuchten Brennstoffzellenantriebsstränge. Diese erfolgte mittels einer Längsdynamiksimulation in AVL Cruise. Das verwendete Fahrzeugmodell wurde von einem Team innerhalb von AVL erstellt. Für die Bestimmung von Beschleunigung, Top Speed, Verbrauch, Reichweite und Elastizität wurden verschiedene Fahrzyklen simuliert und die Ergebnisse in Microsoft Excel ausgewertet. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Diagrammen zusammengefasst und erlauben einen Vergleich der untersuchten Brennstoffzellen- und Batterieantriebssysteme.

Im zweiten Teil der vorliegenden Masterarbeit werden die Antriebsstrangkosten und die Betriebskosten der betrachteten Brennstoffzellen- und Batterieantriebsstränge analysiert. Dabei sind die Kostenentwicklung und die sinkenden Kosten für zunehmende Produktionsvolumina berücksichtigt.

Hinsichtlich der Ergebnisse des Simulationsteils und der Kostenanalyse werden Aussagen über den optimalen PEM-Brennstoffzellenantriebsstrang bezüglich Leistung und Kosten getroffen. Für die Optimierung werden, neben den vordefinierten Antriebssträngen, zusätzlich mehrere verschiedene Kombinationen aus Brennstoffzellenstackleistung und Batteriekapazität simuliert und analysiert. Mit den Ergebnissen wurde eine Nutzwertanalyse erstellt. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse zeigt den, hinsichtlich einer bestimmten Gewichtung optimierten, Antriebsstrang für den Brennstoffzellenbetriebenen Audi A3-etrón. Dieser hat eine Elektromotorenleistung von 85 kW, einen Druckwasserstofftank mit 4,5 kg gespeicherten Wasserstoff, eine Brennstoffzellenleistung von 50 kW und eine Batteriekapazität von 4,1 kWh.

Inhalt

Abkürzungen	viii
Formelzeichen	ix
1. Einführung	1
1.1 Ausgangssituation.....	2
1.2 Zielsetzung.....	2
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Wasserstoff als Energieträger	4
2.2 Prinzip und Arten einer Brennstoffzelle	7
2.3 PEM-Brennstoffzelle	9
2.4 PEM-Stack System und Antriebsstrang	14
2.5 Fuel Cell Electric Vehicles am Markt	17
2.6 Definition der Fahrwiderstandskräfte für die Längsdynamiksimulation.....	19
2.7 Trägheitskräfte im Fahrzeug.....	20
3 Ermittlung der Fahrzeugleistungsdaten mit Längsdynamiksimulation	22
3.1 Methodik.....	22
3.2 Resultate und Diskussion.....	42
4 Kostenanalyse	55
4.1 Methodik der Kostenanalyse	55
4.2 Kosten für das PEM-Brennstoffzellensystem.....	57
4.3 Kosten für den Wasserstofftank	58
4.4 Kosten der Lithium-Ionen-Batterie	59
4.5 Kosten für den Elektromotor	60
4.6 Resultate und Diskussion.....	63
5 Optimierung des Antriebsstranges	67
5.1 Untersuchte Antriebsstränge.....	67
5.2 Nutzwertanalyse	68
5.3 Technische Spezifikationen des optimierten PEM-Antriebsstranges eines FCEV ...	72
6 Zusammenfassung und Ausblick	74
6.1 Zusammenfassung	74

6.2	Ausblick und Verbesserungsvorschläge	74
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis.....	III
	Literaturverzeichnis.....	V
A.	Anhang	VII

Abkürzungen

AFC	Alkalische-Brennstoffzelle
BEV	Battery Electric Vehicle
DMFC	Direktmethanol-Brennstoffzelle
FCBHV	Fuel Cell Battery Hybrid Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
FCREV	Fuel Cell Range Extended Vehicle
GDL	Gasdiffusionlayer
HOS	Hybrid Operation Strategy
HT-PEMFC	Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
MCFC	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle
NEDC	New European Driving Cycle
NT-PEMFC	Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
NW	Nutzwert
PAFC	Phosphorsäure-Brennstoffzelle
PDU	Power Drive Unit
PEM	Polymerelektrolytmembran
ppm	parts per million
RDE	Real Driving Emission
SOC	State of Charge
SOFC	Oxidkeramische-Brennstoffzelle
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle

Formelzeichen

ω_w	Winkelgeschwindigkeit der Räder [rad/s]
A_f	projizierte Frontfläche des Fahrzeugs [m ²]
$b_{e,H2}$	Wasserstoffverbrauch [kg/km]
$b_{u,v}$	Wasserstoffverbrauch für Fahrzyklus [kg/km]
$b_{u,v\ 100}$	Wasserstoffverbrauch pro 100 km für Fahrzyklus [kg/100km]
C	Kapazität der Zelle [Wh]
C_{bat}	Batteriekapazität [kWh]
c_d	Luftwiderstandsbeiwert [-]
c_r	Rollwiderstandsbeiwert [-]
F_a	aerodynamische Widerstandskraft [N]
F_d	Summe der allgemeinen Störkräfte [N]
F_g	Abtriebskraft [N]
$F_{m,w}$	Kraft verursacht durch rotierende Komponenten im Fahrzeug [N]
F_r	Rollwiderstandskraft [N]
F_t	Antriebskraft [N]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
G_i	Gewichtung des jeweiligen Kriteriums in der Nutzwertanalyse [-]
j_i	Punktebewertung für das jeweilige Kriterium der Nutzwertanalyse [-]
K_{Base}	Kosten für Fahrgestell und Karosserie [€]
k_{Bat}	Kapazitätsspezifische Batteriekosten [€/kWh]
$k_{BEV_M\&R}$	Kosten für Wartung und Reparatur pro Kilometer für ein Elektrofahrzeug [€/km]
$K_{BEV_op_life}$	Betriebskosten des batteriebetriebenen Fahrzeugs über die Lebenszeit [€]
$K_{BEV_op_year}$	Betriebskosten des batteriebetriebenen Fahrzeugs pro Jahr [€]
k_{EM}	leistungsspezifische Elektromotorkosten [€/kW]
k_{FC}	leistungsspezifische Brennstoffzellenkosten [€/kW]
$K_{FC_op_life}$	Betriebskosten des Brennstoffzellenfahrzeugs über die Lebenszeit des Fahrzeugs [€]
$K_{FC_op_year}$	Betriebskosten des Brennstoffzellenfahrzeugs pro Jahr [€]
$k_{FCEV_M\&R}$	Kosten für Wartung und Reparatur pro Kilometer für ein Brennstoffzellenfahrzeug [€/km]
k_{H2}	massenspezifische Wasserstoffkosten [€/kg]

Formelzeichen

$K_{H2-Tank}$	Wasserstofftankkosten [€]
k_{power}	Kosten für elektrische Energie [€/kWh]
K_{profit}	Gewinnzuschlag [€]
K_{PT}	Antriebsstrangkosten [€]
m_{Base}	Fahrzeubasisgewicht ohne Antriebsstrang [kg]
m_{Bat}	Masse der Batterie [kg]
M_{Bat-i}	kapazitätsspezifische Masse der Batterie [kg/Wh]
m_{EM}	Masse des Elektromotors [kg]
m_{FC}	Masse des Brennstoffzellensystem [kg]
M_{FC}	leistungsspezifische Masse des Brennstoffzellensystems [kg/kW]
m_{FZ}	Gesamtmasse von Fahrzeug [kg]
m_{H2}	Wasserstoffmenge im Tank [kg]
$m_{H2-Tank}$	Masse des Wasserstofftanks [kg]
M_{nenn}	Nennmoment des Elektromotors [Nm]
m_r	äquivalente Masse der Trägheiten der rotierenden Komponenten [kg]
$m_{r,e}$	äquivalente Masse des Antriebsstranges [kg]
$m_{r,w}$	äquivalente Masse der Reifen [kg]
m_{ser}	Anzahl der Batterien in Serie [-]
m_v	Fahrzeugmasse [kg]
m_Z	Masse der Zelle [kg]
n	Drehzahl [rad/s]
η	Ladewirkungsgrad [-]
n_{life}	Anzahl der Ladevorgänge über die Lebenszeit des Fahrzeugs [-]
n_{nenn}	Nenn Drehzahl [rad/s]
n_{par}	Anzahl der Batterien parallel [-]
n_v	Anzahl der möglichen Fahrzyklen [-]
n_{year}	Anzahl der Ladevorgänge pro Jahr [-]
p	Reifendruck [bar]
P_{Bat}	Batterieleistung [kW]
P_{EM}	Leistung des Elektromotors [kW]
P_{FC}	Leistung des Brennstoffzellensystems [kW]
P_{FC_req}	geforderte Leistung vom PEM-Brennstoffzellensystem [kW]
P_{nenn}	Nennleistung des Elektromotors [kW]
P_{opt}	Brennstoffzellenleistung bei optimalen Wirkungsgrad [kW]

P_{req}	angeforderte Leistung des Elektromotors [kW]
Q_{Bat}	Ladung der Batterie [Ah]
Q_{nom}	nominelle Ladung der Zelle [Ah]
r_w	Radius des Reifens [m]
s_{Bat}	Reichweite mit Batterie [km]
s_{BEV}	Reichweite des batteriebetriebenen Fahrzeugs [km]
s_{FC}	Reichweite mit Wasserstoff [km]
s_{gesamt}	Gesamtreichweite [km]
s_{life}	zurückgelegte Distanz über die Lebenszeit des Fahrzeugs [km]
SOC_A	State of Charge am Anfang des Fahrzyklus [%]
SOC_E	State of Charge am Ende des Fahrzyklus [%]
SOC_O	State of Charge Obergrenze [%]
SOC_U	State of Charge Untergrenze [%]
s_v	Distanz des Fahrzyklus [km]
s_{year}	zurückgelegte Distanz pro Jahr [km]
TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtkosten) [€]
$T_{m,w}$	Moment verursacht durch rotierende Komponenten im Fahrzeug [Nm]
U_{Bat}	Spannung der Batterie [V]
U_{nom}	nominelle Batteriezellenspannung [V]
v	Geschwindigkeit des Fahrzeugs [m/s]
v_w	Tangentialgeschwindigkeit des Reifens [m/s]
z	Gesamtanzahl der Batterien im Batteriesystem [-]
α	Steigungswinkel [°]
$\Delta P_{FC_{max}}$	maximaler Leistungshub des PEM-Brennstoffzellensystems [kW]
ΔSOC	State of Charge Differenz [%]
Θ_e	Trägheitsmoment des Antriebsstranges [kg m ²]
Θ_w	Trägheitsmoment der Reifen [kg m ²]
ρ_a	Dichte der Luft [kg/dm ³]
γ	Gesamtübersetzung [-]
ω_e	Winkelgeschwindigkeit des Antriebsstranges [rad/s]

1. Einführung

Die industrielle Revolution hat dazu geführt, dass die Energie anstatt aus erneuerbaren Energiequellen wie Holz, Wasser und Wind aus fossilen Brennstoffen stammt. Durch Klimawandel und Umweltverschmutzung besteht nun die Notwendigkeit, die Energieproduktion von fossilen Brennstoffen auf die intensive Nutzung von regenerativen Energiequellen rückzustellen, dies betrifft auch den Transportsektor [1].

Nach der Erfindung des Automobils und dem Siegeszug des Verbrennungsmotors, ist es in den wirtschaftlich entwickelten Ländern heute fast unvorstellbar, auf das Automobil in der jetzigen Form zu verzichten. Aufgrund des schier endlosen Vorkommens und günstigen Preises von Benzin und Diesel wurde der Entwicklungsschwerpunkt in den letzten fünfzig Jahren auf Verbrennungskraftmaschinen mit Benzin oder Diesel als Treibstoff begrenzt. Durch den Klimawandel, den doch endlichen Rohstoffvorkommen von Erdöl und Erdgas und dem somit generierten Preisanstieg findet ein Umdenken statt, welches den Gesetzgeber und somit die Automobilindustrie anspornt über Alternativantriebe nachzudenken. Gesetzesvorgaben vom EU Parlament zwingen die Automobilhersteller die Effizienz des Verbrennungsmotors zu maximieren und gleichzeitig diesen schadstoffarm zu gestalten. Trotz neuesten Entwicklungen in der Verbrauchsminimierung und der Schadstoffminimierung stößt der Otto- bzw. Dieselmotor an seine Grenzen.

Um die Klimaziele und den vorgegebenen Kohlendioxidausstoß zu erfüllen, muss ein Umdenken der Gesellschaft und das Umschwenken auf Alternativantriebe stattfinden. Möglichkeiten bieten die elektrische Energiespeicherung in Batterien und die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger. Bei der Verwendung dieser Energieträger ist es möglich, lokal keine Schadstoffe zu generieren, jedoch sollte man die Energieerzeugung auch in Betracht ziehen, da in vielen Ländern (z.B. China) der Großteil der Energie mit fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdgas) erzeugt wird und dadurch Emissionen entstehen. Das heißt, um die Alternativantriebe sinngemäß einzusetzen, ist auch ein Umschwenken der Energietechnik auf emissionsfreie Energieerzeugung notwendig.

Es sind bereits einige Elektrofahrzeuge und Hybridfahrzeuge am Markt. Das Elektroauto hat mit dem großen Nachteil zu kämpfen, dass die Reichweite eher gering ist. Das Hybridauto hat dieses Problem nicht, arbeitet jedoch mit einer Verbrennungskraftmaschine und stößt Emissionen aus. Ein Brennstoffzellenfahrzeug mit Batterie würde das Reichweitenproblem lösen, da an Bord mit der Brennstoffzelle elektrische Energie erzeugt wird, die dem Elektromotor Energie liefert. Die Batterie dient dabei als Pufferspeicher. Die Brennstoffzelle als Energieerzeuger befindet sich noch in der Anlaufphase und ist wegen der geringen Stückzahlen wirtschaftlich noch nicht rentabel.

Wasserstoff ist ein kohlenstofffreier Energieträger und kann umweltfreundlich und regenerativ erzeugt werden. Es wäre zum Beispiel möglich durch Wind, Wasser oder Sonnenenergie bei Überproduktion, die überschüssige Energie zu benützen um mittels Elektrolyse Wasserstoff zu erzeugen. In einem wasserstoffbetriebenen Fahrzeug kann der

Wasserstoff entweder in einer Verbrennungskraftmaschine schadstoffarm verbrannt, oder in einer Brennstoffzelle schadstofffrei mit Sauerstoff in Wasser umgewandelt werden. Der Schwerpunkt des wasserstoffbetriebenen Autos wird im Brennstoffzellenbereich sein, da diese den Wasserstoff mit einem höheren Wirkungsgrad umsetzt [2].

1.1 Ausgangssituation

Brennstoffzellen stellen ein wichtiges, hocheffizientes und schadstofffreies Antriebskonzept für die Zukunft dar. Weltweit wird dieses Antriebssystem von praktisch allen Fahrzeugherstellern entwickelt und langsam in den Markt eingeführt. Auch AVL ist in diesem Bereich sehr aktiv.

Die Firma AVL List GmbH in Graz hat den Auftrag im Rahmen des Projektes PEM REX S ein wettbewerbsfähiges Antriebssystem basierend auf PEM-Technologie für einen Audi A3 - e-tron zu entwickeln. Die Vorgabe ist die Entwicklung eines Konzeptes, in dem das PEM System als Hauptenergielieferant fungiert, also nicht als Range Extender für ein Elektrofahrzeug eingesetzt wird. Dennoch ist ein Batteriesystem für diesen Antriebsstrang nötig, da Lastspitzen abgefangen werden müssen.

Das PEM REX S Projekt besteht aus vier Arbeitspaketen, im Arbeitspaket 1 sollen Spezifikationen für das System erarbeitet werden, was mit Hilfe von Fahrzeugsimulationen, Parameterstudien, Sensitivitätsanalysen und mehrdimensionaler Optimierung geschieht. Antriebsspezifikationen sollen bezüglich Wirtschaftlichkeit und Effizienz untersucht werden. Im Arbeitspaket 2 sollen von der Firma Elring Klinger PEM-Stacks zur Verfügung gestellt werden. Im Arbeitspaket 3 wird ein Labormuster entwickelt und aufgebaut und im Arbeitspaket 4 sollen auf Basis der AVL Zuverlässigkeitsentwicklungsmethodik Load Matrix, Schädigungszustände identifiziert und eine „Diagnosis-based-Control“ Betriebsstrategie umgesetzt werden. Die vorliegende Masterarbeit bewegt sich im Rahmen des Arbeitspaketes 1.

Zusammenfassung der Gesamtprojektziele:

- Entwicklung eines PEM-Antriebsstranges unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit, Bauraumbeschränkung und Fahrzeugleistung
- Spezifikationserstellung des PEM-Antriebsstranges und der Subsystemkomponenten
- Erstellung eines Labormusters
- „Diagnosis-based-Control“ Entwicklung, Validierung und Implementierung
- Erstellung einer Fahrzeugintegrationsstudie

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen der gegenständlichen Masterarbeit soll die Architektur eines PEM-Antriebssystems wirtschaftlich und technisch optimiert werden. Als Optimierungsparameter dienen dabei die Leistung des PEM-Brennstoffzellensystems und die Kapazität der Batterie; Tankgröße und Elektromotor wurden zu Vergleichszwecken konstant gehalten.

Die Arbeit gliedert sich prinzipiell in zwei Teile:

- Die Ermittlung und den Vergleich der folgenden fahrzeugspezifischen Daten für unterschiedliche vordefinierte PEM-Antriebsstränge:
 - Top Speed
 - Beschleunigung, Zeit von 0 auf 100 km/h
 - Reichweite
 - Elastizität, Zeit von 80 auf 120 km/h
 - Verbrauch

Die Bestimmung der Daten soll mittels einer Längsdynamiksimulation in AVL Cruise durchgeführt werden.

- Kostenanalyse und Vergleich der untersuchten Antriebsstränge. Dabei sollen Antriebsstrangkosten und Betriebskosten für die PEM-Antriebsstränge ermittelt werden.

Aufgrund dieser Ergebnisse soll eine optimale Spezifikation der Leistung des PEM-Brennstoffzellensystems und der Batteriekapazität bezüglich Fahrperformance und Kosten bestimmt werden.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zu Wasserstoff als Brennstoff und die Brennstoffzellentechnologie erklärt. Näher eingegangen wird dabei auf die PEM-Technologie und deren Einsatz in einem Antriebsstrang für ein Fahrzeug. Am Ende des Kapitels werden die sich bereits am Markt befindlichen Brennstoffzellenfahrzeuge aufgelistet.

2.1 Wasserstoff als Energieträger

Wasserstoff mit der Bezeichnung H ist das kleinste und zugleich das häufigste Atom, es besteht aus einem Protonenkern und einem umkreisenden Elektron. Im Weltall kommt es in reiner Form vor, auf der Erde tritt Wasserstoff nur in Form von Verbindungen auf, wie z.B. in Form von Wasser H_2O oder in zahlreichen organischen Verbindungen, wie Kohlenwasserstoffen (z.B. Methan CH_4 usw.) [2]. Da Wasserstoff auf der Erde nicht in reiner Form verfügbar ist, sind diverse Herstellungsverfahren notwendig, welche in Kapitel 2.1.1 näher erklärt werden. Die bei der Gewinnung von Wasserstoff verbrauchte Energie wird bei der Verbrauchsreaktion, mit Abzug der Umwandlungsverluste wieder frei. Gleichung (2.1) verdeutlicht die chemische Reaktion [3].



Tabelle 2.1 zeigt einige Stoffeigenschaften von Wasserstoff. Wasserstoff als Energielieferant wird oft als die Lösung der Umwelt- und Klimaprobleme gesehen, da er bei der Energieproduktion in der Brennstoffzelle keinerlei Schadstoffe bildet und die Wasserstoffproduktion mittels erneuerbarer Energien kein Kohlendioxid freisetzt.

Tabelle 2.1: Stoffeigenschaften Wasserstoff [2]

Eigenschaften	Wert und Einheit
Molare Masse M	2,016 kg/kmol
Spezielle Gaskonstante R	4124 J/kgK
Unterer Heizwert H_U	120 MJ/kg = 33,33 kWh/kg
Brennwert B	142 MJ/kg = 39,44 kWh/kg
Siedepunkt T_s	-252,85 °C
Dichte flüssig ρ	70,8 kg/m ³
Dichte fest ρ	76 kg/m ³
Dichte bei 0°C und 1,01325 bar	0,09 kg/m ³

2.1.1 Herstellung von Wasserstoff

Die Herstellungsverfahren von Wasserstoff unterscheiden sich in Betracht ob fossile Energieträger oder erneuerbare Energiequellen verwendet werden. Die gängigste Methode zur Wasserstoffgewinnung ist die Erdgasreformierung, um Wasserstoff aus Wasser zu gewinnen ist eine Elektrolyse notwendig. Da die Wasserstoffherstellung nicht das Thema dieser Arbeit ist, beschränkt sich dieses Kapitel auf diese beiden Methoden, weitere Informationen zur Wasserstoffherstellung sind aus [2] zu entnehmen. Die Herstellung durch Elektrolyse aus Wasser ist eine zukunftsorientierte Methode, da diese, bei Einsatz von erneuerbaren Energien bei der Stromproduktion CO_2 -neutral und schadstofffrei ist.

2.1.1.1 Erdgasreformierung

Die Erdgasreformierung ist die zurzeit gängigste Herstellungsmethode von Wasserstoff. Bei diesem Prozess wird Wasserdampf mit Erdgas katalytisch umgewandelt, wobei man ein wasserstoffhaltiges Synthesegas gewinnt. Dieser Prozess geschieht unter hohem Druck und hoher Temperatur. Das produzierte Synthesegas wird in einem weiteren Prozess von den Kohlenstoffverbindungen getrennt und man erhält Wasserstoff mit einem Reinheitsgrad von über 99%.



Die Reaktionsgleichung (2.2) stellt die Gesamtreaktion bei der Erdgasreformierung dar. [1]

2.1.1.2 Elektrolyse

Bei der Elektrolyse wird mit elektrischem Strom Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Wird Wasserstoff durch Elektrolyse hergestellt, muss man die Energieproduktion für den nötigen elektrischen Strom näher in Betracht ziehen, da diese einen großen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad und die Emissionen hat. Prinzipiell besteht ein Elektrolyseur aus einer elektrochemischen Zelle, welche mit Wasser gefüllt ist. In dieser Zelle befinden sich zwei Elektroden an denen eine externe Spannungsquelle angeschlossen ist. Beim Überschreiten einer kritischen Spannung bewegen sich die positiv geladenen Wasserstoffionen zur Kathode, wo sie zu Wasserstoffatomen reduziert werden und sich zu einem Wasserstoffmolekül H_2 verbinden. An der Anode wird dabei Sauerstoff O_2 erzeugt.

Die drei wichtigsten Elektrolyseure sind der basische Elektrolyseur, der PEM-Elektrolyseur und der Hochtemperaturelektrolyseur. [1]

2.1.2 Speicherung von Wasserstoff

Die Speicherung spielt beim Einsatz von Wasserstoff als Energieträger im Transportsektor eine große Rolle, da Wasserstoff eine relativ geringe Energiedichte pro Volumen aufweist. Aufgrund dieser Tatsache muss der Wasserstoff im Tank unter hohem Druck oder im flüssigen Zustand gespeichert werden. Abbildung 2.2 stellt einen Vergleich der volumetrischen Energiedichten verschiedener Energieträger dar. Die gravimetrischen Energiedichten werden in Abbildung 2.3 dargestellt. Mit dem derzeitigen Stand der Technik setzt man auf Druckbehälter mit 300 bis 700 bar bei Raumtemperatur, um eine Menge von 3,5 – 5 kg Wasserstoff in gasförmigen Zustand zu speichern. Der Trend bewegt sich weg von der Speicherung von flüssigem Wasserstoff, da das Kühlsystem sehr aufwendig ist, um den Wasserstoff mit einem Siedepunkt von $-252,85 \text{ °C}$ im flüssigen Aggregatzustand zu halten [3]. Abbildung 2.1 zeigt einen Druckwasserstofftank.



Abbildung 2.1: Druckwasserstofftank [4]

Wegen des hohen Drucks und der Knallgasreaktion bei Kontakt des Wasserstoffgases mit Luft muss, wegen der möglichen Explosionsgefahr, ein besonderes Augenmerk auf die Sicherheit gelegt werden. Die Tankhülle muss dem entsprechend konstruiert sein, um Leckbildung bei einem Crash zu vermeiden. Technisch realisiert wird das meist durch eine kohlefaserverstärkte Tankhülle. Möglich ist auch die Speicherung in einer Art Metallschwamm, in dem der Wasserstoff beim Betanken eindiffundiert und das schlagartige Austreten des Gases bei einem Leck verhindert.

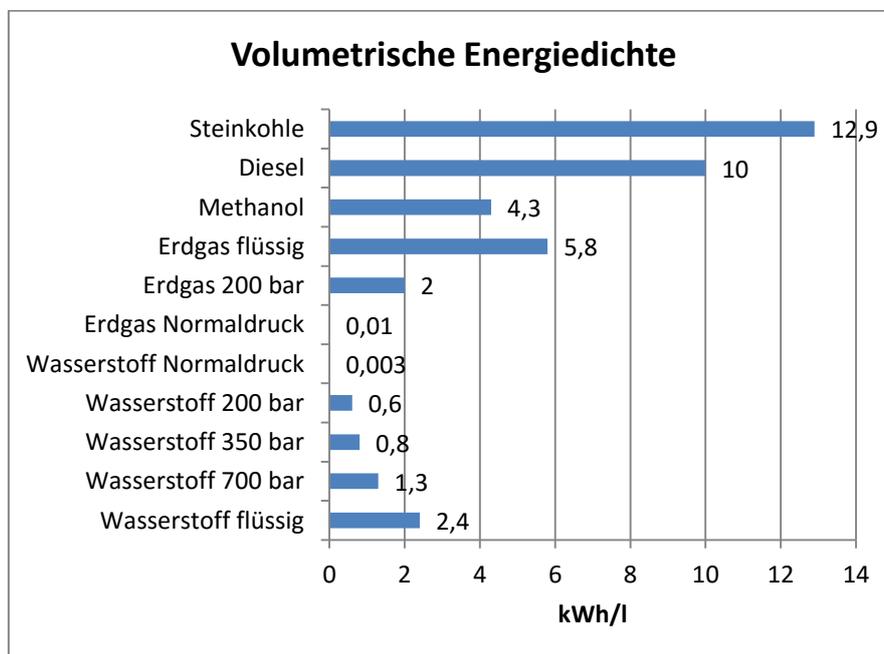


Abbildung 2.2: Volumetrische Energiedichten von verschiedenen Energieträgern [3]

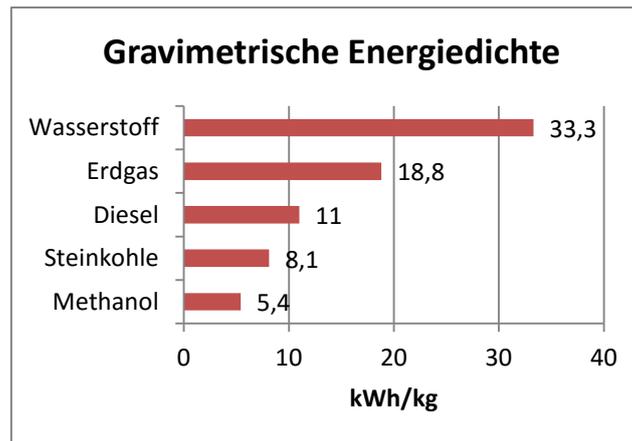


Abbildung 2.3: Gravimetrische Energiedichten von verschiedenen Energieträgern [3]

2.2 Prinzip und Arten einer Brennstoffzelle

2.2.1 Was ist eine Brennstoffzelle?

Eine Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler. Dies bedeutet, dass die chemische Energie des Brennstoffes direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Beim Energieumwandlungsprozess einer Brennstoffzelle reagiert der reine Wasserstoff oder der durch den Brennstoff gewonnene Wasserstoff, durch den Einsatz eines Elektrolyten und von Elektroden, mit Sauerstoff zu Wasser, Hitze und elektrischer Energie, wie schematisch in Abbildung 2.4 dargestellt wird. Der Wasserstoff kann dabei in reiner Form, in Form von wasserstoffhaltigen Gasen (z.B. Gasgemischen mit CO_2 , N_2 , CO), in Form von Kohlenwasserstoffen (z.B. Erdgas) oder flüssigen Kohlenwasserstoffen (z.B. Methanol) auftreten. [5]

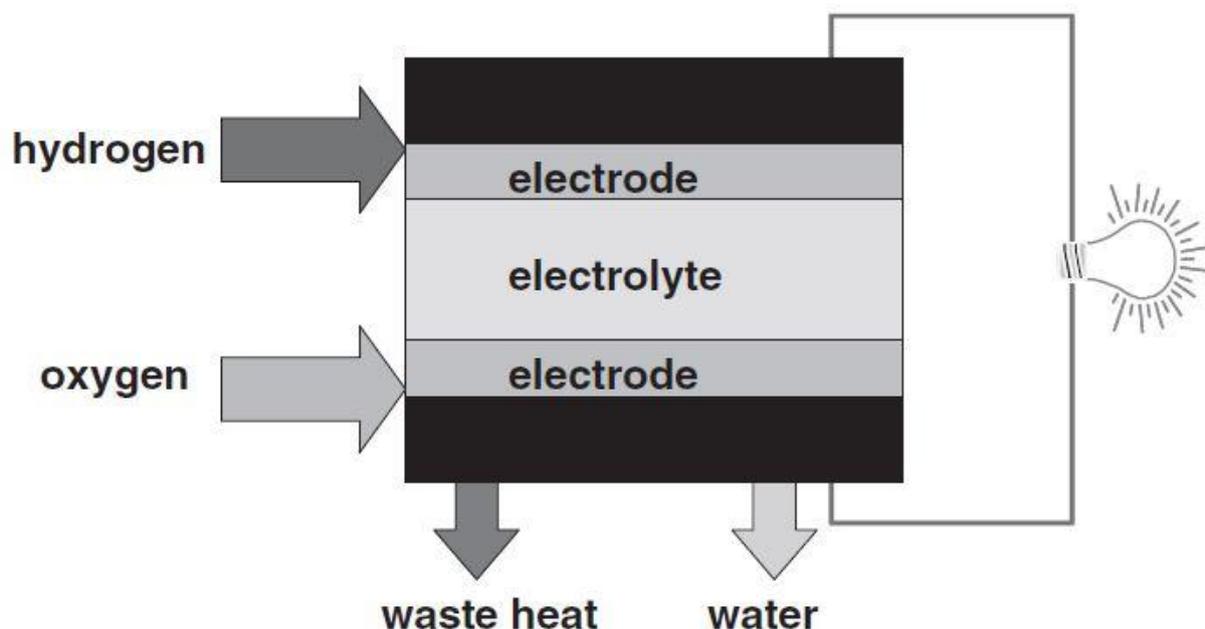


Abbildung 2.4: Prinzip einer Brennstoffzelle [5]

Im Gegensatz zu den meisten Energiewandlern geschieht dies ohne bewegte Komponenten. Durch Oxidation und Reduktion (Elektronenabnahme und Elektronenaufnahme) werden

Elektronen über einen elektrischen Kreis geleitet, welche dann die erzeugte elektrische Energie ausmachen. Anhand der Polyelektrolytmembran-Brennstoffzelle in Kapitel 2.3 wird die Funktion näher erklärt.[5, 6]

Die Gründe, warum die Brennstoffzelle ein großes Zukunftspotential hat, sind einerseits der hohe Wirkungsgrad von bis zu 60 % (Verbrennungsmotor 36 - 43 %) und andererseits die lokale Emissionsfreiheit von CO₂ und anderen klimaschädlichen Stoffen. Zu bedenken ist jedoch auch der Herstellungsweg des Wasserstoffs, da bei bestimmten Herstellungsprozessen Kohlendioxid emittiert wird (siehe Kapitel 2.1.1). Der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle ist nicht vom Carnot-Wirkungsgrad beschränkt und liegt somit höher als der des Verbrennungsmotors. [7]

Die Brennstoffzelle ist keineswegs eine neue Errungenschaft. Bereits im Jahr 1838 wurde der physikalische Effekt der Brennstoffzelle beobachtet und darauf basierend von dem walisischen Wissenschaftler Sir William Grove im Jahr 1839 demonstriert. In den frühen 1960er Jahren wurde die Brennstoffzelle in der Raumfahrt, im Rahmen einer Apollo-Mission, als Energieversorgung für Kommunikations- und Hilfssysteme eingesetzt. General Motors erzeugte ebenfalls in den 1960er Jahren einen brennstoffzellenbetriebenen Van. [5]

Eingeteilt werden die verschiedenen Brennstoffzellen entweder nach deren Betriebstemperatur oder nach dem verwendeten Elektrolyt. Ab einer Temperatur von ca. 600°C gilt eine Brennstoffzelle als Hochtemperaturbrennstoffzelle (HT) [2]. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die existierenden Brennstoffzellen und deren Elektrolyt, Betriebstemperatur, Brennstoff und deren Anwendung. Für die Verwendung als Primärenergielieferant in einem brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeug ist die NT-PEMFC am besten geeignet, da diese mit relativ niedrigen Temperaturen arbeitet und dadurch einen schnellen Start ermöglicht. Zusätzlich hat die NT-PEMFC einen relativ hohen Wirkungsgrad von 50-60 %, besitzt einen hohen Sicherheitsstandard und weist eine hohe Leistungsdichte auf [8].

Tabelle 2.2: Arten von Brennstoffzellen [9, 10]

Typ	Elektrolyt	Betriebs- temperatur	Brennstoff	Anwendung
AFC	Wässrige Kalilauge	60-80 °C	H ₂	Raumfahrt
DMFC (PEMFC)	Protonenleitende Membran	ca. 80 °C	CH ₃ OH	Kleingeräte
NT - PEMFC	Protonenleitende Membran	60-120 °C	H ₂	Raumfahrt, Automobil
HT – PEMFC	Protonenleitende Membran	120-200 °C	H ₂	Raumfahrt, Automobil
PAFC	Konzentrierte Phosphorsäure	160-220 °C	H ₂	Kleinkraftwerke
MCFC	Karbonat - Schmelze	Ca. 650 °C	H ₂ , CO	Kraftwerke
SOFC	Dotiertes Zirkonium Dioxid	1000 °C	H ₂ , CO	Energieerzeugung und APU

In der vorliegenden Masterarbeit wird die NT-PEMFC eingesetzt.

2.3 PEM-Brennstoffzelle

2.3.1 Funktion der PEM-Brennstoffzelle

In Abbildung 2.5 ist eine PEM-Brennstoffzelle schematisch abgebildet. Diese benützt den Wasserstoff als Reduktionsmittel und den in der Luft enthaltenen Sauerstoff als Oxidationsmittel.

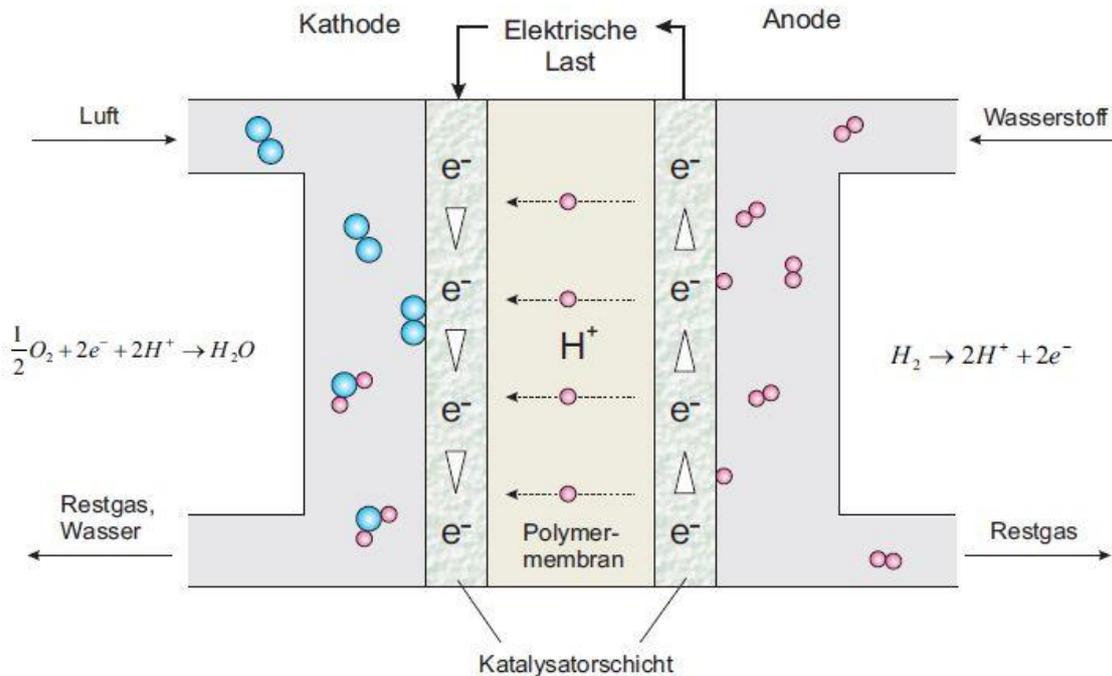
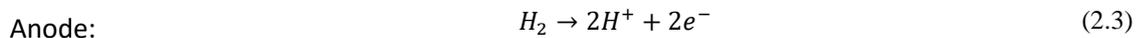
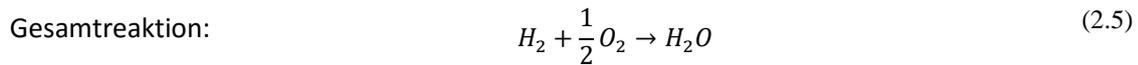
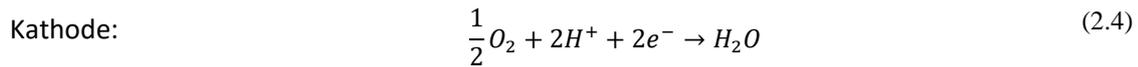


Abbildung 2.5: PEM Brennstoffzelle [6]

Die Wasserstoffmoleküle wandern durch die GDL (Gasdiffusionsschicht) zu der Katalysatorschicht. Die Katalysatorschicht absorbiert das Wasserstoffmolekül H_2 und dies wird in Wasserstoffatome geteilt, wobei diese zu Wasserstoffprotonen H^+ oxidieren (Abgabe des Elektrons). Mit dem Wasser der befeuchteten Polymermembran bilden die Wasserstoffprotonen H_3O^+ -Ionen. Wasserstoffprotonen wandern somit von der Anode zur Kathode und die H_3O^+ -Ionen diffundieren ebenfalls Richtung Kathode. An der Katalysatorschicht der Kathode wird der in der Luft enthaltene Sauerstoff reduziert (Elektronenaufnahme) und bildet mit den H^+ -Ionen Wasser H_2O . Durch die Diffusion durch die Polymermembran wird Wasser zur Kathode mittransportiert; darum kommt es zu Austrocknungserscheinungen an der Anode. Um Austrocknung zu verhindern, muss gebildetes Wasser von der Kathodenseite zur Anode rückdiffundieren oder mit einem technischen Hilfssystem für die Befeuchtung der Anode gesorgt werden. In den Reaktionsgleichungen (2.3)-(2.5) sind die chemischen Reaktionen in der PEM-Brennstoffzelle abgebildet.





Kohlenmonoxid beeinflusst die Leistung der Brennstoffzelle erheblich, da die aktiven Zentren der Elektroden blockiert werden. Dies geschieht schon bei einer Kohlenmonoxid Gas-Konzentration von 100 ppm. Schwefel und Schwefelverbindungen sollten auch in der Gas- bzw. Luftzufuhr vermieden werden.[2]

2.3.2 Thermodynamik einer Brennstoffzelle

Die thermodynamischen Prozesse wurden mit [8] erarbeitet. Wenn Wasserstoff H_2 und O_2 miteinander zu H_2O reagieren, wird eine bestimmte Wärmemenge Q_H freigesetzt, welche „Bildungsenergie“ genannt wird. Wenn diese Reaktion unter konstantem Druck geschieht, ist die Bildungsenergie die Enthalpiedifferenz ΔH der Produkte und der Reaktanten. Dieser Wert wird als Heizwert bezeichnet, siehe Gleichung (2.6).

$$Q_H = -\Delta H = -(H_{Produkt} - H_{Reaktanten}) \quad (2.6)$$

Der Heizwert hängt vom Druck, der Temperatur und dem Aggregatzustands des Wassers im Produkt ab. Kommt das Wasser in Form von Dampf vor, spricht man vom unteren Heizwert H_U ; kommt kondensiertes Wasser vor, spricht man vom oberen Heizwert H_O , da die Kondensationswärme noch dabei ist. Laut dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ist in einem isolierten System ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung und ohne Volumsänderungsarbeit die theoretische Arbeit genau die Enthalpiedifferenz, siehe Formel (2.7).

$$W_{id} = -\Delta H = Q_H \quad (2.7)$$

Es ist jedoch theoretisch nicht möglich, die gesamte Arbeit W_{id} einer Brennstoffzelle zu nützen. Für die Brennstoffzelle existiert eine Wirkungsgradbeschränkung, wenn man die Enthalpie betrachtet.

Bei einer reversiblen Reaktion ist die abgegebene Wärmemenge Q_S die Temperatur ϑ multipliziert mit der Entropiedifferenz ΔS vor und nach der Reaktion, siehe Gleichung (2.8). Bei positivem Vorzeichen wird Wärme abgegeben, ansonsten aufgenommen.

$$Q_S = -\vartheta \Delta S \quad (2.8)$$

Wird z.B. 1 kmol H_2O bei einer Temperatur von $\vartheta = 25^\circ C$ (298 K) aus H_2 und O_2 generiert, fehlen bei der Betrachtung von Tabelle 2.3 in der Entropiebilanz 44,4 kJ/kmolK. Das bedeutet, dass bei der Reaktion $Q_S = 298 * 44,4 = 13,2 MJ/kmol$ Wärme an die Umgebung abgegeben wurde.

Tabelle 2.3: Enthalpie und Entropiedaten bei Raumtemperatur [8]

H ₂ gasförmig	H=0 MJ/kmol	S=130,6 kJ/kmolK
O ₂ gasförmig	H=0 MJ/kmol	S=205,0 kJ/kmolK
H ₂ O Dampf	H=-241,8 MJ/kmol	S=188,7 kJ/kmolK

Da bei jeder Reaktion eine bestimmte Wärmemenge abgegeben wird, wird der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle beschränkt. Die maximal umsetzbare elektrische Arbeit einer Brennstoffzelle, bei konstantem Druck und Temperatur, ist gegeben durch W_{rev} , siehe Formel (2.9) und (2.11). G wird als freie Energie bezeichnet, siehe Formel (2.10).

$$-W_{rev} - Q_S = \Delta H \rightarrow W_{rev} = -\Delta H + \Delta(\vartheta S) = -\Delta G \quad (2.9)$$

$$G = H - \vartheta S \quad (2.10)$$

$$W_{rev} = Q_H - Q_S \quad (2.11)$$

Der elektrochemische Caront-Wirkungsgrad η_{id} ergibt sich laut Gleichung (2.12) aus dem Verhältnis der maximalen Arbeit im Falle eines reversiblen Prozesses und dem Heizwert.

$$\eta_{id} = \frac{-\Delta G}{-\Delta H} = 1 - \frac{\vartheta \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{Q_S}{Q_H} \quad (2.12)$$

Mit der Formel (2.13) kann die verwertbare Arbeit einer Brennstoffzelle, mit der Zellenspannung U_{fc} berechnet werden. N_0 ($6,022 \cdot 10^{26}$) gibt die Anzahl der Moleküle an, die ein kmol Wasserstoff hat an, n_e ist die Anzahl der freien Elektronen für jedes kmol Wasserstoff und q ist die Ladung eines Elektrons ($1,6 \cdot 10^{19} \text{C}$). $F = n_e q$ gibt die Faraday-Konstante an.

$$W = n_e q N_0 U_{fc} = n_e F U_{fc} \quad (2.13)$$

Mit der Annahme, die Arbeit in der Zelle sei reversibel (U_{rev} reversible Zellenspannung) kann laut (2.14) die freie Energie berechnet werden.

$$W_{rev} = n_e q N_0 U_{rev} = n_e F U_{rev} = -\Delta G \quad (2.14)$$

U_{id} gibt die kalorische Zellenspannung an, die im unmöglichen Fall, dass die gesamte Enthalpie ΔH in elektrische Energie umgewandelt werden würde, erreicht wird. Formel (2.15) gibt die Berechnung von U_{id} an.

$$U_{id} = -\frac{\Delta H}{n_e F} \quad (2.15)$$

Die Energie, die in Form von Wärme durch die Reaktion verloren geht, kann mit Gleichung (2.16) berechnet werden. Diese Wärme muss durch ein Kühlsystem vom Brennstoffzellensystem abgeführt werden.

$$P_l(t) = I_{fc}(t)(U_{id} - U_{fc}(t)) \quad (2.16)$$

2.3.3 Komponenten einer PEM-Brennstoffzelle

Die Hauptkomponente der PEM-Brennstoffzelle ist die Membran-Elektrodeneinheit. Diese besteht aus der Polymerelektrolytmembran mit den aufgeprägten Katalysatorschichten, welche als Elektroden dienen. Nach den Elektroden folgen die Gasdiffusionsschichten, deren Funktion die gleichmäßige Verteilung der Gase auf die Elektroden ist. Auf die Gasdiffusionsschichten folgen die Stromkollektorplatten. Diese dienen der Stromableitung, aber auch der Gas- und Wasserzufuhr bzw. -abfuhr. In Abbildung 2.6 sind die Komponenten der PEM-Brennstoffzelle dargestellt. In den folgenden Punkten wird die Funktion der einzelnen Komponenten näher erklärt. Die Erläuterung der Komponenten ist an [6] angelehnt.

2.3.3.1 Membran

Die primäre Aufgabe der Polymerelektrolytmembran besteht darin, den Wasserstoffprotonentransport sicherzustellen. Dazu soll sie noch die beiden Gasräume voneinander trennen und elektrisch isolieren. Als Voraussetzung für den Protonentransport gilt eine gute protonische Leitfähigkeit. Die heutigen Membranen bestehen aus Nafion und sind zwischen 25 μm und 175 μm dick.

Durch den Wassertransport zur Anode und die Wasserbildung an der Kathode entsteht ein Konzentrationsgradient. Dieser bewirkt, dass das Wasser durch die Membran von der Kathode zur Anode rückdiffundiert. Für eine gute protonische Leitfähigkeit muss ein hoher Befeuchtungsgrad der Membran gegeben sein, welcher rein durch die Rückdiffusion von Wasser durch die Membran nicht gegeben ist. Um die Membran ausreichend mit Wasser zu versorgen, werden das Wasserstoffgas sowie das Sauerstoffgas vor dem Eintritt in die Brennstoffzelle befeuchtet. Dem Befeuchtungsgrad der Membran kommt bei dem Betrieb einer PEM-Brennstoffzelle eine große Bedeutung zu.

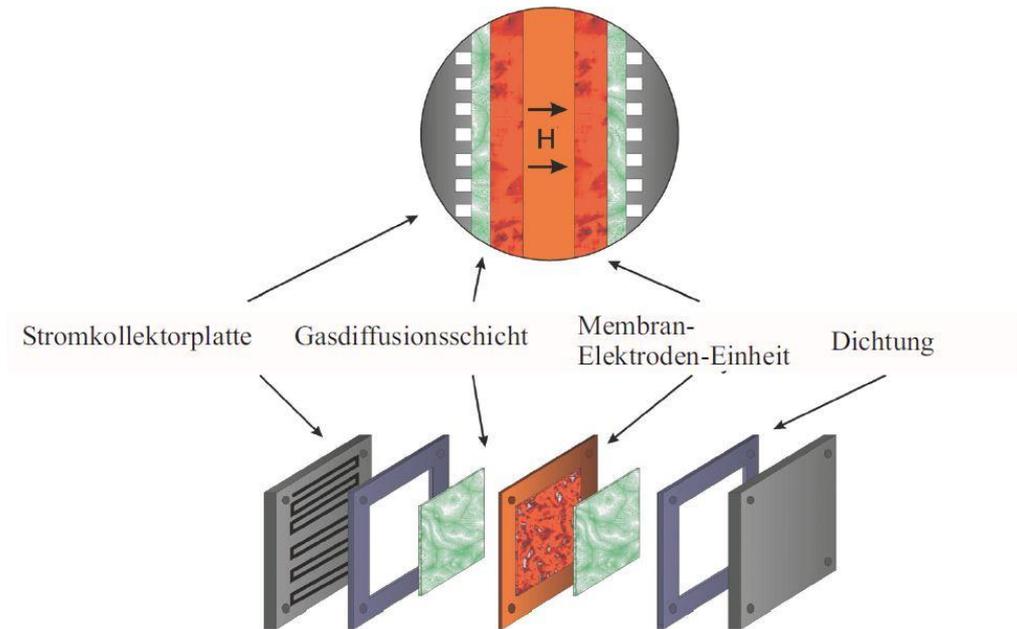


Abbildung 2.6: Komponenten einer PEM-Brennstoffzelle [6]

2.3.3.2 Katalysatorschicht

Ziel der Katalysatorschicht ist es, eine möglichst hohe Reaktionsrate zu gewährleisten. Dies wird durch eine große Katalysatoroberfläche erreicht. Die Reaktion kann nur an der Dreiphasengrenze, d.h. an der Stelle wo sich Gas, Katalysator und Elektrolyt berühren, stattfinden. Als Werkstoff wird meistens Platin verwendet. In Abbildung 2.7 ist die Dreiphasengrenze in der Katalysatorschicht abgebildet. Um die Protonenleitung in der Katalysatorschicht zu gewährleisten, wird ein Ionomer verwendet, welches dem Werkstoff der Membran sehr ähnlich ist.

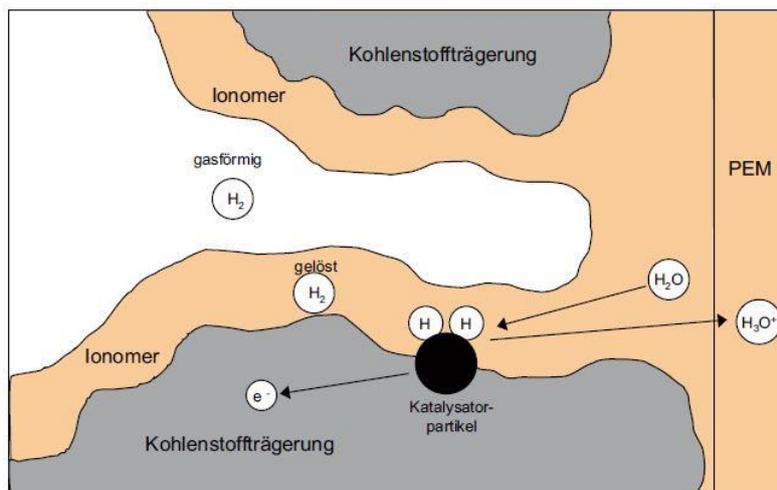


Abbildung 2.7: Dreiphasengrenze Gas, Katalysator, Elektrolyt [6]

2.3.3.3 Gasdiffusionsschicht

Diese Komponente verteilt das zugeführte Gas gleichmäßig über die gesamte Elektrode, um diese gleichmäßig nutzen zu können. Es muss zusätzlich gewährleistet werden, dass der Wasser- bzw. Wasserdampftransport zur Elektrode stattfindet und den Gastransport nicht behindert. Die Gasdiffusionsschicht muss elektrisch leitend sein, da sie das Bindeglied zwischen der Elektrode und der Stromkollektorplatte ist. Als Werkstoff wird oft Kohlenstoffpapier oder Kohlenstoffgewebe verwendet.

2.3.3.4 Stromkollektorplatten

Die Stromkollektorplatten leiten den elektrischen Strom ab. Sie sorgen auch für den Gas-An- und Abtransport der Elektroden. Darum sind in den Stromkollektorplatten Gaskanäle eingebaut. Die Form und Lage der Kanäle hat großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der PEM-Brennstoffzelle. Bei mehreren Brennstoffzellen übereinander, den sog. Stacks, dienen die Stromkollektorplatten als Bipolarplatten. Das bedeutet, sie sind mit der Anode der vorliegenden Zelle verbunden sowie mit der Kathode der darauf folgenden Zelle. Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9 zeigen eine mögliche Anordnung der Gaskanäle in einer Stromkollektorplatte.

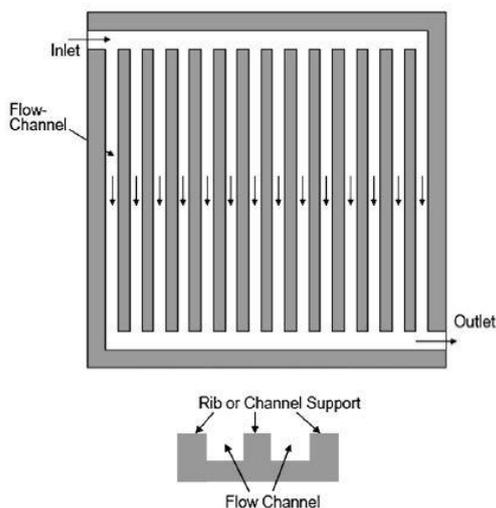


Abbildung 2.8: Gaskanäle in einer Stromkollektorplatte [11]

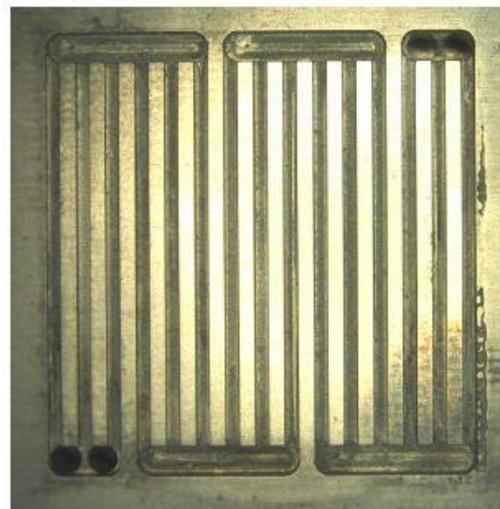


Abbildung 2.9: Gaskanalanordnung [11]

2.4 PEM-Stack System und Antriebsstrang

2.4.1 Brennstoffzellenstack

Wie in Kapitel 2.3.3 erklärt, ist die Polymerelektrolytmembran das Herzstück der Brennstoffzelle. Die reale Leerlaufspannung einer einzelnen Brennstoffzelle beträgt nur ca. 1,0 V und während des Betriebs werden, in Abhängigkeit von der Stromdichte, nur Spannungen von 0,6 – 0,8 V erreicht. Um höhere Spannungsniveaus und höhere Leistungsdichten zu erreichen, werden mehrere PEM-Brennstoffzellen seriell zu einem Stack aneinandergereiht, siehe Abbildung 2.10. Abbildung 2.11 zeigt einen Laboraufbau eines Brennstoffzellenstacks in der Realität. Dabei werden abwechselnd die Membranen und die Bipolarplatten aneinandergereiht. Der gesamte Wasserstoff- und Sauerstoffzufluss des Stacks

wird von allen Zellen geteilt. Durch die Anzahl der Zellen kann die maximale Leistung des PEM-Stacks bestimmt werden.

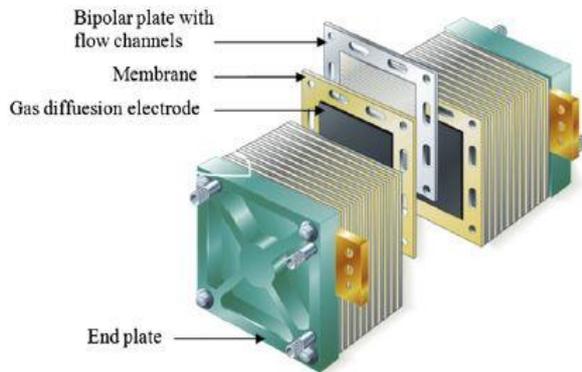


Abbildung 2.10: PEM-Stack [11]

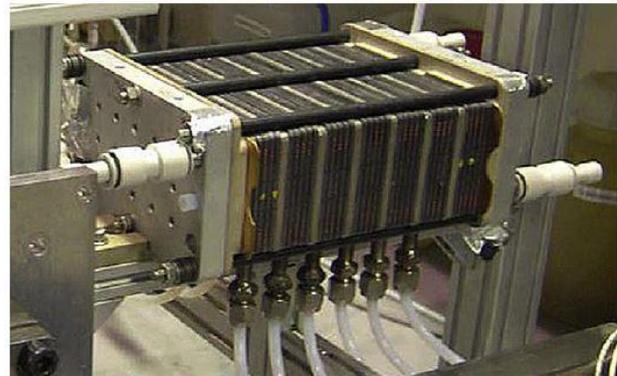


Abbildung 2.11: PEM-Stack Labor [11]

2.4.2 Hilfssysteme

Um einen Brennstoffzellenstack dauerhaft zu betreiben, ist eine Reihe von Hilfssystemen nötig. Ein beispielhafter Aufbau ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Im Prinzip können diese Hilfssysteme in vier Kreisläufe unterteilt werden: den Befeuchtungskreislauf (humidification circuit), den Luftkreislauf (air circuit), den Wasserstoffkreislauf (hydrogen circuit) und den Kühlkreislauf (cooling water).

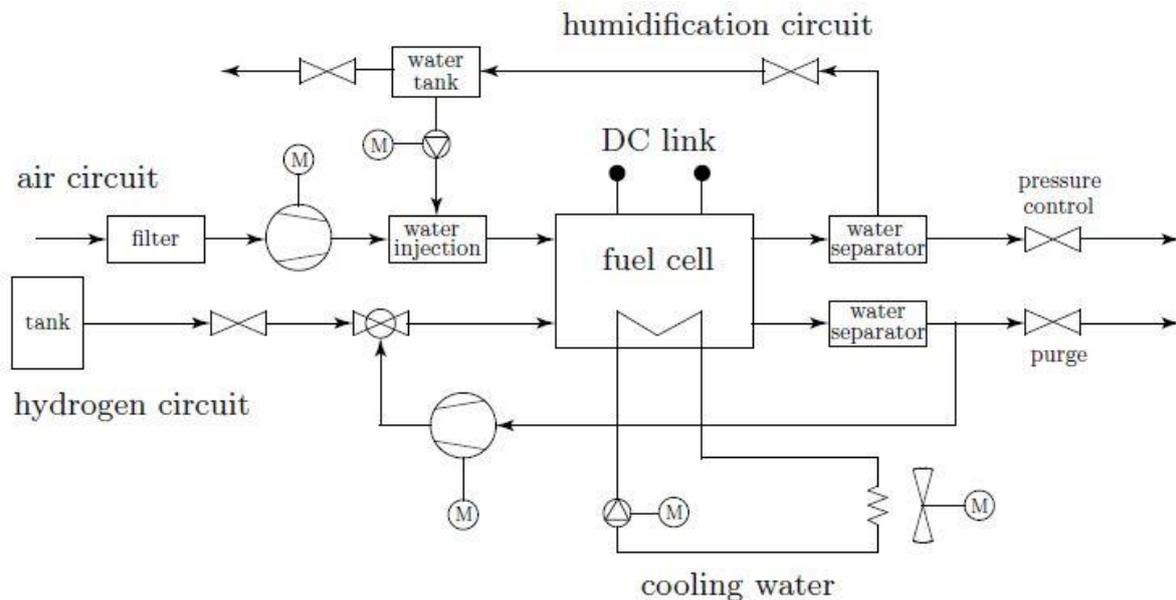


Abbildung 2.12: PEM-Stack mit Hilfssystemen [8]

Der Wasserstoff gelangt vom gasförmigen, unter Druck stehenden Wasserstofftankssystem über das Druckregelventil in den Brennstoffzellenstack. Bevor der Brennstoff in den Stack eintritt, wird er noch mit einem Teil des Brennstoffzellen-Reaktionsproduktwassers befeuchtet, um ein Austrocknen der Zellen, wie in Kapitel 2.3.1 erklärt, zu verhindern. Am Auslass wird der nicht verbrauchte Wasserstoff durch eine Rezirkulationspumpe in den Kreislauf rückgespeist, wenn der Brennstoffzellenstack nicht den gesamten Wasserstoff verbraucht. Die zugeführte Luft wird durch einen Filter gereinigt, durch einen Kompressor

verdichtet und anschließend befeuchtet. Der Kühlkreislauf führt die Reaktionswärme des Brennstoffzellenstacks ab und kühlt zusätzlich die Kompressormotoren. Die Wärme des Kühlwassers wird durch Ventilatoren abgeführt. [8]

2.4.3 Komponenten eines PEM-Antriebsstrangs

Ein Antriebsstrang eines Fahrzeugs mit einem PEM-Stack als primärer Energiequelle besteht aus dem Wasserstofftank, dem PEM-Brennstoffzellenstack, einer Batterie, der Power Drive Unit (PDU) und dem Elektromotor. Auf die für die Simulation und Kostenanalyse verwendeten Antriebsstrangkomponenten wird in Kapitel 3.1.3 näher eingegangen. In den meisten Brennstoffzellenfahrzeugen wird ein Druckwasserstofftank mit 300-700 bar Druck und einer Wasserstoffmenge von 3-5 kg eingebaut. In den simulierten Antriebssträngen wurde ein 700 bar Drucktank mit einer Wasserstoffmenge von 4,5 kg verwendet. Abbildung 2.13 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Brennstoffzellenantriebsstranges.

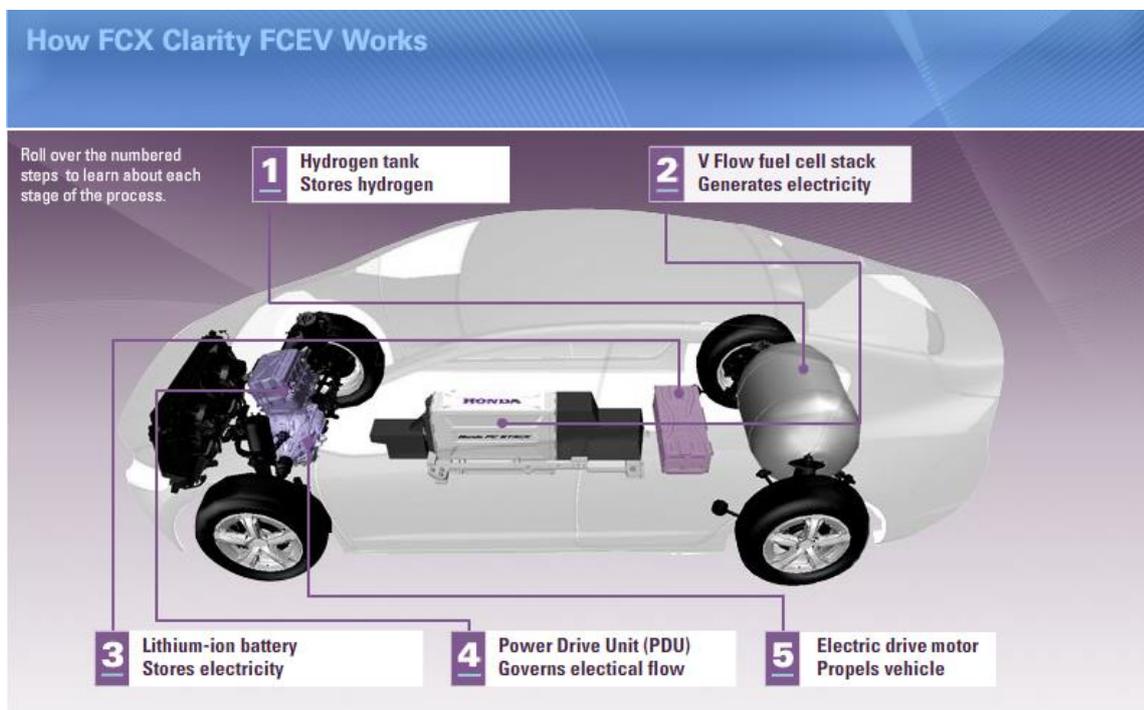


Abbildung 2.13: PEM-Antriebsstrang [12]

Jedes Brennstoffzellenfahrzeug verfügt über eine Batterie, die zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades beiträgt. Die Batterie dient als Pufferspeicher, um Lastspitzen besser abfangen zu können. Dies kann beim Beschleunigen helfen und verbessert zusätzlich den Gesamtwirkungsgrad, da beim Bremsen Energie in die Batterie rückgespeist wird. Die in dieser Arbeit untersuchten Antriebsstränge beinhalten jeweils eine Lithium-Ionen-Batterie mit unterschiedlichen Ladungskapazitäten. Die Lithium-Ionen-Batterie hat sich in der Automobilindustrie durchgesetzt, da sie eine hohe Leistungsdichte besitzt, relativ kompakt ist und eine hohe Crashesicherheit aufweist.

Der Elektromotor hat einen hohen Wirkungsgrad und macht gegenüber dem herkömmlichen Verbrennungsmotor ein Getriebe überflüssig, da er das volle Drehmoment, vom Stillstand

weg, liefern kann. Die PDU steuert die Energiezufuhr zum Elektromotor und entscheidet zwischen verschiedenen Betriebsstrategien. Die Betriebsstrategien sind in Kapitel 3.1.2 erklärt.

2.5 Fuel Cell Electric Vehicles am Markt

Viele namhafte Automobilhersteller entwickelten in den letzten Jahrzehnten bereits einige Concept Cars, Prototypen und einige wenige in Serie gefertigte Brennstoffzellenfahrzeuge. Dieses Kapitel liefert eine Übersicht über die wichtigsten, sich bereits am Markt befindlichen Brennstoffzellenfahrzeuge; im Anhang in Tabelle 0.1 befindet sich eine Liste sämtlicher Brennstoffzellenfahrzeuge. Da der Marktdurchbruch auch stark von der Wasserstofftankstelleninfrastruktur abhängt, haben einige Industrieunternehmen wie OMV, Shell, Total, Linde, Air Liquide, Daimler, Honda, BMW, Intelligent Energy, Toyota, Volkswagen und die ‚Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie‘ im September 2009 eine gemeinsame Initiative namens „H2 Mobility“ gestartet, um in Deutschland ein flächendeckendes Tankstellennetz für Wasserstoff aufzubauen. [13]

Mercedes entwickelte im Jahr 2002 die Mercedes A-Klasse Fuel Cell und 2005 den Nachfolger Mercedes B-Klasse F-Cell, siehe Abbildung 2.14. Die B-Klasse, mit einem 100 kW starken Elektromotor und einem Druckspeichertank mit 700 bar Druck, schafft eine Reichweite von ca. 400 km. Von der Mercedes A-Klasse F-Cell existieren 60 Fahrzeuge, welche im Rahmen eines Feldtests gebaut worden sind. Von der Mercedes B-Klasse F-Cell existieren ca. 70 Stück. Eine Kleinserienproduktion der Mercedes B-Klasse F-Cell soll 2017 starten. [2]



Abbildung 2.14: Mercedes B-Klasse F-Cell [14]

Die neueste Generation des Honda FCX wurde im Jahr 2009 an ausgewählte Leasingkunden übergeben. Dieses Fahrzeug wiegt 1625 kg und kann mit einem Tankinhalt von 4 kg Wasserstoff bei 350 bar ca. 470 km zurücklegen. Der Elektromotor mit 100 kW wird von einem PEMFC-System mit einer Leistung von ebenfalls 100 kW gespeist - mit Unterstützung von einer Li-Ionen-Batterie. Abbildung 2.15 zeigt einen Honda Clarity FCX. [15]



Abbildung 2.15: Honda Clarity FCX [12]

2002 wurde der Ford Focus FCV Hybrid vorgestellt, siehe Abbildung 2.16. Es existieren bereits verschiedene Varianten des Fahrzeugtyps. Der Ford Focus FCV Hybrid ist mit einer PEMFC mit der Leistung von 68 kW und einer Nickel-Metallhydrid-Batterie ausgestattet. Der Druckwasserstofftank steht unter 350 bar Druck und fasst eine Wasserstoffmenge von 3,5 kg. Mit diesem kann er ca. 320 km weit fahren. Der Elektromotor hat ein Moment von 230 Nm. [1]



Abbildung 2.16: Ford Focus FCV Hybrid [16]

Der Toyota Mirai ist das jüngste Brennstoffzellenfahrzeug, welches 2015 auf dem Markt eingeführt wurde. Mit dem Mirai will Toyota den Marktdurchbruch für Brennstoffzellenfahrzeuge schaffen. Der 114 kW starke Elektromotor beschleunigt das 1850 kg schwere Fahrzeug in 9,6 Sekunden von null auf 100 km/h. Der Toyota Mirai erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 178 km/h und mit dem Druckspeichertank (700 bar) schafft er eine Reichweite von ca. 500 km. Abbildung 2.17 zeigt einen Toyota Mirai. [17]



Abbildung 2.17: Toyota Mirai [17]

2.6 Definition der Fahrwiderstandskräfte für die Längsdynamiksimulation

Dieses Kapitel ist an [8] angelehnt. Der Antriebsstrang produziert mechanische Energie, welche in kinetische Energie beim Beschleunigen und/oder in potentielle Energie beim Bergauffahren gespeichert wird. Diese Umwandlung geschieht nicht verlustfrei, da Verluste durch Reibung, Luftwiderstand und durch Dissipation beim Bremsen entstehen. Abbildung 2.18 zeigt die Kräfte, welche beim Fahren am Fahrzeug auftreten.

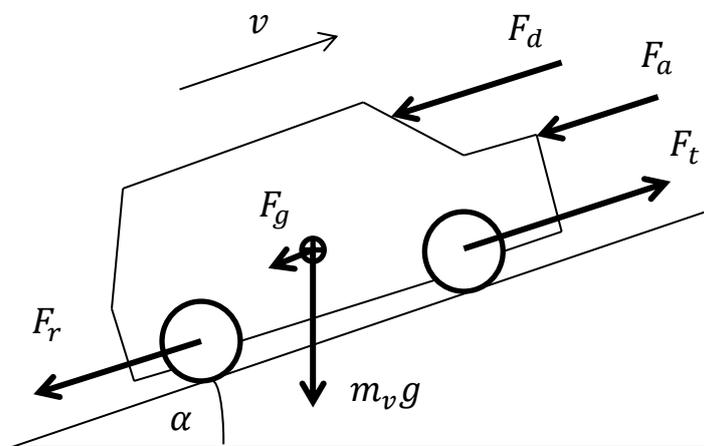


Abbildung 2.18: Fahrwiderstandskräfte

Gleichung (2.17) beschreibt den elementaren Zusammenhang für die longitudinale Dynamik eines Kraftfahrzeugs.

$$m \frac{d}{dt} v = F_t(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) + F_d(t)) \quad (2.17)$$

$F_t(t)$ beschreibt die Kraft, welche das Fahrzeug antreibt, $F_a(t)$ beschreibt die aerodynamische Widerstandskraft, $F_r(t)$ ist die Rollreibungskraft, $F_g(t)$ ist die Kraft, welche durch die Schwerkraft entgegen der Steigung wirkt und $F_d(t)$ ist die Summe der allgemeinen Störkräfte. m ist die Masse des Fahrzeugs plus den Trägheitskräften der rotierenden Teile und

$\frac{d}{dt}v$ beschreibt die Änderung der Geschwindigkeit v über die Zeit t , α ist der Steigungswinkel.

2.6.1 Aerodynamischer Verlust

Der aerodynamische Widerstand setzt sich zusammen aus der viskosen Reibung zwischen der Umgebungsluft und dem Fahrzeug und der Druckdifferenz zwischen Fahrzeugfront und Fahrzeugheck. 65% des Luftwiderstands sind auf die Form des Fahrzeugs zurückzuführen, 20% werden durch die Radkästen verursacht, ca. 10% des Widerstands werden verursacht durch Dachträger, Rückspiegel, Antennen usw. und ca. 5% durch Motorlüftung.

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \rho_a A_f c_d v^2 \quad (2.18)$$

Formel (2.18) gibt die aerodynamische Widerstandskraft an, wobei ρ_a die Dichte der Luft ist. A_f ist die projizierte Frontfläche des Fahrzeugs, c_d ist der Luftwiderstandsbeiwert des Fahrzeugs und v ist die Geschwindigkeit des Fahrzeugs. [8]

2.6.2 Rollreibungsverlust

Formel (2.19) gibt die Rollwiderstandskraft an.

$$F_r(v, p_t, \dots) = c_r(v, p_t, \dots) m_v g \cos(\alpha) \quad (2.19)$$

c_r ist der Rollwiderstandsbeiwert. Dieser ist maßgeblich abhängig von der Geschwindigkeit, dem Reifendruck und der Fahrhahnoberflächenbeschaffenheit. Bei hohen Geschwindigkeiten steigt der Rollwiderstandsbeiwert an; dieser Anstieg ist auf das Auftreten von Resonanz zurückzuführen. Bei weicher Fahrhahnoberfläche steigt c_r signifikant an. m_v ist die Masse des Fahrzeugs, g ist die Erdbeschleunigung. $\cos \alpha$ berücksichtigt den Einfluss der Fahrhahnteilung, dieser Einfluss ist aber relativ gering. [8]

2.6.3 Verluste beim Bergauffahren

Die Gleichung (2.20) beschreibt den Widerstand, der gegen die Fahrtrichtung des Fahrzeugs beim Bergauffahren wirkt.

$$F_g(\alpha) = m_v g \sin(\alpha) \quad (2.20)$$

m_v ist wiederum die Masse des Fahrzeugs, g ist die Erdbeschleunigung und $\sin(\alpha)$ der Steigungsanteil. [8]

2.7 Trägheitskräfte im Fahrzeug

Durch die Trägheit des Fahrzeugs und die Trägheit der rotierenden Komponenten im Fahrzeug werden fiktive (d'Alembert) Kräfte erzeugt. Die Trägheit des Fahrzeugs selbst ist in der Gleichung (2.17), auf der linken Seite bereits inkludiert. Die Trägheiten der rotierenden Massen im Antriebsstrang des Fahrzeugs werden mit Hilfe von Submodellen nachgebildet.

Das Moment, verursacht durch die Trägheit der Reifen, bezeichnet mit $T_{m,w}(t)$, ist gegeben durch die Gleichung (2.21), wobei θ_w das Trägheitsmoment der Reifen und $\frac{d}{dt}\omega_w(t)$ die

zeitliche Ableitung der Winkelgeschwindigkeit ist. Die Gleichungen (2.21) bis (2.27) folgen der Annahme, dass kein Schlupf und keine Verluste vorliegen.

$$T_{m,\omega}(t) = \theta_w \frac{d}{dt} \omega_w(t) \quad (2.21)$$

$$v_w = \omega_w r_w \quad (2.22)$$

Durch den Zusammenhang in (2.22), wobei v_w die Tangentialgeschwindigkeit des Reifens und r_w der Radius des Reifens ist, ergibt sich die in (2.23) durch die Trägheiten verursachte Kraft $F_{m,w}(t)$.

$$F_{m,w}(t) = \frac{\theta_w}{r_w^2} \frac{d}{dt} v(t) \quad (2.23)$$

Dadurch wird die äquivalente Trägheitsmasse der Reifen $m_{r,w}(t)$ in (2.24) definiert.

$$m_{r,w}(t) = \frac{\theta_w}{r_w^2} \quad (2.24)$$

Das Moment, verursacht durch die Trägheit im Antriebsstrang, ist durch (2.25) gegeben. θ_e beschreibt das Trägheitsmoment der rotierenden Komponenten des Antriebsstranges, γ die Übersetzung bis zu den Reifen und w_e die Winkelgeschwindigkeit des Antriebsstranges.

$$T_{m,e}(t) = \theta_e \frac{d}{dt} w_e(t) = \theta_e \frac{d}{dt} \gamma \omega_w(t) = \theta_e \frac{\gamma}{r_w} \frac{d}{dt} v(t) \quad (2.25)$$

Durch (2.26) ergibt sich die Trägheitskraft $F_{m,e}(t)$.

$$F_{m,e}(t) = \frac{\gamma}{r_w} T_{m,e}(t) = \theta_e \frac{\gamma^2}{r_w^2} \frac{d}{dt} v(t) \quad (2.26)$$

In (2.27) ergibt sich durch (2.26) eine äquivalente Trägheitsmasse des Antriebsstranges.

$$m_{r,e}(t) = \frac{\gamma^2}{r_w^2} \theta_e \quad (2.27)$$

Die äquivalenten Massen der rotierenden Komponenten im Fahrzeug, $m_{r,w}(t)$ und $m_{e,w}(t)$, müssen bei der Ermittlung des Beschleunigungswiderstandes zur Fahrzeuggesamtmasse m_v addiert werden, siehe (2.29). Somit ergibt sich eine näherungsweise Miteinbeziehung der Trägheiten der rotierenden Teile im Fahrzeug. Die Summe der äquivalenten Massen der rotierenden Teile im Fahrzeug ist in Formel (2.28) zusammengefasst. [8]

$$m_r = m_{r,w}(t) + m_{r,e}(t) = \frac{1}{r_w^2} \theta_w + \frac{\gamma^2}{r_w^2} \theta_e \quad (2.28)$$

$$(m_v + m_r) \frac{d}{dt} v = F_t(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) + F_d(t)) \quad (2.29)$$

3 Ermittlung der Fahrzeugleistungsdaten mit Längsdynamiksimulation

Die Leistung, der Verbrauch und die Reichweite des Antriebssystems eines Brennstoffzellenfahrzeuges wird zu einem großen Anteil von den vier Kernkomponenten des Antriebsstrangs bestimmt: der Brennstoffzellenleistung, der Batteriekapazität, der Wasserstoffkapazität des Tanks und der Leistung des Elektromotors. Die Leistung des Elektromotors wurde in dieser Arbeit als konstant angenommen. Da der Antriebsstrang für ein Mittelklassefahrzeug ausgelegt werden soll, wurde der Motor auf 85 kW festgelegt. Dieser Elektromotor sollte nun, durch die Brennstoffzelle und die Batterie, eine optimale Energiezufuhr erhalten. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Bestimmung des wirtschaftlich und technisch optimalen Verhältnisses der Brennstoffzellenleistung zu der Batteriekapazität. Das PEM-Brennstoffzellensystem und die Batterie sind bei den untersuchten Antriebssträngen parallel angeordnet. Die Batterie ist dazu fähig, den Elektromotor für eine gegebene Zeit allein ausreichend mit Energie zu versorgen.

3.1 Methodik

Zur Lösung dieser Aufgabe wurden drei unterschiedliche Brennstoffzellenantriebsstränge und ein rein batteriebetriebener Antriebsstrang definiert, um die Einflüsse der verschiedenen Komponentengrößen zu erkennen und daraus eine optimale Auslegung zu ermitteln. Die festgelegten Leistungen und Kapazitäten wurden im Laufe der Simulation optimiert und verändert.

Die Daten der definierten Antriebsstränge sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Um das dynamische Verhalten und die Leistungsdaten der Fahrzeuge mit den verschiedenen Antriebssträngen zu bestimmen, wurde eine Längsdynamiksimulation durchgeführt. Bei einer Längsdynamiksimulation wird ein virtuelles Fahrzeugmodell, welches durch mathematische Zusammenhänge bestimmt ist, verwendet. Dieses Modell spiegelt das dynamische Verhalten des realen Fahrzeugs für verschiedene Fahrsituationen wieder. Somit kann in der frühen Entwicklungsphase auf Komponententests verzichtet werden. Dadurch werden viel Zeit und Kosten gespart.

Tabelle 3.1: Definition der untersuchten Antriebsstränge (Startwerte)

Fahrzeugbezeichnung	Fahrzeugname	Batteriekapazität	Brennstoffzellenleistung	Beschreibung
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle	2,1 kWh	100 kW	Brennstoffzellenantrieb, Batterie dient nur als Puffer für Leistungsspitzen
FCBEV	Fuel Cell Battery Electric Vehicle	8,8 kWh	50 kW	Brennstoffzelle und Batterie versorgen Elektromotor
FCREV	Fuel Cell Range Extended Vehicle	20 kWh	20 kW	Brennstoffzelle und Batterie versorgen Elektromotor
BEV	Battery Electric Vehicle	77,4 kWh	0 kW	Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug

3.1.1 Modellauswahl

Zu Beginn wurde ein geeignetes Simulationsmodell, das die Anforderungen zur Durchführung der Aufgabe erfüllt, gesucht. Zur Auswahl standen drei verschiedene Modelle.

- Matlab/Simulink PEM-Modell
- AVL Cruise PEM-Powertrain-Modell
- AVL Cruise PEMREX-Modell

Das Matlab/Simulink PEM-Modell wurde im Christian-Doppler-Labor der TU Graz programmiert. Es simuliert das Verhalten einer PEM-Brennstoffzelle bei variablen Lastzuständen. Dieses Modell beinhaltet jedoch nur die Brennstoffzelle selbst und keine weiteren Antriebsstrangkomponenten. Da das Programmieren der weiteren Komponenten den Rahmen der Masterarbeit sprengen würde, war dieses Simulationsmodell für die Aufgabenstellung nicht geeignet.

Das AVL Cruise PEM-Powertrain-Modell wurde in der Brennstoffzellenabteilung der AVL erstellt. AVL Cruise wurde speziell für die Längsdynamiksimulation von Fahrzeugen entwickelt und beinhaltet vorgefertigte Modelle für Antriebsstränge von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschine, jedoch keines für Brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge, darum wurde ein Matlab/Simulink-Modul in das AVL Cruise-Modell implementiert. Da dieses Modell vor einigen Jahren erstellt wurde, gab es beim Simulieren Versionskonflikte von AVL Cruise. Die Bestimmung des Wasserstoffverbrauchs war deshalb nicht möglich. Darum wurde auf die Verwendung dieses Modells verzichtet.

Das AVL Cruise PEMREX-Modell wurde 2015 von Edoardo Pietro Morra und Rolf Albrecht in AVL List GmbH erstellt. In diesem Modell wurde auf die Implementierung eines Matlab/Simulink-Moduls verzichtet und die Brennstoffzelle aus mehreren Funktionsblöcken erstellt. Dieses Modell wurde im Rahmen des PEMREX-Projekts erstellt und erfüllt somit die Anforderungen zur Auslegung dieses Antriebsstranges. Für die Simulation wurde dieses Modell verwendet.

3.1.2 Erläuterung des AVL Cruise PEMREX-Modells

Abbildung 3.1 zeigt das für die Simulation verwendete Antriebsstrangmodell. Den Kern des Antriebsstrangmodells bilden (a) die Batterie, (b) der Elektromotor inkl. DC/AC-Konverter,

(c) das PEM-Brennstoffzellensystem, (d) die elektrischen Hilfssysteme (Klimaanlage usw.), (e) die DC/DC-Konverter-Verluste und (f) das einstufige Getriebe. Der DC/DC-Konverter wandelt die Spannung vom Hochvoltbereich auf 12 V Bordspannung; dabei treten Verluste auf, welche in Form von Kennlinien in (e) berücksichtigt werden.

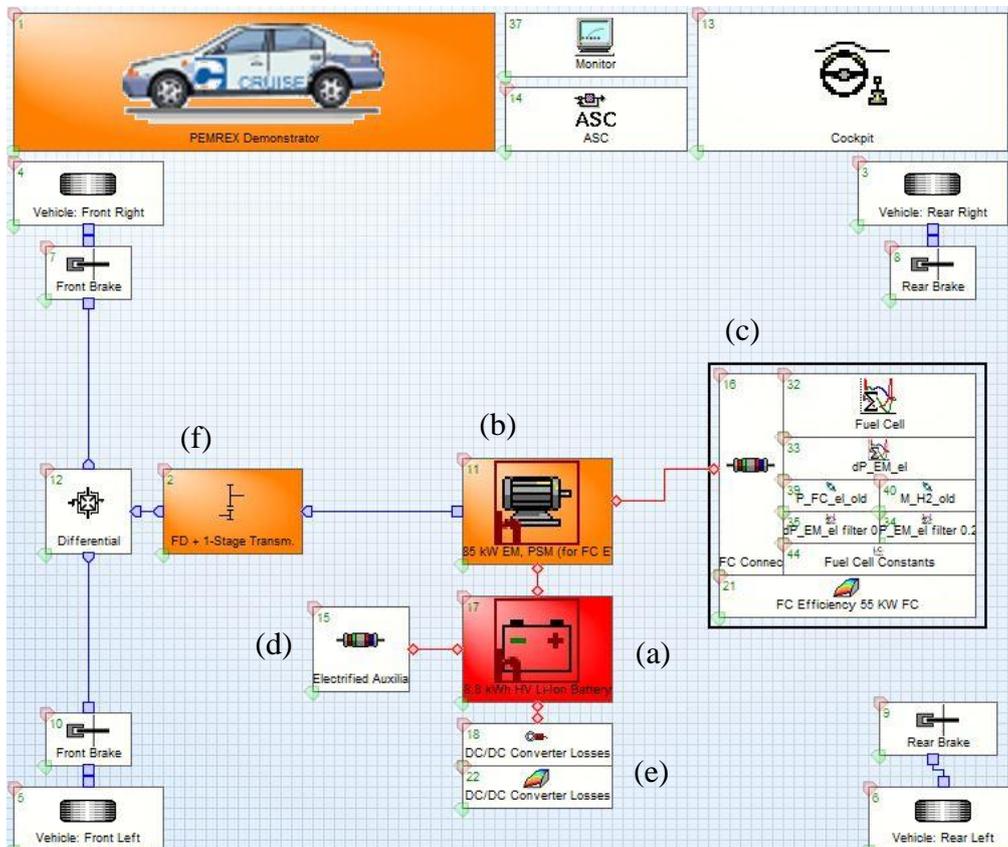


Abbildung 3.1: PEMREX AVL Cruise-Modell

Die Ansteuerung der Batterie und des Brennstoffzellensystem erfolgt durch das in Abbildung 3.2 dargestellte Hybrid Operation Strategy (HOS)-Steuerungssystem. Diese Systemmodule steuern den Leistungsfluss zwischen Brennstoffzellensystem, Batterie und Elektromotor. Dabei wird zwischen fünf verschiedenen „Hybrid Operation Strategies“ gewählt, siehe Tabelle 3.2.

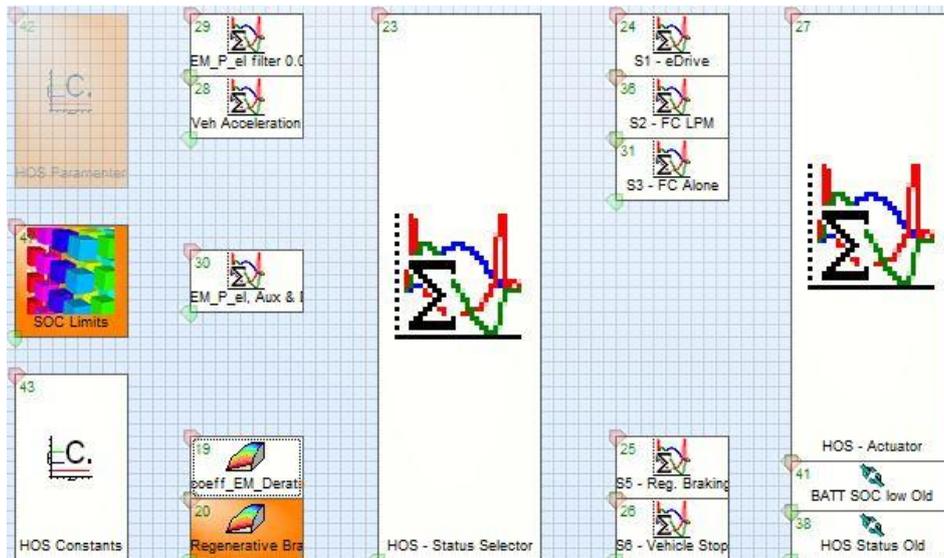


Abbildung 3.2: Hybrid Operation Strategy Steuerungssystem

Der erste Modulblock besteht aus Inputparametern (HOS Parameter, SOC Limits, HOS Constants). Darin werden Brennstoffzellenstackleistung, Leistung bei maximalem Wirkungsgrad und Batterie State of Charge (SOC)-Limits definiert. Die Gleichung für den SOC ist in Gleichung (3.3) definiert. Der zweite Modulblock verarbeitet die Input-Signale des zum Zeitpunkt t in der Simulation bestehenden Zustandes. Das HOS-Status Selector Modul entscheidet, welche der vorgegebenen Steuerungsstrategien verwendet wird. In den Modulen S1 – S6 sind die Ansteuerungsstrategien definiert; diese werden in Tabelle 3.2 erläutert. Die C - Programmcodes des HOS – Selectors und der Steuerungsstrategien befinden sich im Anhang in Programmcode 0.1 bis Programmcode 0.6.

Tabelle 3.2: Hybrid Operation Strategies

Kurzbezeichnung	Steuerungsstrategien	Beschreibung
S1	eDrive	Nur Batterie versorgt Elektromotor mit Energie, Brennstoffzelle ist auf Stand-by
S2	FC LPM	Das Brennstoffzellensystem lädt die Batterie.
S3	FC Alone	Nur die Brennstoffzelle versorgt den Elektromotor mit Energie.
S5	Reg. Braking	Beim Bremsen wird durch die generatorische Wirkung des Elektromotors Energie in die Batterie rückgeführt.
S6	Vehicle Stop	Ansteuerungsstrategie für Fahrzeugstillstand, Brennstoffzelle läuft im „Leerlauf“ Zustand.

Tabelle 3.3: Strategieauswahl

SOC \ P_{req}	$< P_{opt}$	$> P_{opt}$
	$< SOC_{min}$	$P_{fc} = P_{opt}$
$> SOC_{min}$	$P_{fc} = 0$	$P_{fc} = kP_{req}$

Ausschlaggebend für die Wahl der Steuerungsstrategie sind der SOC der Batterie, die SOC-Limits der Batterie, der eingestellte k-Faktor (siehe Formel (3.1)), die Fahrgeschwindigkeit v

und die geforderte Leistung des Elektromotors P_{req} . In Tabelle 3.3 sind die SOC und die Leistungszustände des Antriebsstranges mit den zugehörigen Strategien abgebildet.

$$k = \frac{P_{FC}}{P_{req}} \quad (3.1)$$

Im Standardbetrieb des Brennstoffzellenantriebsstranges versorgt die Batterie den Elektromotor mit Energie und wird gleichzeitig vom Brennstoffzellensystem geladen. Die Strategie FC LPM ist eingestellt. Der sog. k-Faktor wird im Simulationsmodell, im HOS Constants-Modul eingestellt und gibt das Verhältnis der momentanen Brennstoffzellenleistung zu der angeforderten Leistung des Elektromotors an, wie in Formel (3.1) beschrieben.

Hat der SOC der Batterie sein Minimum erreicht und ist die angeforderte Leistung höher als die Brennstoffzellenleistung bei optimalem Wirkungsgrad, kommt die gesamte Energie ausschließlich von der Brennstoffzelle. Die FC Alone-Strategie ist nun eingestellt. Es soll vermieden werden, dass die Brennstoffzelle im Bereich unterhalb des optimalen Wirkungsgrades betrieben wird, um erhöhten Verbrauch zu verhindern.

Ist die vom Elektromotor geforderte Energie kleiner als die Brennstoffzellenleistung bei optimalem Wirkungsgrad und der SOC größer als SOC_{min} , kommt die vom Elektromotor geforderte Energie ausschließlich von der Batterie. Diese Betriebsstrategie wird als eDrive bezeichnet.

Regenerative Braking kommt zum Einsatz, wenn die angeforderte Energie des Elektromotors kleiner als die minimale Leistungsanforderung ist. Ist aber die Fahrgeschwindigkeit größer als die minimale Fahrgeschwindigkeit für den Betrieb, dann wird der Elektromotor als Generator betrieben und ein Teil der Bremsenergie in die Batterie zurückgespeist. Diese Strategie verbessert den Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeugs, da die beim Bremsen sonst in Wärme umgewandelte Energie wieder in die Batterie und somit in das System zurückgeladen wird.

3.1.2.1 Leistungsbereitstellung des PEM-Brennstoffzellensystems

Das PEM-Brennstoffzellensystem hat einen maximalen Leistungshub, d.h. es kann die Leistung nicht von einem Zeitpunkt zum nächsten beliebig variieren. Die maximale Leistungsänderung von einem Simulationszeitpunkt bis zum nächsten ist mit ΔP_{FC_max} definiert.

Tabelle 3.4: Leistungsbereitstellung des PEM-Brennstoffzellensystems

$P_{FC_req}(t)$	$>P_{FC(t-1)}+\Delta P_{FC_max}$ oder. $<P_{FC(t-1)}-\Delta P_{FC_max}$	$\leq P_{FC(t-1)}+\Delta P_{FC_max}$ oder $\geq P_{FC(t-1)}-\Delta P_{FC_max}$
$P_{FC}(t)$	$P_{FC(t-1)}+\Delta P_{FC_max}$ bzw. $P_{FC(t-1)}-\Delta P_{FC_max}$	$P_{FC_req}(t)$

$P_{FC_req}(t)$ ist die zum Zeitpunkt t geforderte Leistung. Tabelle 3.4 zeigt die Logik der Leistungsbereitstellung. $P_{FC(t-1)}$ ist die Leistung der Brennstoffzelle im Simulationszeitpunkt $t-1$ und $P_{FC(t)}$ ist die Leistung, welche das PEM-Brennstoffzellensystem im Zeitpunkt t liefert. Ist $P_{FC_req}(t)$ größer $>P_{FC(t-1)}+\Delta P_{FC_max}$ oder $<P_{FC(t-1)}-\Delta P_{FC_max}$, liefert das PEM-Brennstoffzellensystem $P_{FC(t-1)}+\Delta P_{FC_max}$ bzw. $P_{FC(t-1)}-\Delta P_{FC_max}$. Wird vom PEM-Brennstoffzellensystem $P_{FC_req}(t)$ gefordert und dies ist $\leq P_{FC(t-1)}+\Delta P_{FC_max}$ oder $\geq P_{FC(t-1)}-\Delta P_{FC_max}$, liefert das System $P_{FC_req}(t)$.

3.1.3 Parametrisierung

Um aussagekräftige Ergebnisse aus der Simulation zu erhalten, ist es wichtig, realitätsgetreue Eingabeparameter zu verwenden. Für die Durchführung einer korrekten Simulation mit diesem Fahrzeugmodell war die Parametrisierung der folgenden Komponenten notwendig:

- Batterie
- Brennstoffzelle
- Fahrzeugdaten
- Betriebsstrategieparameter

Die Masse des Fahrzeugs hat einen großen Einfluss auf die in Kapitel 2.6 erläuterten Fahrwiderstandskräfte des Fahrzeugs - darum wurde Wert auf die richtige Kalkulation der Masse gelegt. Mehr Information zu den verwendeten Batterien und Brennstoffzellen befindet sich in diesem Kapitel.

3.1.3.1 Batterieparametrisierung

In der Regel besteht die Batterieeinheit in einem Fahrzeug aus einer Vielzahl von parallel und in Serie geschalteten Batteriezellen. Für die untersuchten Antriebsstränge werden Lithium-Ionen-Zellen verwendet. Diese sind für mobile Anwendungen üblich, da sie eine hohe Energiedichte besitzen und eine hohe Reversibilität ohne Memory Effekt haben [1]. Um zu entscheiden, welcher Batteriezellentyp verwendet wird, wurde eine Reihe von Batteriezellendatenblättern ausgewertet; eine Übersicht der ausgewerteten Zellen befindet sich in Tabelle 3.5. Um das Batteriemodell in dem PEMREX AVL Cruise-Fahrzeugmodell korrekt zu parametrieren, wurden folgende Batteriezellendaten benötigt:

- Nominelle Kapazität
- Nominelle Zellenspannung
- Maximale Zellenspannung
- Minimale Zellenspannung
- Ohmsche Widerstandskurve über den *SOC*
- Spannungskurve beim Entladen

Zur Definition der Batterieeinheit werden noch die:

- Anzahl der parallel geschalteten Zellen pro Modul
- Anzahl der in Serie geschalteten Module

benötigt.

In Tabelle 3.5 sind die in Betracht gezogenen Batteriezellentypen mit deren Parametern eingetragen. Um den bezüglich des Gewichts effizientesten Zellentyp zu ermitteln, wurde die Speicherkapazität pro Masse laut (3.2) berechnet.

$$\frac{C}{m_z} = \frac{Q_{nom} U_{nom}}{m_z} \quad (3.2)$$

Tabelle 3.5: Batteriezellentypen

Batteriebezeichnung	Hersteller	Nominelle Ladung (Q_{nom})	Nominelle Spannung (U_{nom})	Zellengewicht (m_z)	C/m_z
Sonata® 4400 Rechargeable Lithium-ion Cell	Boston - Power	4400 mAh	3,7 V	92 g	176,96 Wh/kg
Swing™4400 Rechargeable Lithium-ion Cell	Boston - Power	4400 mAh	3,7 V	90 g	180,89 Wh/kg
Panasonic CGA103450A	Panasonic	1950 mAh	3,7 V	39 g	185,00 Wh/kg
Panasonic CGA633450B	Panasonic	1200 mAh	3,7 V	24 g	185,00 Wh/kg
Panasonic CGR18650CG	Panasonic	2250 mAh	3,6 V	45 g	180,00 Wh/kg
Panasonic CGR18650DA	Panasonic	2450 mAh	3,6 V	45 g	196,00 Wh/kg
Panasonic CGR18650E	Panasonic	2550 mAh	3,7 V	46,5 g	202,90 Wh/kg
Panasonic CGR26650A	Panasonic	2650 mAh	3,6 V	90 g	106,00 Wh/kg
Powerstream H083448	Powerstream	1250 mAh	3,7 V	37 g	125,00 Wh/kg
Valence IFR18650e	Valence	1400 mAh	3,2 V	40 g	112,00 Wh/kg
LQ100-A1	LG Chem	41000 mAh	3,8 V	965 g	161,45 Wh/kg
UF121285	Sanyo	21500 mAh	3,67 V	255 g	309,43 Wh/kg

Die effizienteste der in Tabelle 3.5 betrachteten Batterien ist die UF121285 von Sanyo, welche auch im VW E-Golf und im Audi A3-etrone verwendet wird. Mit dieser Batteriezelle wurde das Batteriemodell für die Simulation erstellt. Tabelle 3.6 zeigt die Kapazität, die Batteriespannung, die Ladung und die Anzahl der Batteriezellen parallel und in Serie sowie die gesamte Zellenanzahl für die verwendeten Batterieeinheiten an.

Für die vollständige Parametrisierung sind die Eingaben der Spannungskurve beim Entladen der Batteriezelle und die ohmsche Widerstandskurve beim Be- und Entladen über den SOC notwendig. Abbildung 3.3 zeigt die ohmsche Widerstandskurve für den ausgewählten Zellentyp über dem SOC.

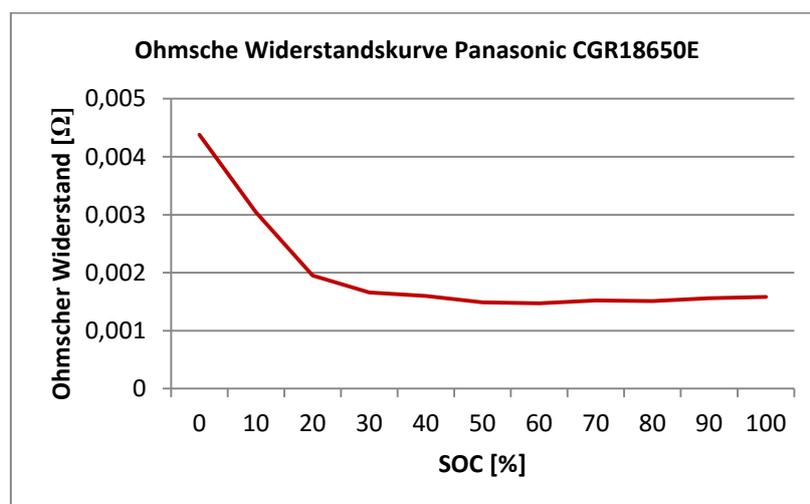


Abbildung 3.3: Ohmsche Widerstandskurve Panasonic CGR18650E

Gleichung (3.3) definiert den SOC der Batteriezelle, wobei $Q(t)$ die zum Zeitpunkt t gegebene Ladung und $Q_n(t)$ die maximal mögliche Ladung angibt. Der Batteriezellentyp arbeitet in einem SOC -Bereich von 20-90%.

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n(t)} \quad (3.3)$$

Tabelle 3.6: Batterieeinheiten

Batterie-einheit für Fahrzeug	Kapazität der Batterie (C_{Bat})	Batterie-spannung (U_{Bat})	Ladung (Q_{Bat})	Zellen parallel pro Modul (n)	Module in Serie (m)	Gesamte Zellenanzahl (z)
FCEV	2,1 kWh	47,7 V	43,00Ah	2	13	13
FCHEV	8,8 kWh	407 V	21,50Ah	1	111	53
FCREV	20 kWh	466 V	43,00Ah	2	127	105
BEV	77,4 kWh	400 V	193,50Ah	9	109	525

Mit den Gleichungen (3.4) bis (3.7) wurden die Batteriesysteme für die bestimmten Antriebsstränge definiert.

$$C_{Bat} = Q_{Bat} U_{Bat} \quad (3.4)$$

$$Q_{Bat} = Q_{nom} n_{par} \quad (3.5)$$

$$U_{Bat} = U_{nom} m_{ser} \quad (3.6)$$

$$z = m_{ser} n_{par} \quad (3.7)$$

Durch Eingabe der berechneten Daten wurde das Batteriemodell vollständig parametrisiert.

3.1.3.2 Brennstoffzellenparametrisierung

Zur Parametrisierung eines spezifischen Brennstoffzellenstacks ist die Eingabe der Wirkungsgradkennlinie über der Leistung erforderlich. Durch Eingabe der Brennstoffzellenleistung beim Wirkungsgradmaximum P_{opt} versucht das Modell die Leistungsteilung der Batterie und der Brennstoffzelle so zu steuern, dass die Brennstoffzelle möglichst im Bereich des besten Wirkungsgrades arbeitet, wie in Kapitel 3.1.2 erklärt. Von Seiten des Brennstoffzellenlieferanten Elring Klinger sind nur drei Wirkungsgradkennlinien für verschiedene Brennstoffzellenstacks bekannt gegeben worden, siehe Abbildung 3.4. Die Kennlinien für die verwendeten Brennstoffzellenstacks wurden daraufhin für die 100 kW-, 50 kW-, 20 kW-Brennstoffzellen extrapoliert.

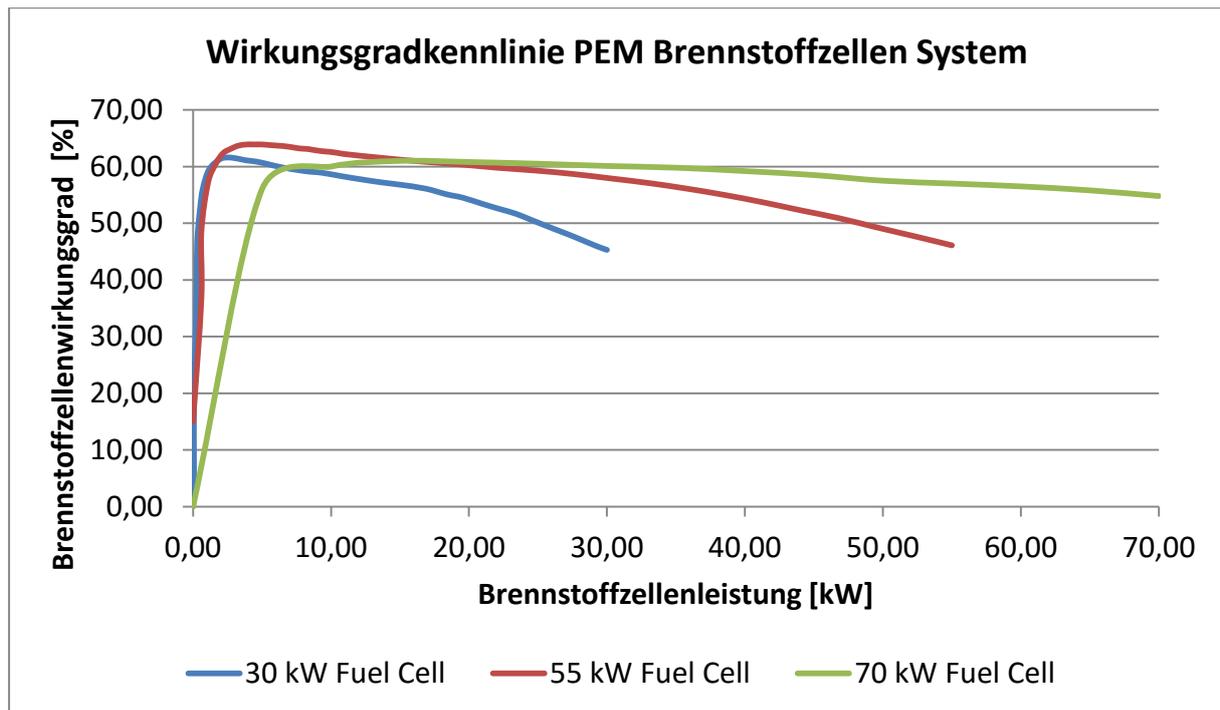


Abbildung 3.4: Wirkungsgrad-Leistungskennlinien

3.1.3.3 Parametrisierung des Elektromotors

Als Elektromotor wurde eine permanent erregte synchrone Drehstrommaschine eingesetzt, da diese einen sehr hohen Wirkungsgrad gegenüber Asynchronmaschinen oder Drehstrommaschinen mit Fremderregung hat. Die eingesetzte Drehstrommaschine hat eine Leistung von 85 kW. Das Elektromotormodell wurde mit der Drehmomenten-Drehzahl Kennlinie beschrieben; siehe Abbildung 3.5.

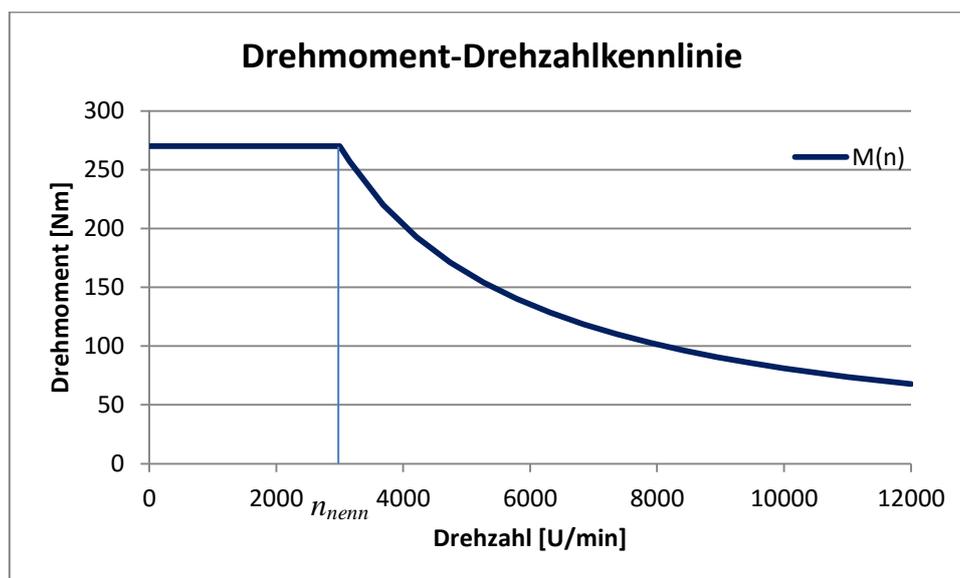


Abbildung 3.5: Elektromotorkennlinie

Ein Elektromotor kann sowohl als Motor als auch als Generator betrieben werden. Bei der Energierückgewinnung beim Bremsen wird die Drehstrommaschine als Generator eingesetzt und erzeugt Energie, die dann in der Batterie gespeichert wird.

Ein Elektromotor besitzt eine Nennleistung und eine Maximalleistung. Die Maximalleistung kann jedoch nur kurz abgerufen werden, da dieser Betrieb zu thermischer Wärmeentwicklung führt und den Motor somit beschädigen kann. Im Prinzip kann man einen Elektromotor in zwei Betriebsbereiche unterteilen: den Grundlastbereich und den Feldschwächbereich. Im Grundlastbereich kann für jede Drehzahl, die kleiner als die Nenndrehzahl n_{nenn} ist, das Nenndrehmoment M_{nenn} bzw. das Maximaldrehmoment M_{max} abgerufen werden. Formel (3.8) gibt den Zusammenhang für den Grundlastbereich an.

$$n_{nenn} = \frac{P_{nenn}}{2\pi M_{nenn}} \quad (3.8)$$

Beim Betrieb im Grundlastbereich wird die Nennleistung P_{nenn} bzw. die Maximalleistung P_{max} nicht überschritten. Sobald die n_{nenn} überschritten wird, würde die Leistung über P_{nenn} bzw. P_{max} steigen. Da das aber physikalisch nicht möglich ist, fällt das Drehmoment ab. Dies wird erreicht durch Schwächung des Magnetfeldes. Darum heißt dieser Bereich „Feldschwächbereich“. Formel (3.9) zeigt die Gleichung für den „Feldschwächbereich“. [1]

$$M = \frac{P_{nenn}}{2\pi n} \quad (3.9)$$

3.1.3.4 Fahrzeugmassenbestimmung

Eine realitätsgetreue Berechnung der Fahrzeugmasse und der Masse der Komponenten ist von großer Bedeutung, um bei der Längsdynamiksimulation brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Die Masse des Fahrzeugs hat einen signifikanten Einfluss auf die Fahrwiderstandskräfte, siehe Kapitel 2.6.

Das Fahrzeuggewicht setzt sich aus dem Basisgewicht des Fahrzeugs, dem Gewicht des Brennstoffzellensystems, dem Gewicht des Wasserstofftanks, der Masse der Batterie und der Masse des Elektromotors, wie in Formel (3.10) beschrieben, zusammen.

$$m_{FZ} = m_{Base} + m_{FC} + m_{H2-Tank} + m_{Bat} + m_{EM} \quad (3.10)$$

Für das Basisgewicht des Audi A3-etrón, ohne Antriebsstrang, wurde eine Masse von 1088 kg angenommen. Mit Daten aus firmeninternen Absprachen wurde für das Brennstoffzellensystem eine leistungsspezifische Masse von 1 kW/kg angenommen. Der Wasserstofftank hat eine Masse von 200 kg. Die kapazitätsspezifische Masse der Batterie wurde für jede Batterie einzeln angenommen, da die Hilfssysteme der Batterien für unterschiedliche Batteriegrößen einen unterschiedlichen Anteil der Gesamtmasse ausmachen. Die Hauptkomponenten des Batteriesystems sind die Batteriezellen, das Kühlsystem, das Gehäuse und die Kabelverbindungen.

Für eine 2,1 kWh Batterie wurde eine spezifische Masse von 0,015 kg/Wh, für die 8,8 kWh Batterie 0,0134 kg/Wh, für die 20 kWh Batterie 0,01 kg/Wh und für die 77,4 kWh Batterie 0,0075 kg/Wh angenommen. Die Annahmen für die gravimetrischen Daten der Batterien

wurden vom Skillteam für Batterymanagement getroffen. Der Elektromotor hat eine Masse von 62 kg. Die Massen des Elektromotors, des Fahrzeugs, ohne Antriebsstrang, und des Wasserstofftanks sind für alle untersuchten Antriebsstränge konstant. Die Berechnungsdaten sind in Tabelle 3.7 zusammengefasst.

Tabelle 3.7: Massenangaben

Massenangaben	
Fahrzeugbasis	1088 kg
Brennstoffzellensystem	1 kg/kW
$M_{\text{Bat-2,1kWh}}$	0,015 kg/Wh
$M_{\text{Bat-8,8kWh}}$	0,0134 kg/Wh
$M_{\text{Bat-20kWh}}$	0,01 kg/Wh
$M_{\text{Bat-77,4kWh}}$	0,0075 kg/Wh
Wasserstofftank	200 kg
Elektromotor	62 kg

$$m_{FC} = P_{FC} M_{FC} \quad (3.11)$$

$$m_{\text{Bat}} = C_{\text{Bat}} M_{\text{Bat}-i} \quad (3.12)$$

Die Masse des jeweiligen Brennstoffzellensystems berechnet sich laut Formel (3.11) mit der Leistung des Brennstoffzellensystems multipliziert mit der leistungsspezifischen Masse M_{FC} . Die Batteriemasse ist das Produkt aus der jeweiligen Batteriekapazität und der kapazitätsspezifischen Masse ($i=2,1$ kWh, 8,8 kWh, 20 kWh, 77,4 kWh), siehe Formel (3.12).

Hieraus ergeben sich die folgenden Massen der Fahrzeuge mit den unterschiedlichen Antriebssträngen in Tabelle 3.8.

Tabelle 3.8: Gesamtgewicht der untersuchten Fahrzeuge

	Fahrzeugbasis	Brennstoffzellensystem	Wasserstofftank	Batterie	E-Motor	Gesamtgewicht
FCEV	1088 kg	100 kg	200 kg	30 kg	62 kg	1480 kg
FCBHV	1088 kg	50 kg	200 kg	118 kg	62 kg	1518 kg
FCREV	1088 kg	20 kg	200 kg	200 kg	62 kg	1570 kg
BEV	1088 kg	0 kg	0 kg	600 kg	62 kg	1750 kg

3.1.4 Fahrzyklen

Als Input in das PEMREX-Simulationsmodell dienten die durch den Fahrzyklus gegebenen Geschwindigkeitsprofile und der zu bewältigende Höhenunterschied. Da bezüglich der vom Fahrzeug abgerufenen Leistung sehr unterschiedliche Fahrzyklen existieren, wurde die Simulation mit mehreren unterschiedlichen Fahrzyklen durchgeführt. Die verwendeten Zyklen werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Zur Ermittlung des Wasserstoffverbrauchs und der Reichweite wurden der NEDC, der WLTC, der Graz-RDE und der Großglockner-Fahrzyklus simuliert. Zusätzlich wurden der Top Speed-Fahrzyklus,

der Elasticity-Fahrzyklus und der Performance-Zyklus als Input verwendet, um die Antriebsstränge bezüglich Beschleunigung und Top Speed miteinander zu vergleichen.

3.1.4.1 New European Driving Cycle (NEDC)

Der NEDC in Abbildung 3.6 wird zur Ermittlung der Verbrauchsdaten von Serienfahrzeugen in Europa verwendet. Dieser Zyklus besteht aus vier identischen Stadtzyklen mit der Dauer von insgesamt 780 Sekunden und einem außerstädtischen Zyklus von 400 Sekunden Dauer [18]. Dieser Zyklus ist nicht sehr leistungsintensiv für das Fahrzeug, da z.B. keine Höhendifferenz in diesem Fahrzyklus existiert.

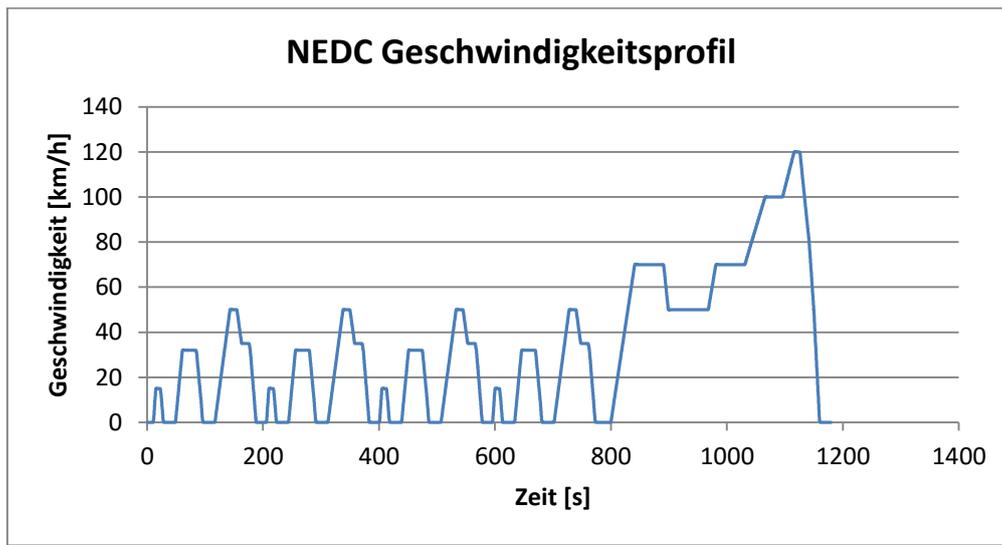


Abbildung 3.6: NEDC

3.1.4.2 Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTC)

Der WLTC soll laut EU-Parlament den NEDC bis 2017 ablösen. Dieser Fahrzyklus wurde speziell für Leichtfahrzeuge entwickelt und wurde für drei unterschiedliche Fahrzeugklassen definiert. P_{Wr} gibt die kW pro Tonne Fahrzeuggewicht an.

- Klasse 1: Fahrzeuge mit niedriger Leistung $P_{Wr} \leq 22$
- Klasse 2: Fahrzeuge mit mittlerer Leistung $22 \leq P_{Wr} \leq 34$
- Klasse 3: Fahrzeuge mit hoher Leistung $34 \leq P_{Wr}$

Die im Rahmen dieser Masterarbeit simulierte Fahrzeuge sind aus Klasse 3; der dementsprechende Fahrzyklus ist in Abbildung 3.7 abgebildet.

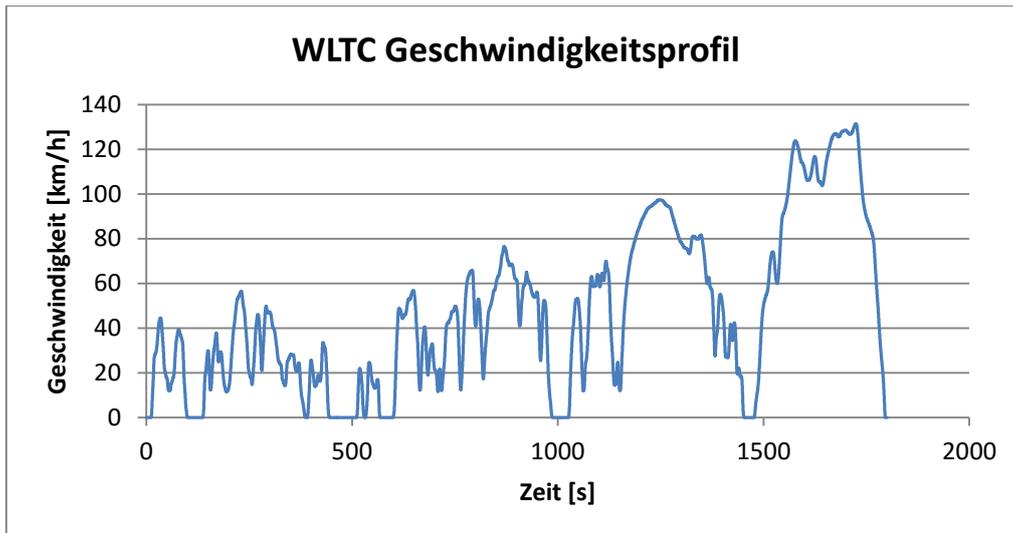


Abbildung 3.7: WLTC

Der gesamte Zyklus dauert 1800 Sekunden und hat keine Höhendifferenz.

3.1.4.3 Graz Real Driving Emission (RDE) Cycle

Dieser Fahrzyklus wurde im Raum Graz aufgezeichnet und soll möglichst realitätsnahe Resultate liefern, da auch ein Höhenprofil implementiert ist. Abbildung 3.8 zeigt das Geschwindigkeitsprofil und Abbildung 3.9 die Neigung über der Distanz des Graz-RDE Fahrzyklus.

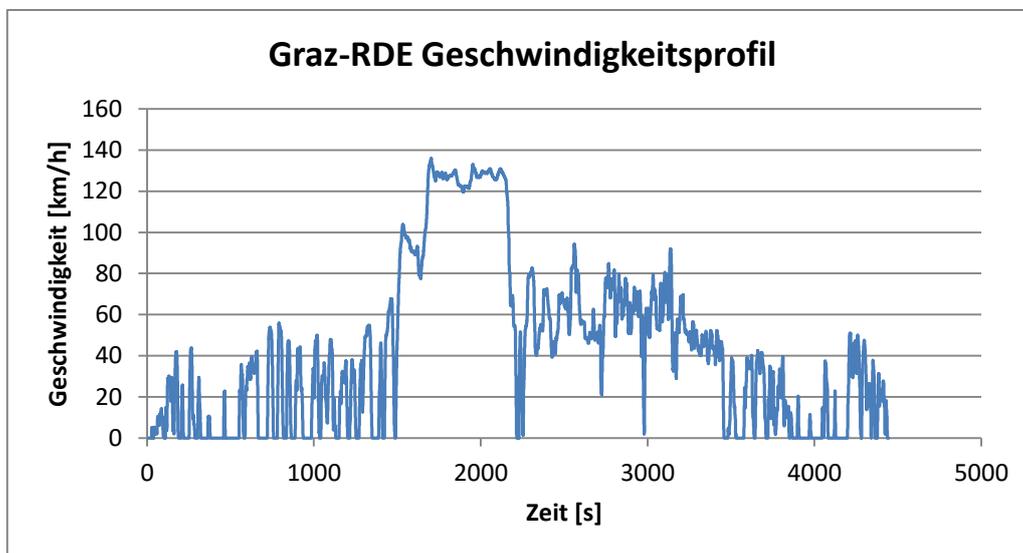


Abbildung 3.8: Graz RDE Cycle

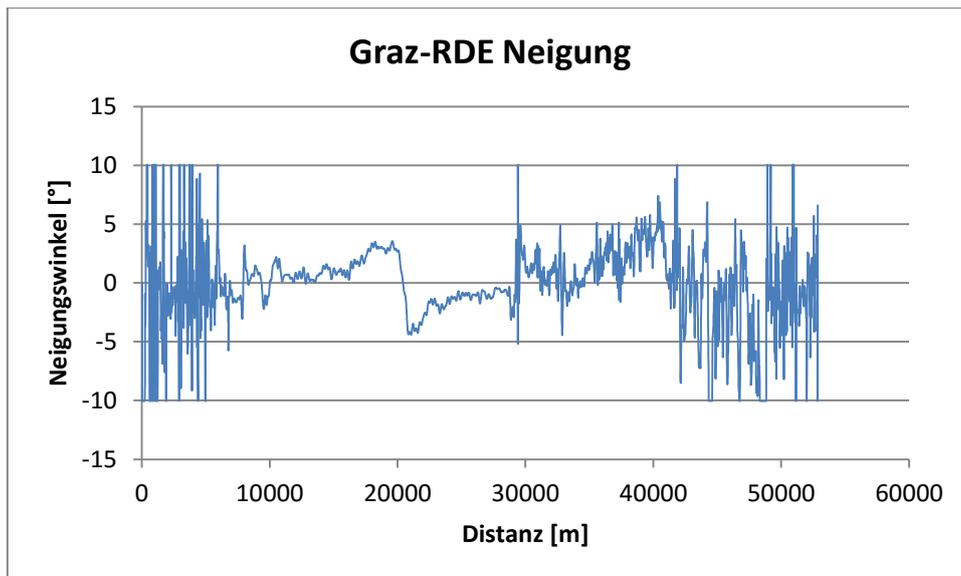


Abbildung 3.9: Neigung Graz-RDE

3.1.4.4 Großglockner Cycle

Der Großglockner-Fahrzyklus simuliert die Fahrt auf der Großglocknerstraße. Dieser Zyklus liefert sehr hohe Verbrauchswerte, da sehr große Höhenunterschiede überwunden werden. Bei diesem Zyklus versucht das Fahrzeugmodell mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 km/h den Berg zu überwinden, siehe Abbildung 3.10.

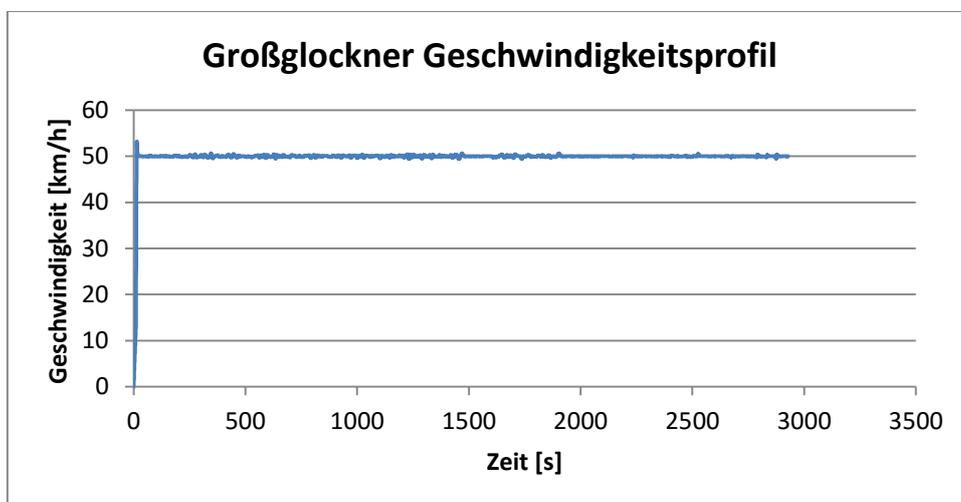


Abbildung 3.10: Grossglockner Cycle Geschwindigkeitsprofil

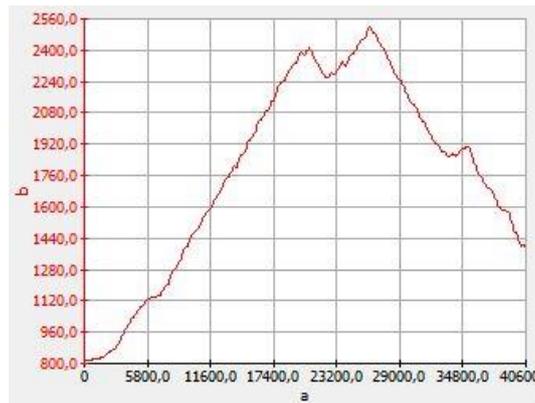


Abbildung 3.11: Grossglockner Cycle Höhenprofil

Abbildung 3.11 zeigt das Höhenprofil der Großglocknerstraße: auf der Achse a ist die zurückgelegte Distanz in [m] aufgetragen und auf der b-Achse ist die Seehöhe in [m] aufgetragen.

3.1.4.5 Top Speed Cycle

Bei diesem Zyklus wird das Fahrzeug auf Top Speed beschleunigt, wobei der Top Speed hier 140,8 km/h ist. Dieser dient, wie der Name sagt, zur Bestimmung der Zeit bis zur Erreichung der Höchstgeschwindigkeit. Das Geschwindigkeitsprofil ist in Abbildung 3.12 dargestellt.

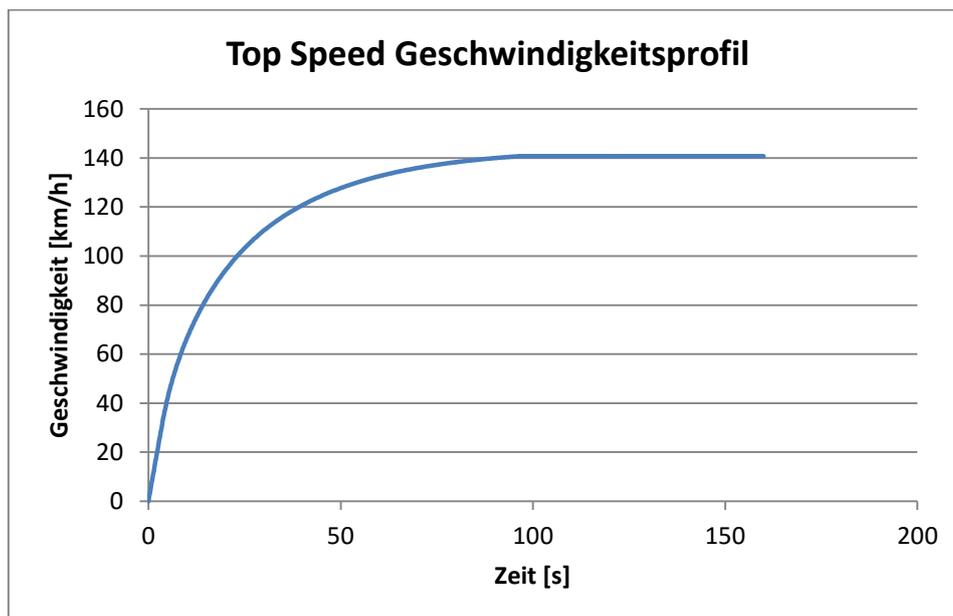


Abbildung 3.12: Top Speed Geschwindigkeitsprofil

3.1.4.6 Elasticity Cycle

Unter Elastizität versteht man die Beschleunigung des Fahrzeugs von 80 km/h auf 120 km/h, siehe Abbildung 3.13. Dabei wird die Zeit gemessen.

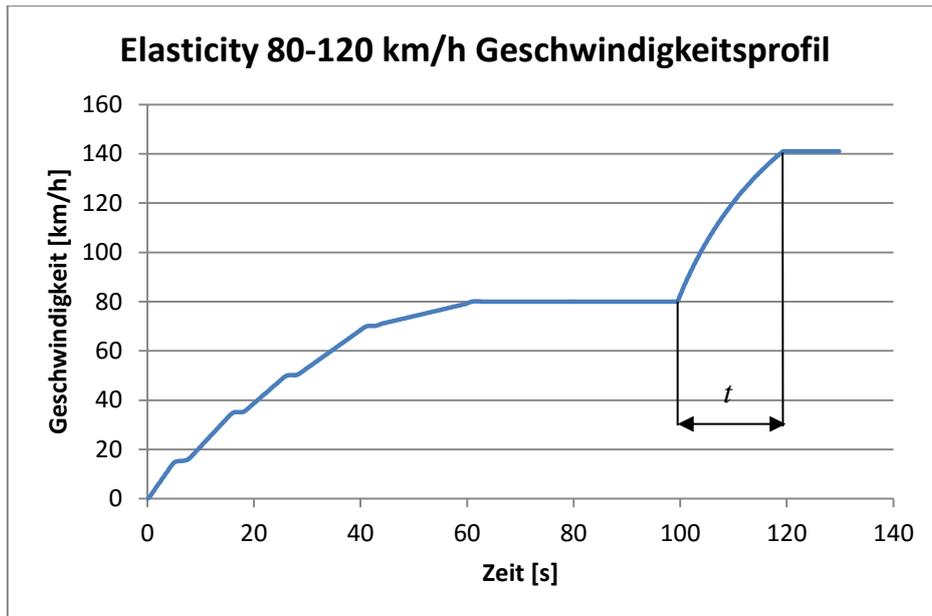


Abbildung 3.13: Elasticity Geschwindigkeitsprofil

3.1.4.7 Performance Cycle

Beim Performance Cycle wird die Zeit gemessen, die das Fahrzeug für das Beschleunigen von 0 km/h auf 100 km/h benötigt. Das Geschwindigkeitsprofil befindet sich in Abbildung 3.14.

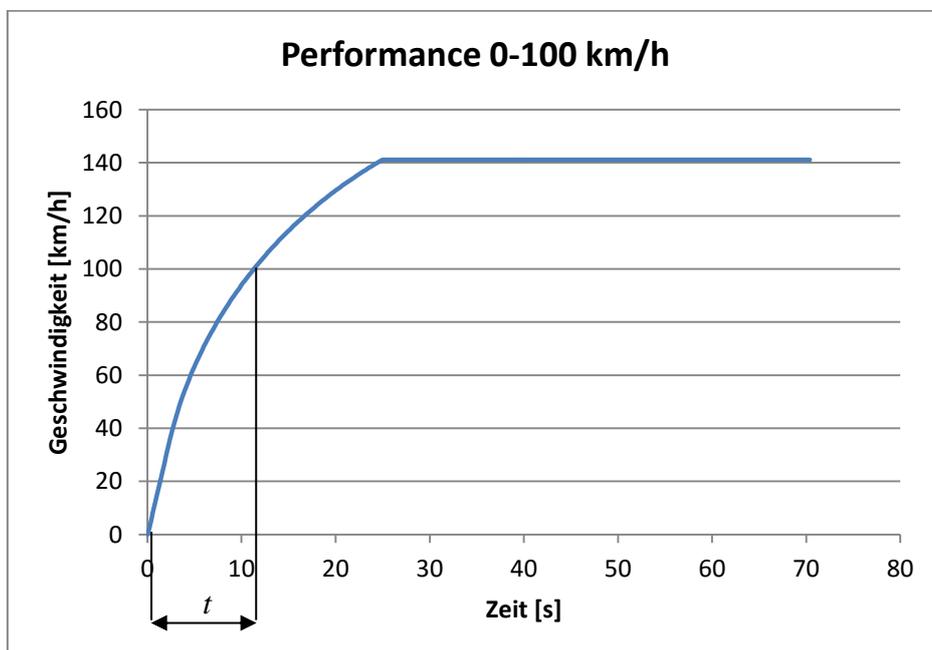


Abbildung 3.14: Performance Geschwindigkeitsprofil

3.1.5 Bestimmung der Reichweite und des Verbrauchs

Ein Brennstoffzellenfahrzeug besitzt zwei Energielieferanten: das Brennstoffzellensystem und die Batterie. Um den Verbrauch und die mögliche Reichweite der untersuchten Fahrzeuge zu bestimmen, müssen mit Ausnahme des BEV, die Batterie und das Brennstoffzellensystem getrennt betrachtet werden, da sonst die verschiedenen Antriebsstränge nicht vergleichbar

sind. Das heißt, man muss die Batterie von der Brennstoffzelle bzw. die Brennstoffzelle von der Batterie entkoppeln. Dabei werden zwei Batterie-Lade- bzw. Entladestrategien verwendet, die sog. Charge-sustaining und die sog. Charge-depleting Methode.

Bei der Bestimmung der Reichweite des jeweiligen Fahrzeugs müssen die entsprechenden Fahrzyklen zweimal simuliert werden, einmal mit Charge-sustaining und zusätzlich mit Charge-depleting. Mit der Charge-sustaining-Strategie wird ermittelt, wie weit das Fahrzeug nur mit dem getankten Wasserstoff kommt und mit der Charge-depleting-Strategie wird berechnet, wie weit das Fahrzeug nur mit der Batterie kommt. Für die gesamte Reichweite müssen die beiden Distanzen addiert werden. Die Bestimmung des Wasserstoffverbrauchs des Fahrzeugs wurde mit Charge-sustaining durchgeführt.

Trotz der Batterie-SOC-Begrenzung von 20-90% wurden bei bestimmten k-Faktor-Einstellungen, siehe Formel (3.1), und für bestimmte Fahrzyklen SOC-Grenzen teilweise unter- bzw. überschritten. Darum musste auf den SOC-Verlauf während der Fahrzyklen besonders geachtet werden. Ergebnisse mit derartigen Fehlern wurden nicht in diese Arbeit miteinbezogen bzw. korrigiert.

3.1.5.1 Charge-sustaining

Verwendet man die Charge-sustaining-Ladestrategie, versucht das Fahrzeugmodell in AVL Cruise den zu Beginn eingestellten Ladezustand der Batterie am Ende wieder zu erreichen. Die Simulation kann bei längeren Fahrzyklen einige Zeit in Anspruch nehmen, da das Programm iterativ versucht, das eingegebene ΔSOC zu erreichen. Formel (3.13) gibt die Berechnung von ΔSOC an.

$$\Delta SOC = SOC_A - SOC_E \quad (3.13)$$

ΔSOC gibt den Unterschied des Batterieladezustandes am Anfang SOC_A und am Ende SOC_E des Fahrzyklus an. In der durchgeführten Simulationen wurde das maximale ΔSOC auf 1 % festgelegt.

Zur Erreichung der ΔSOC -Obergrenze von 1 % musste für jeden Antriebsstrang und für jeden Fahrzyklus der k-Faktor, siehe Formel (3.1), kalibriert werden, was als „k-Faktor tuning“ bezeichnet wurde. In Tabelle 3.9 sind die eingestellten k-Faktoren für jedes Fahrzeug und jeden Fahrzyklus aufgelistet.

Tabelle 3.9: k-Faktortabelle

	FCEV	FCBHV	FCREV
WLTC	0,874	0,88	0,95
NEDC	0,858	0,87	0,93
Graz-RDE	0,82	0,83	-
Großglockner	0,8	0,767	-

Das Fuel Cell Electric Vehicle hat eine Brennstoffzellenleistung von 100 kW und eine Batteriekapazität von 2,1 kWh, das Fuel Cell Battery Hybrid Electric Vehicle eine Brennstoffzellenleistung von 50 kW und eine Batteriekapazität von 8,8 kWh und das Fuel

Cell Range Extended Electric Vehicle eine Brennstoffzellenleistung von 20 kW und eine Batteriekapazität von 20 kWh.

Für die mit „-“ markierten Fahrzyklen war eine Charge-sustaining-Simulation, mit Einhaltung der ΔSOC -Obergrenze, nicht möglich. Bei diesen Antriebssträngen wurden Änderungen vorgenommen um die ΔSOC -Grenze einzuhalten; Näheres in Kapitel 3.2.

3.1.5.2 Charge-depleting

Bei der Charge-depleting-Entladestrategie dient nur die Batterie dem Elektromotor als Leistungslieferant und die Batterie wird auch nicht geladen, d.h. das Brennstoffzellensystem läuft auf Stand-by. Somit kann man die Reichweite ermitteln, welche das Fahrzeug mit aufgeladener Batterie durch Entleeren der Batterie erreicht.

3.1.5.3 Verbrauchs- und Reichweitenbestimmung

Mit dem PEMREX-Modell, den erläuterten Fahrzyklen und den beiden Lade- bzw. Entladestrategien wurde die Simulation durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulation wurden mit dem MS Export-Modul in eine Microsoft Excel-Datei exportiert und anschließend ausgewertet.

3.1.5.3.1 Verbrauchsermittlung

Das Ergebnis des Verbrauchs wurde für Vergleichszwecke in kg-Wasserstoffverbrauch pro 100 Kilometer angegeben. Dieser berechnet sich laut Formel (3.14). Dabei wird der Gesamtwaterstoffverbrauch für den jeweiligen Fahrzyklus durch die Distanz des Fahrzyklus dividiert und mit 100 multipliziert.

$$b_{u,v 100} = \frac{b_{u,v}}{s_v} * 100 \quad (3.14)$$

$u=(FCEV,FCBHV,FCREV)$, $v=(Graz-RDE, NEDC, WLTC, Großglockner)$

3.1.5.3.2 Reichweitenbestimmung

Für die Bestimmung der Reichweite der betrachteten Fahrzeuge wurden die jeweiligen Fahrzyklen zweimal simuliert, einmal mit SOC-sustaining und einmal mit SOC-depleting. Die Reichweite, welche rein mit dem PEM-Brennstoffzellensystem s_{FC} und den Wasserstofftanks möglich ist, wurde mit der Simulation mit SOC-sustaining ermittelt. Die reine Batteriereichweite s_{Bat} wurde mit der Simulation mit SOC-depleting berechnet. Die Gesamtreichweite ist die Summe der beiden Reichweiten, siehe Formel (3.15).

$$s_{gesamt} = s_{FC} + s_{Bat} \quad (3.15)$$

s_{FC} berechnet sich laut Formel (3.16) mit der Wasserstoffmasse im Tank dividiert durch den Wasserstoffverbrauch pro 100 km multipliziert mit 100.

$$s_{FC} = \frac{m_{H2}}{b_{u,v 100}} 100 \quad (3.16)$$

Bei der Berechnung von s_{Bat} wurde das ΔSOC beim Durchlaufen eines Fahrzyklus mit Charge-depleting ermittelt und anschließend die Anzahl der möglichen Fahrzyklusdurchläufe

bestimmt. Die Anzahl wurde mit der Distanz des jeweiligen Fahrzyklus multipliziert, siehe Formel (3.17) und Formel (3.18).

$$n_v = \frac{SOC_o - SOC_U}{\Delta SOC} \quad (3.17)$$

$$s_{Bat} = n_v s_v \quad (3.18)$$

Bei kleinen Batterien war es zum Teil nicht möglich, den gesamten Fahrzyklus zu durchlaufen. In solchen Fällen wurde die bereits zurückgelegte Distanz bei Unterschreitung von 20 % SOC als s_{Bat} verwendet.

3.2 Resultate und Diskussion

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Simulation enthalten. Für die einzelnen Fahrzeuge wurden sieben Fahrzyklen simuliert und ausgewertet. Die verwendeten Fahrzyklen sind Graz-RDE, NEDC, WLTC, Großglockner, Elasticity, Performance und Top Speed, siehe Kapitel 3.1.4.

3.2.1 Simulationsergebnisse des FCEV

Tabelle 3.10 zeigt die Fahrzeugbasisdaten für das FCEV. Das Fahrzeug hat eine Elektromotorleistung von 85 kW, ein PEM-Brennstoffzellensystem mit einer Leistung von 100 kW und eine Batteriekapazität von 2,1 kWh.

Tabelle 3.10: FCEV Fahrzeugdaten

Fahrzeugbasismasse	1480 kg
Elektromotorleistung	85 kW
Brennstoffzellenleistung	100 kW
Batteriekapazität	2,1 kWh
Wasserstofftankmenge	4,5 kg

In Tabelle 3.11 sind die Ergebnisse der Fahrzeugleistungssimulation dargestellt.

Tabelle 3.11: FCEV Leistungsdaten

von 0 - 100 km/h	11,2 s
von 80-120 km/h	8,6 s
Zeit zur Erreichung der Höchstgeschwindigkeit	72,2 s
Höchstgeschwindigkeit	140,74 km/h

Tabelle 3.12 zeigt die Resultate der Verbrauchs- und der Reichweitenermittlung für die verschiedenen Fahrzyklen.

Tabelle 3.12: FCEV Verbrauchs- und Reichweitendaten

	Graz-RDE	NEDC	WLTC	Großglockner
H2 Verbrauch [kg/100km]	1,15 kg	0,91 kg	1,05 kg	1,37 kg
Reichweite	399,76 km	504,22 km	440,63 km	337,40 km
k-Faktor	0,82	0,858	0,874	0,8
Δ SOC	0,002 %	0,833 %	0,037 %	0,039 %
SOC _A	70 %	70 %	80 %	80 %

3.2.2 Simulationsergebnisse des FCBHV

Tabelle 3.13 beinhaltet die Basisdaten des Fuel Cell Battery Hybrid Vehicles. Dieses Fahrzeug hat einen Elektromotor mit 85 kW Leistung, ein PEM-Brennstoffzellensystem mit 50 kW Leistung und eine Batterie mit 8,8 kWh Kapazität.

Tabelle 3.13: FCBHV Fahrzeugdaten

Fahrzeugbasismasse	1518 kg
Elektromotorleistung	85 kW
Brennstoffzellenleistung	50 kW
Batteriekapazität	8,8 kWh
Wasserstofftankmenge	4,5 kg

Tabelle 3.14 zeigt die Zeit von 0 auf 100 km/h, jene von 80 auf 120 km/h und die Höchstgeschwindigkeit an.

Tabelle 3.14: FCBEV Leistungsdaten

von 0 - 100 km/h	11,4 s
von 80 - 120 km/h	9 s
Zeit zur Erreichung der Höchstgeschwindigkeit	96,6 s
Höchstgeschwindigkeit	140,75 km/h

Tabelle 3.15 zeigt die berechneten Verbräuche und die Reichweiten der Graz-RDE-, NEDC-, WLTC-Fahrzyklen und des Großglockner-Fahrzyklus.

Tabelle 3.15: FCBEV Verbrauchs- und Reichweitendaten

	Graz-RDE	NEDC	WLTC	Grossglockner
H ₂ Verbrauch [kg/100km]	0,96 kg	0,81 kg	0,89 kg	1,01 kg
Reichweite	499,62 km	593,33 km	538,71 km	459,36 km
k-Faktor	0,83	0,87	0,88	0,73
ΔSOC	0,173 %	0,515 %	0,380 %	0,313 %
SOC _A	80 %	70 %	80 %	80 %

3.2.3 Simulationsergebnisse des FCREV-v1

In Tabelle 3.16 sind die Basisdaten des Fuel Cell Range Extended Vehicles Version 1 zusammengefasst.

Tabelle 3.16: FCREV-v1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbasismasse	1570 kg
Elektromotorleistung	85 kW
Brennstoffzellenleistung	20 kW
Batteriekapazität	20 kWh
Wasserstofftankmenge	4,5 kg

Tabelle 3.17 zeigt die Ergebnisse des Performance-, des Elasticity- und des Top Speed-Fahrzyklus.

Tabelle 3.17: FCREV-v1 Leistungsdaten

von 0 - 100 km/h	11,5 s
von 80 - 120 km/h	9,3 s
Zeit zur Erreichung der Höchstgeschwindigkeit	47,6 s
Top Speed	140,77 km/h

Tabelle 3.18 gibt die Ergebnisse der Verbrauchs- und die Reichweitenberechnung für die unterschiedlichen Fahrzyklen. Mit dem Graz-RDE- und den Großglockner-Fahrzyklus ist eine Charge-sustaining-Simulation nicht möglich. Der k-Faktor musste auf ~ 1 gestellt werden, um ein ΔSOC von $>1\%$ zu erhalten. Da ein so hoher k-Faktor nicht sinnvoll ist, weil dann die Leistung ausschließlich von der Brennstoffzelle kommen würde, wurden die Ergebnisse nicht verwendet. Ein solches Phänomen gibt Aufschluss darüber, dass die verwendete Brennstoffzellenleistung zu klein ist. Darum wurde die Brennstoffzellenleistung des FCREV erhöht.

Tabelle 3.18: FCREV-v1 Verbrauchs- und Reichweitendaten

	Graz-RDE	NEDC	WLTC	Großglockner
H2 Verbrauch [kg/100km]	-	0,80 kg	0,93 kg	-
Reichweite	-	644,85 km	549,93 km	-
k-Faktor	0,97	0,93	0,95	0,97
ΔSOC	1,11 %	0,62 %	0,97 %	1,57 %
SOC_A	21,98 %	90 %	20,86 %	61,33 %

3.2.4 Simulationsergebnisse des FCREV-v2

Tabelle 3.19 zeigt die Fahrzeugdaten des Fuel Cell Range Extended Vehicle Version 2. Die Leistung des Brennstoffzellensystems wurde von 20 kW auf 35 kW erhöht. Dies ist die minimale Leistung des Brennstoffzellensystems, welche für eine Charge-sustaining-Simulation, für die 20 kWh-Batterie erforderlich ist. Dies wurde durch mehrere Testsimulationen mit schrittweise erhöhter Brennstoffzellenleistung ermittelt.

Tabelle 3.19: FCREV-v2 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbasismasse	1585 kg
Elektromotorleistung	85 kW
Brennstoffzellenleistung	35 kW
Batteriekapazität	20 kWh
Wasserstofftankmenge	4,5 kg

Tabelle 3.20 stellt die Ergebnisse der Leistungsfahrzyklen dar.

Tabelle 3.20: FCREV-v2 Leistungsdaten

von 0 - 100 km/h	12 s
von 80 - 120 km/h	9,2 s
Zeit zur Erreichung der Höchstgeschwindigkeit	79,4 s
Höchstgeschwindigkeit	140,75 km/h

In Tabelle 3.21 sind die Ergebnisse der Simulationen für die Verbrauchs- und Reichweitenermittlung aufgelistet.

Tabelle 3.21: FCREV-v2 Verbrauchs- und Reichweitendaten

	Graz-RDE	NEDC	WLTC	Großglockner
H2 Verbrauch [kg/100km]	1,37 kg	0,89 kg	1,18 kg	1,20 kg
Reichweite	385,81 km	587,72 km	447,45 km	449,60 km
k-Faktor	0,92	0,84	0,89	0,75
Δ SOC	0,009 %	0,446 %	0,898 %	0,109 %
SOC _A	70 %	70 %	80 %	70 %

3.2.5 Simulationsergebnisse des BEV

Tabelle 3.22 zeigt die Basisdaten des Battery Electric Vehicles.

Tabelle 3.22: BEV Fahrzeugdaten

Fahrzeugbasismasse	1750 kg
Elektromotorleistung	85 kW
Brennstoffzellenleistung	0 kW
Batteriekapazität	77,4 kWh
Wasserstofftankmenge	0 kg

Tabelle 3.23 zeigt die benötigte Zeit, um das BEV von 0 auf 100 km/h und von 80 auf 120 km/h zu beschleunigen und die erreichte Höchstgeschwindigkeit, sowie die Zeit zur Erreichung dieser.

Tabelle 3.23: BEV Leistungsdaten

von 0 - 100 km/h	13 s
von 80 - 120 km/h	10,2 s
Zeit zur Erreichung der Höchstgeschwindigkeit	93,2 s
Top Speed	140,8 km/h

In Tabelle 3.24 sind die Ergebnisse der Verbrauchs- und Reichweitenermittlung für die verschiedenen simulierten Fahrzyklen dargestellt.

Tabelle 3.24: BEV Reichweitendaten

	Graz-RDE	NEDC	WLTC	Großglockner
H2 Verbrauch [kg/100km]	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg
Reichweite	263,21 km	349,28 km	293,33 km	251,86 km
k-Faktor	0	0	0	0

3.2.6 Vergleich der Leistungsdaten der Antriebsstränge

Der Vergleich der Ergebnisse der Simulation wurde grafisch dargestellt. In Abbildung 3.15 ist der Vergleich der Beschleunigung der verschiedenen Antriebsstränge ersichtlich. Das FCEV hat die beste Beschleunigung mit 11,2 s von 0 auf 100 km/h. Die langsamste Beschleunigung der untersuchten Antriebsstränge hat das BEV mit 13 s. Die Beschleunigungswerte korrelieren stark mit den Fahrzeugmassen, da diese die Fahrwiderstandskräfte stark beeinflussen. Das leichteste Fahrzeug FCEV hat auch die beste Beschleunigung und das schwerste BEV die schlechteste.

Das Gleiche gilt auch für die Beschleunigung von 80 auf 120 km/h, dargestellt in Abbildung 3.17. Das FCEV hat die schnellste Beschleunigungszeit von 8,6 s und das BEV die langsamste mit 10,2 s.

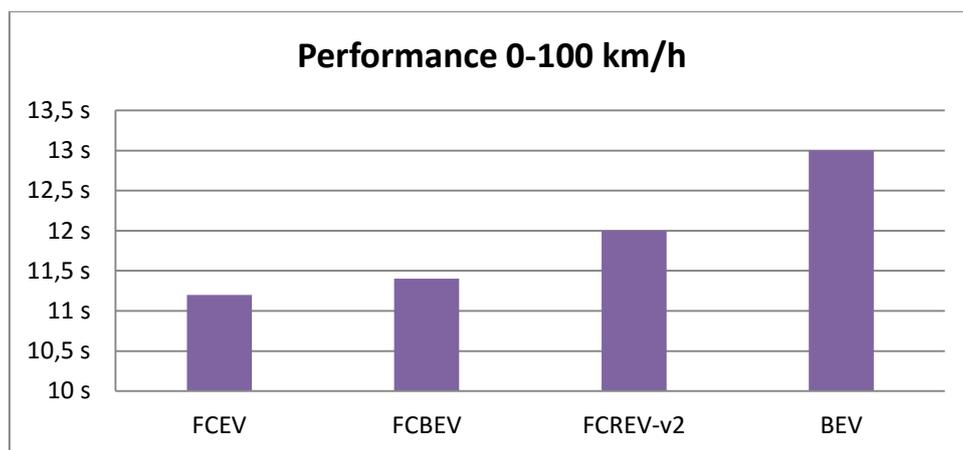


Abbildung 3.15: Beschleunigungsvergleich

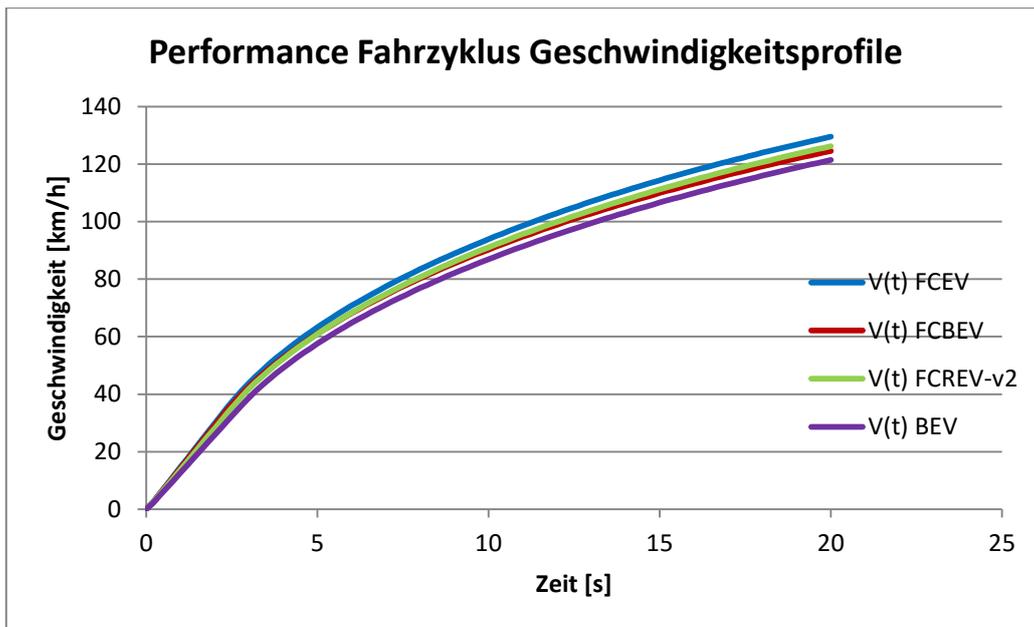


Abbildung 3.16: Geschwindigkeitsprofile Performance-Fahrzyklus

Abbildung 3.16 zeigt den Vergleich der Geschwindigkeitsprofile beim Performance-Fahrzyklus.

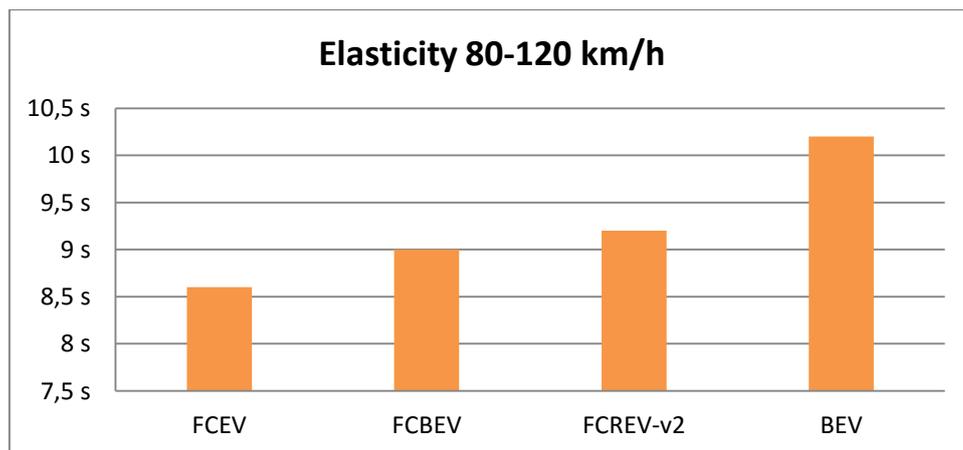


Abbildung 3.17: Elastizitätsvergleich

Abbildung 3.18 zeigt den Vergleich der Geschwindigkeitsprofile beim Elasticity-Fahrzyklus.

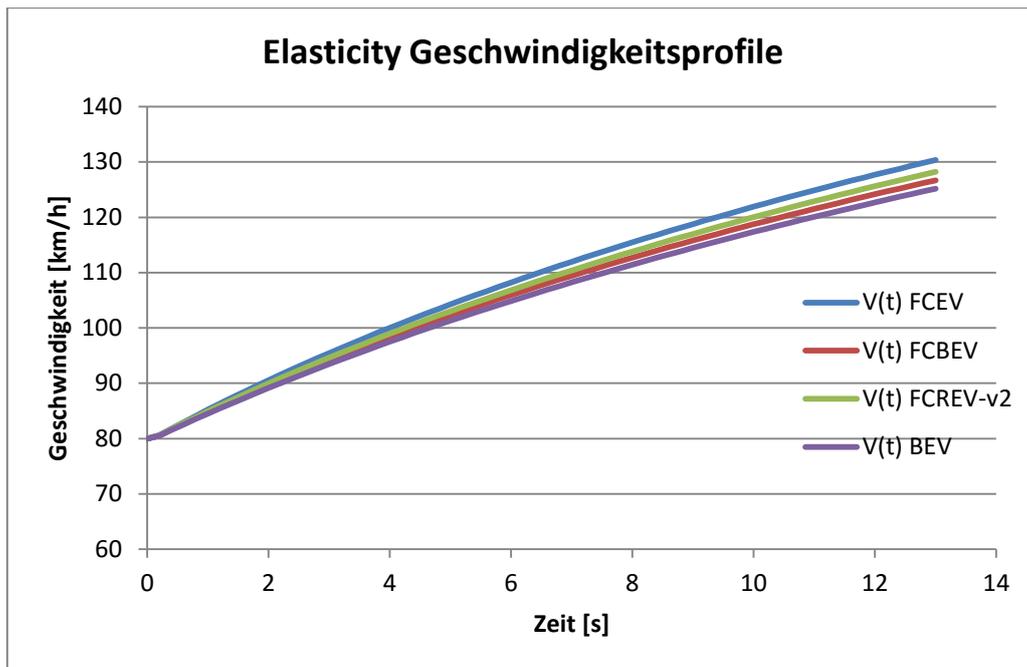


Abbildung 3.18: Geschwindigkeitsprofile Elasticity-Fahrzyklus

Die Zeit bis zur Erreichung der Höchstgeschwindigkeit ist bei allen Antriebssträngen relativ lang, siehe Abbildung 3.19, Tabelle 3.11, Tabelle 3.14, Tabelle 3.20 und Tabelle 3.23. Dabei ist zu bedenken, dass die Luftwiderstandskraft mit steigender Geschwindigkeit quadratisch steigt. Die geforderte Leistung des Elektromotors bei 140 km/h ist 55 kW. Abbildung 3.20 zeigt den Vergleich der Geschwindigkeitsprofile für den Top Speed-Fahrzyklus.

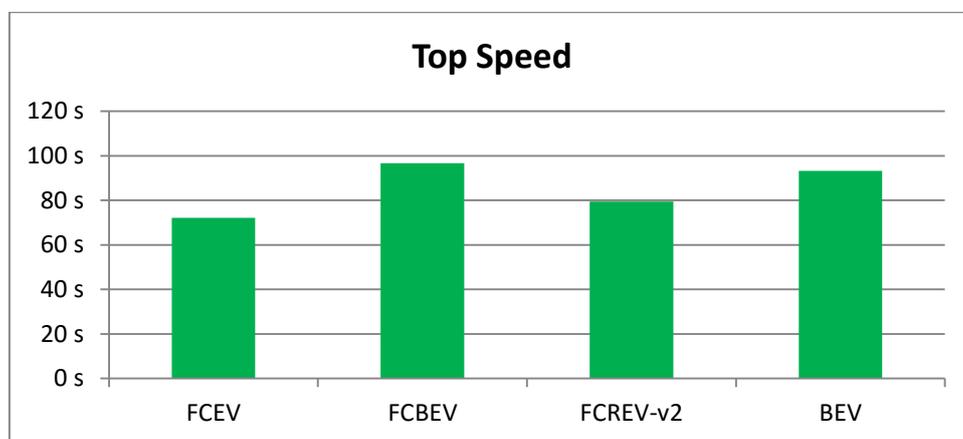


Abbildung 3.19: Top Speed Vergleich

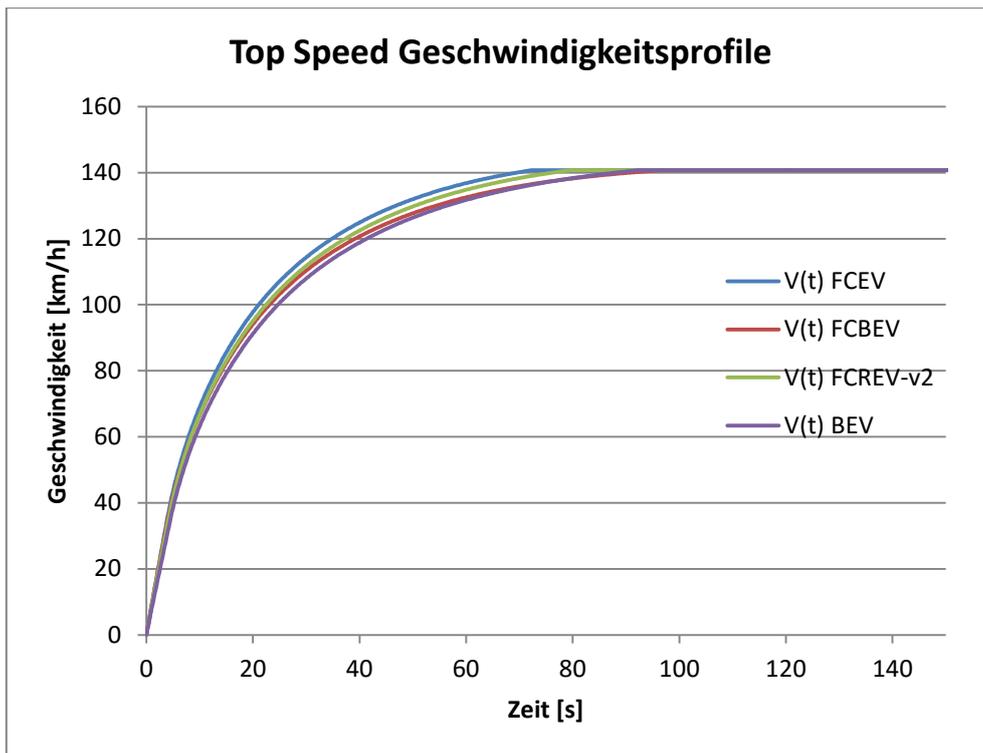


Abbildung 3.20: Geschwindigkeitsprofile Top Speed-Fahrzyklus

Abbildung 3.21 und Abbildung 3.22 stellen die Reichweite und den Verbrauch, ermittelt durch den Graz-RDE-Fahrzyklus, dar. Die größte Reichweite mit 499,62 km und den niedrigsten Verbrauch der Brennstoffzellenfahrzeuge mit 0,96 kg/100km hat das FCBEV. Die geringste Reichweite hat das BEV mit 263,21 km.

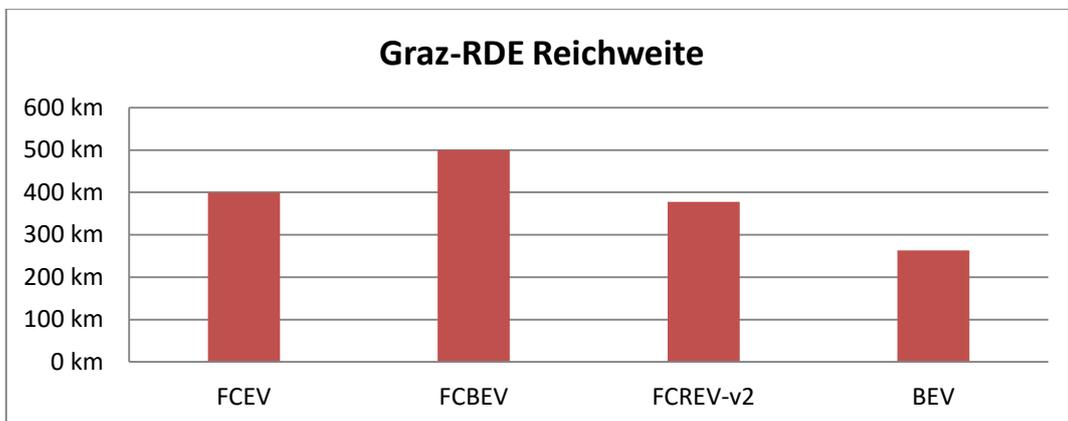


Abbildung 3.21: Reichweitenvergleich Graz-RDE

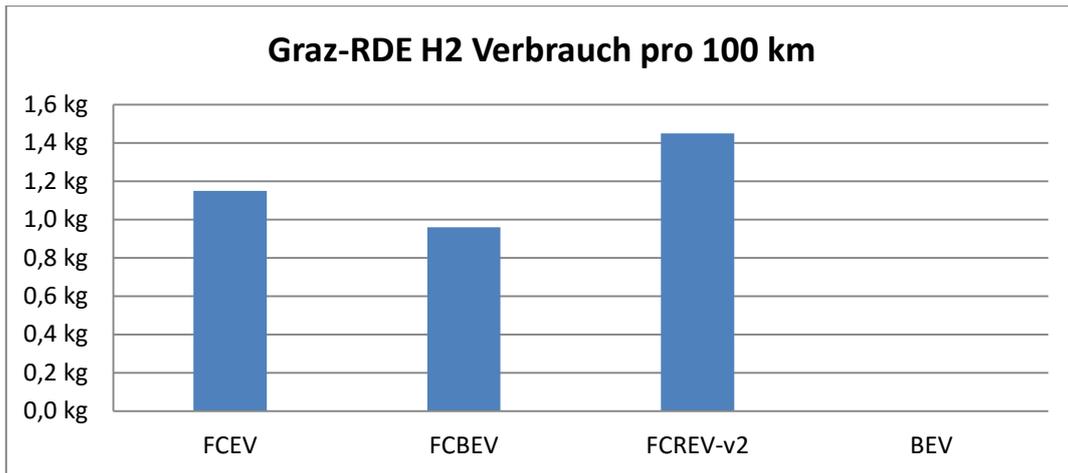


Abbildung 3.22: Wasserstoffverbrauchsvergleich Graz-RDE

Abbildung 3.23 und Abbildung 3.24 stellen den Reichweiten- und Verbrauchsvergleich, ermittelt durch den NEDC-Fahrzyklus, dar. Im NEDC-Fahrzyklus hat das FCREV-v2 die größte Reichweite mit 601,14 km und die niedrigste wiederum das BEV mit 349,28 km. Den niedrigsten Verbrauch der Brennstoffzellenfahrzeuge hat das FCBEV mit 0,81 kg/100 km. Im Vergleich zum Graz-RDE-Fahrzyklus sind die durch den NEDC ermittelten Verbrauchswerte deutlich niedriger, da der NEDC kein Höhenprofil aufweist und da dieser ein nicht so leistungsintensiver Zyklus ist.

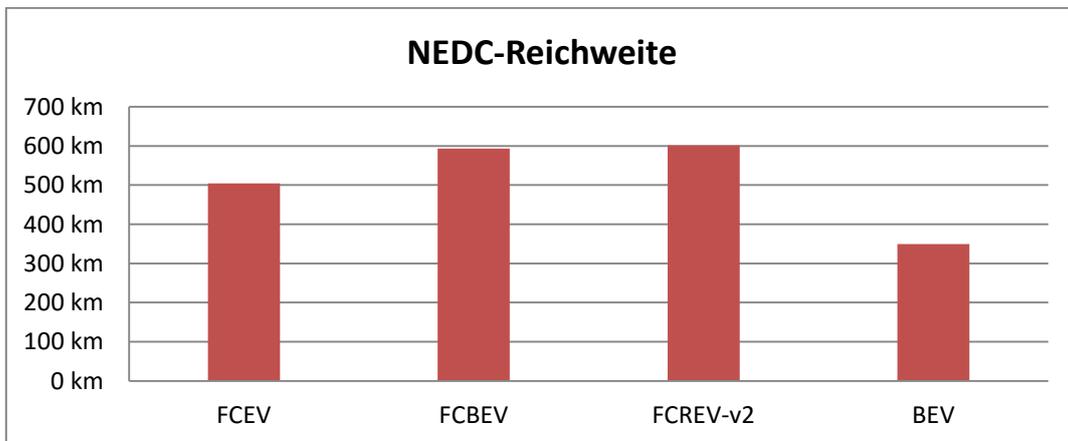


Abbildung 3.23: Reichweitenvergleich NEDC

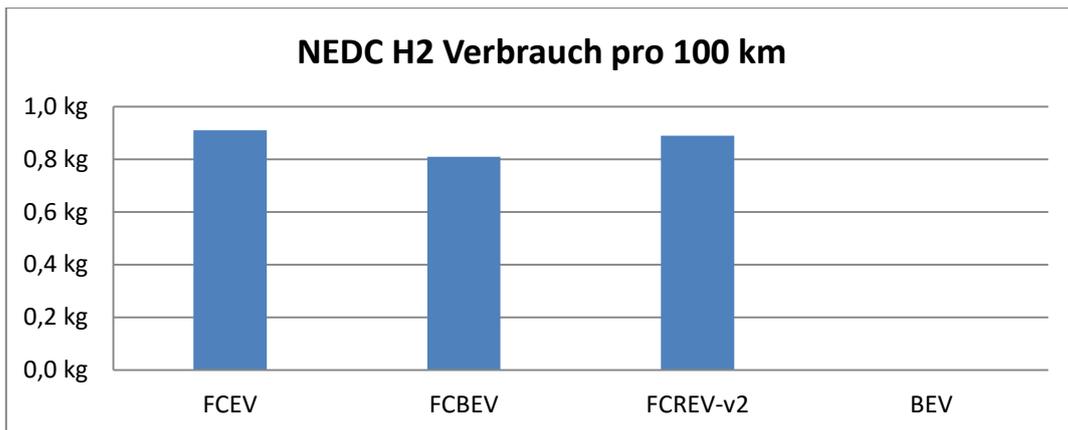


Abbildung 3.24: Wasserstoffverbrauchsvergleich NEDC

Abbildung 3.25 und Abbildung 3.26 zeigen die Reichweiten- und Verbrauchsvergleiche für den WLTC-Zyklus. Bei diesem hat die höchste Reichweite das FCBEV, mit einer Distanz von 538,71 km und die niedrigste wiederum das BEV mit 293,33 km. Den besten Verbrauchswert hat ebenfalls das FCBEV mit 0,89 kg/100 km.

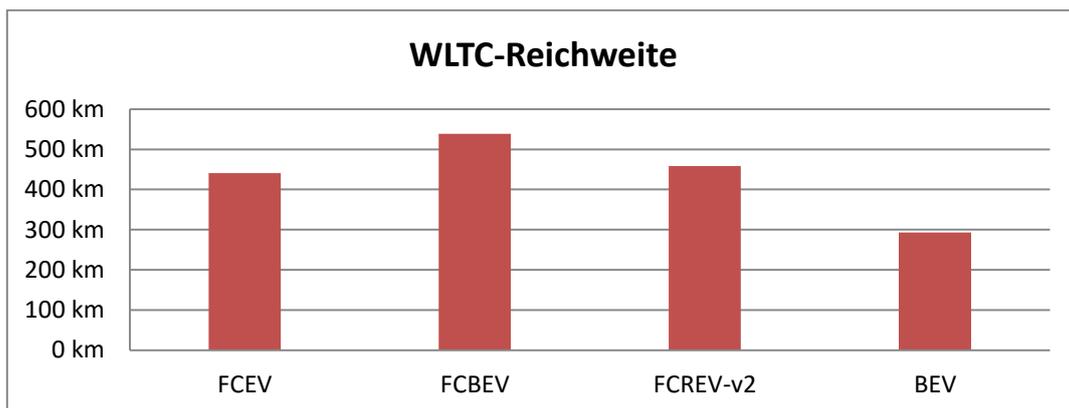


Abbildung 3.25: Reichweitenvergleich WLTC

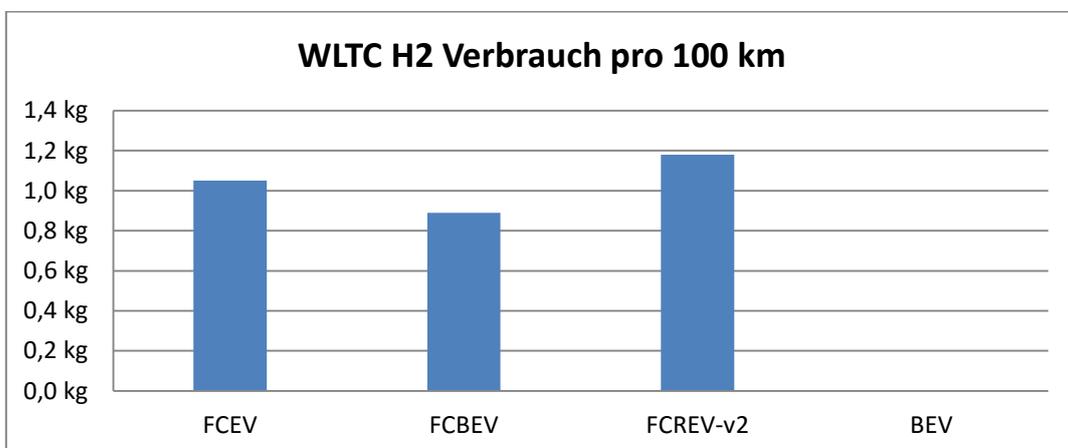


Abbildung 3.26: Wasserstoffverbrauchsvergleich WLTC

Die Ergebnisse des Großglockner-Fahrzyklus sind anders zu betrachten, da dieser Zyklus eher auf die Bewältigung eines ausgeprägten Höhenprofils abzielt und die Geschwindigkeit dabei konstant ist. Dabei spielt die Bremsenergieerückgewinnung beim Bergabfahren eine große Rolle.

Abbildung 3.27 zeigt den Vergleich der ermittelten Reichweiten durch den Großglockner-Fahrzyklus. Das FCBEV hat die größte Reichweite mit 459,36 km und die niedrigste das BEV mit 251,86 km. Bei der Betrachtung des Verbrauchsvergleichs, siehe Abbildung 3.28, ist ersichtlich, dass das FCBEV den geringsten Verbrauch mit 1,01 kg/100km hat.

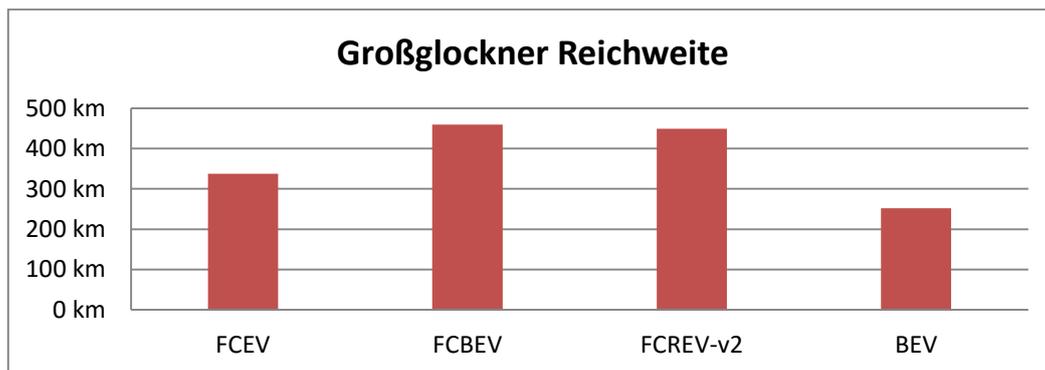


Abbildung 3.27: Reichweitenvergleich Großglockner

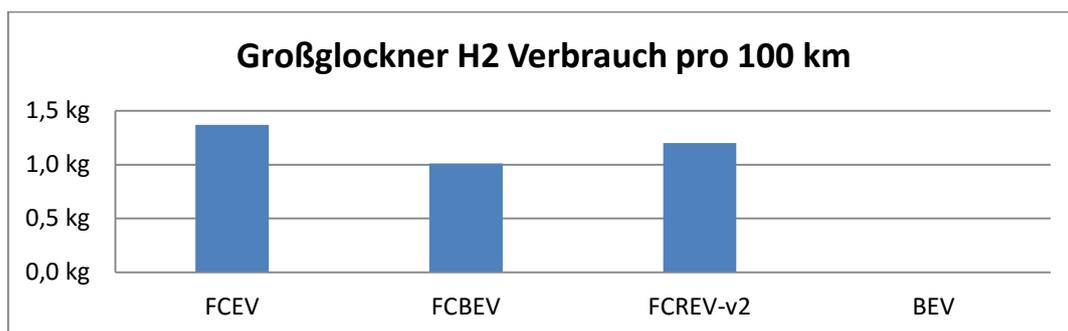


Abbildung 3.28: Wasserstoffverbrauchsvergleich Großglockner

Generell ist zu erkennen, dass das FCBEV bei den Verbrauchswerten und den Reichweiten die besten Werte hat; Näheres dazu in Kapitel 5. Die aussagekräftigsten Ergebnisse liefert der Graz-RDE-Fahrzyklus, da dieser das realistischste Fahrscenario darstellt. Die berechneten Reichweiten mit dem NEDC- und dem WLTC-Fahrzyklus sind höher, da diese kein Höhenprofil besitzen und somit weniger Wasserstoff verbraucht wird. Abbildung 3.29 bis Abbildung 3.32 zeigen die SOC-Verläufe der Simulationen mit SOC-sustaining und SOC-depleting, sowie den Verlauf der geforderten Leistung des Elektromotors über der Zeit für den Graz-RDE-Fahrzyklus. Die Verläufe für den NEDC-, WLTC- und Grossglockner-Fahrzyklus sind in Abbildung 0.1 bis Abbildung 0.12 im Anhang dargestellt.

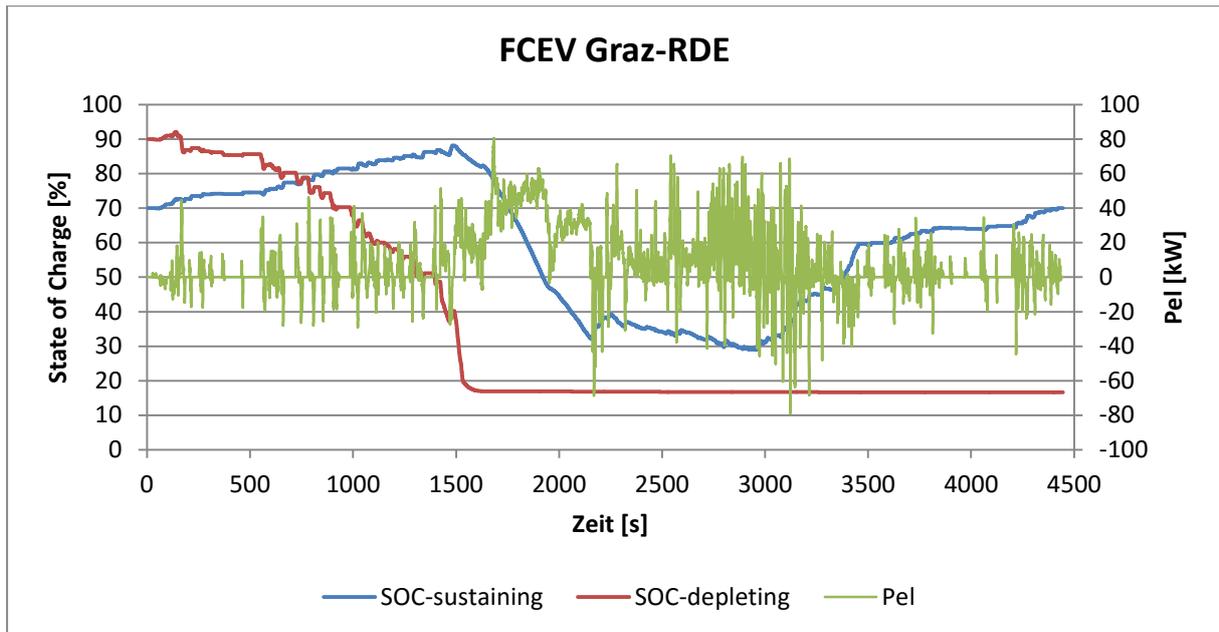


Abbildung 3.29: FCEV SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

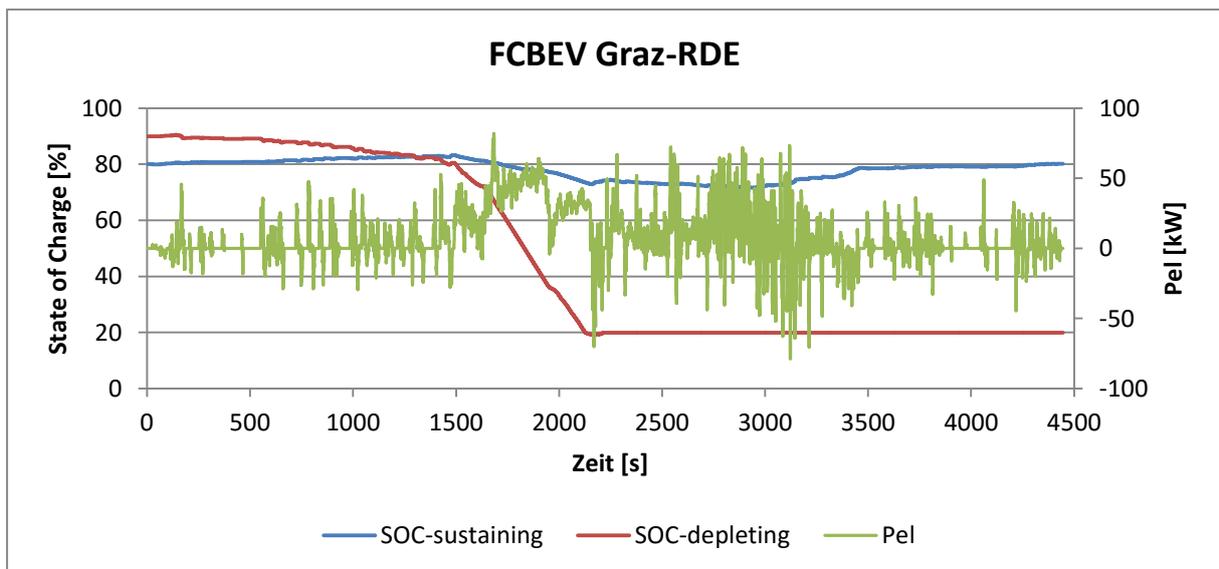


Abbildung 3.30: FCBEV SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

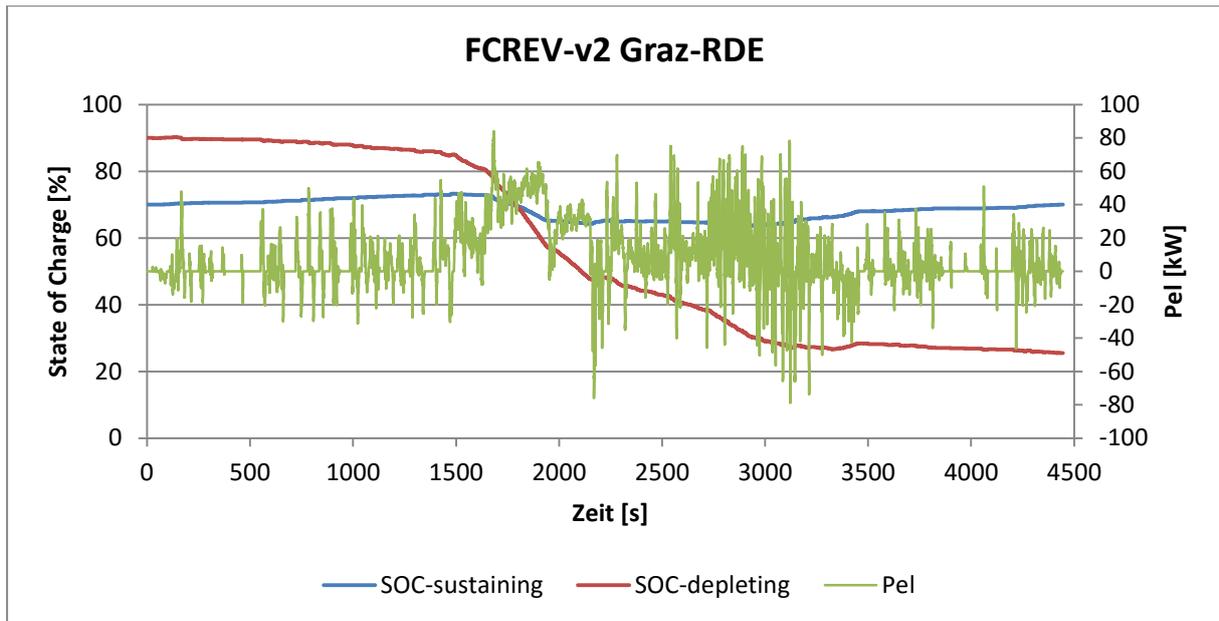


Abbildung 3.31: FCREV-v2 SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

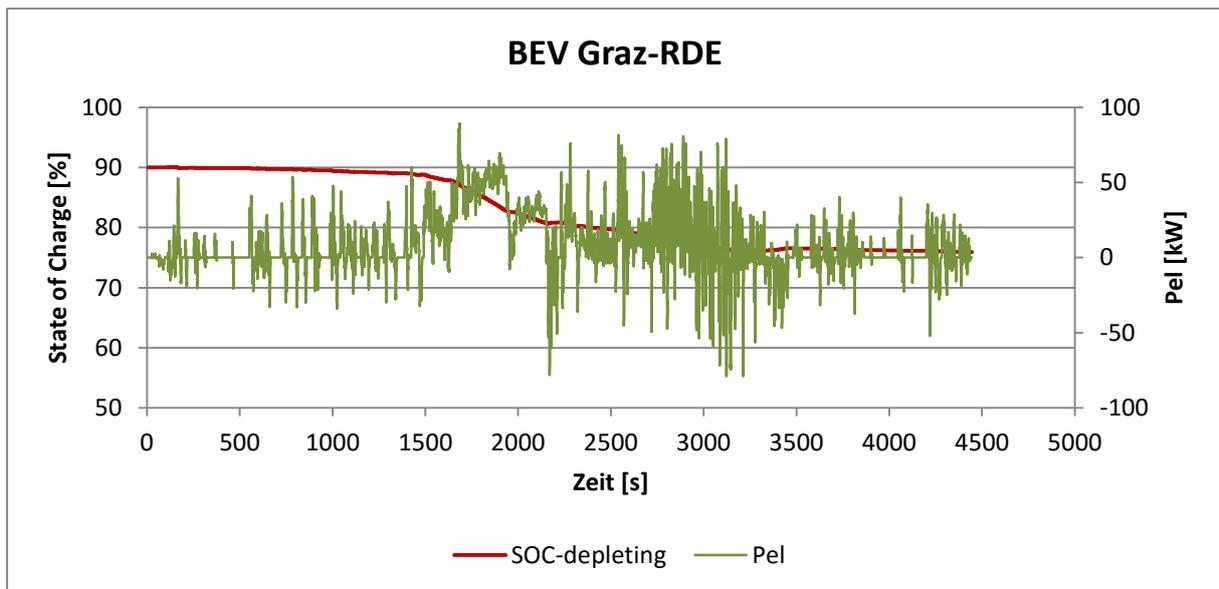


Abbildung 3.32: BEV SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

4 Kostenanalyse

Dieser Abschnitt der Masterarbeit befasst sich mit einer umfassenden Kostenanalyse der betrachteten Antriebsstränge. Wie in Kapitel 3 werden auch in diesem Kapitel drei verschiedene brennstoffzellen-batteriebetriebene Fahrzeuge und ein rein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug analysiert. Eine Übersicht über die Fahrzeuge ist in Tabelle 4.1 dargestellt; dabei wurden nur die bereits in der Simulation geänderten Antriebsstränge betrachtet. Um eine ganzheitliche Sicht auf die Kosten zu erlangen, wurden auch die Anschaffungskosten, die Betriebskosten und die Kosten für Wartung und Reparatur in Betracht gezogen.

Tabelle 4.1: Übersicht Fahrzeugdaten

	P_{FC}	C_{Bat}	P_{EM}	m_{H_2}
FCEV	100 kW	2 kWh	85 kW	4,5 kg
FCBEV	50 kW	8,8 kWh	85 kW	4,5 kg
FCREV-v2	35 kW	20 kWh	85 kW	4,5 kg
BEV	0 kW	80 kWh	85 kW	4,5 kg

4.1 Methodik der Kostenanalyse

Für die Berechnung der Gesamtkosten ist es nötig, die Antriebsstrangkosten sowie die Kosten für den Betrieb des Brennstoffzellenfahrzeugs und die Kosten für die Wartung und Reparatur zu ermitteln. Die Antriebsstrangkosten für ein Brennstoffzellenfahrzeug setzen sich zusammen aus den Kosten für das PEM-Brennstoffzellensystem, den Wasserstofftankkosten, den Batteriekosten und den Kosten für den Elektromotor mit DC/AC-Konverter. Die Betriebskosten hängen von den Kosten für den Wasserstoff und dem Wasserstoffverbrauch des Brennstoffzellenfahrzeugs ab. Die Reparatur- und Wartungskosten werden mit einem Fixpreis pro Kilometer berechnet. Zur Berechnung der Antriebsstrangkosten des batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs ist die Summe der Batteriekosten und der Kosten für den Elektromotor mit DC/AC-Konverter nötig. Die Betriebskosten werden mit den Ladekosten gleichgesetzt, bei denen die aktuellen Stromkosten und der Ladewirkungsgrad berücksichtigt wurden, die Reparatur- und Wartungskosten werden, gleich wie bei dem Brennstoffzellenfahrzeugen mit einem Fixpreis pro Kilometer berechnet.

Zur Datensammlung der verschiedenen Komponentenkosten, der Kosten für den Betrieb und der Wartungs- und Reparaturkosten wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt und die Daten für die vorliegende Analyse mit Berücksichtigung von Aktualität und Aussagekraft ausgewählt. Die Antriebsstrangkosten werden auf die genannten „Kernteile“ (Brennstoffzelle, Wasserstofftank, Batterie, Elektromotor) reduziert, da die Kostenanalyse aller im Fahrzeug befindlichen Teile sowie die Montagekosten den Rahmen der Masterarbeit sprengen würden und ein Vergleich mit den Kosten dieser „Kernteile“ möglich ist.

Um eine realitätsgetreue wirtschaftliche Betrachtung der Kosten zu ermöglichen, werden die Kosten der einzelnen Fahrzeuge für verschiedene Produktionsvolumen berechnet. Die betrachteten Produktionsvolumen sind 1000, 100 000 und 500 000 Fahrzeuge pro Jahr.

Wegen der Erfahrungskurve in der Produktion [19] werden die Kosten pro Fahrzeug mit steigenden Produktionsvolumen kleiner.

Formel (4.1) gibt die Berechnung der Gesamtkosten, diese auch als „Total Cost of Ownership“ oder kurz TCO bezeichnet werden, für die verschiedenen Brennstoffzellenfahrzeuge und das batteriebetriebene Fahrzeug an. Diese sind die Summe aus den Antriebsstrangkosten und den Betriebskosten.

$$TCO = K_{PT} + K_{op} \quad (4.1)$$

$$K_{PT} = K_{H2-Tank} + k_{FC}P_{FC} + k_{EM}P_{EM} + k_{Bat}C_{Bat} \quad (4.2)$$

$$K_{FC_op_life} = (k_{FCEV_M\&R} + k_{H2}b_{e,H2})S_{life} \quad (4.3)$$

$$K_{FC_op_year} = (k_{FCEV_M\&R} + k_{H2}b_{e,H2})S_{year} \quad (4.4)$$

$$K_{BEV_op_life} = C_{bat}k_{power}n_{life} \frac{1}{\eta} + k_{BEV_M\&R}S_{life} \quad (4.5)$$

$$K_{BEV_op_year} = C_{bat}k_{power}n_{year} \frac{1}{\eta} + k_{BEV_M\&R}S_{year} \quad (4.6)$$

$$n_{life} = \frac{S_{life}}{S_{BEV}} \quad (4.7)$$

$$n_{year} = \frac{S_{year}}{S_{BEV}} \quad (4.8)$$

Die Antriebsstrangkosten setzen sich laut Formel (4.2) zusammen. Diese Kosten sind die Kosten für den Wasserstofftank $K_{H2-Tank}$, die leistungsspezifischen Brennstoffzellensystemkosten k_{FC} multipliziert mit der Leistung des Brennstoffzellensystems P_{FC} , die leistungsspezifischen Elektromotorkosten k_{EM} multipliziert mit der Leistung des Elektromotors P_{EM} und die kapazitätsspezifischen Batteriekosten k_{Bat} multipliziert mit der Kapazität der Batterie C_{Bat} . Bei der Kostenberechnung des batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs fallen die Kosten für den Wasserstofftank und das Brennstoffzellensystem weg.

Für den vollständigen Kostenvergleich ist die Miteinbeziehung der Betriebskosten $K_{FC_op_life}$ bzw. $K_{BEV_op_life}$ notwendig. Diese berechnen sich für ein Brennstoffzellenfahrzeug laut Formel (4.3). Die Betriebskosten über die Lebenszeit des Brennstoffzellenfahrzeugs $K_{FC_op_life}$ sind die Summe aus den Wartungs- und Reparaturkosten pro Kilometer $k_{FCEV_M\&R}$ und den Wasserstoffkosten k_{H2} mal dem Wasserstoffverbrauch pro Kilometer $b_{e,H2}$ multipliziert mit der in der Lebenszeit des Fahrzeugs zurückgelegten Strecke S_{life} , welche mit 180 000 km angenommen wurde. Für die Betriebskosten pro Jahr wird diese Summe anstatt der

Lebenszeitstrecke mit der zurückgelegten Strecke pro Jahr S_{year} multipliziert, siehe Formel (4.4). Als Lebenszeit werden sechs Jahre mit einer Jahresstrecke von 30 000 km angenommen.

Die Betriebskosten für das Elektrofahrzeug $K_{BEV_op_life}$ berechnen sich für die Lebenszeit des Fahrzeugs nach Formel (4.5) und pro Jahr nach Formel (4.6). Die Batteriekapazität C_{Bat} wird mit dem Strompreis pro Kilowattstunde k_{power} , der Anzahl der Ladezyklen in der Lebenszeit n_{life} bzw. pro Jahr n_{year} und dem Kehrwert des Ladewirkungsgrades η multipliziert; dazu wird noch das Produkt der Wartungs- und Reparaturkosten $k_{BEV_M\&R}$ und der Strecke pro Lebenszeit S_{life} bzw. pro Jahr S_{year} addiert. Die Anzahl der Ladezyklen pro Jahr n_{year} bzw. pro Lebenszeit n_{life} werden nach den Formeln (4.7) und (4.8) berechnet. Die Anzahl ergibt sich aus dem Quotienten der Reichweite des Elektrofahrzeugs S_{BEV} durch die Strecke für die gesamte Lebenszeit S_{life} bzw. der Strecke pro Jahr S_{year} . S_{BEV} wurde durch die Simulation bestimmt.

4.2 Kosten für das PEM-Brennstoffzellensystem

Der leistungsspezifische Kilowattpreis eines Brennstoffzellensystems wurde durch eine Betrachtung von drei unterschiedlichen aussagekräftigen Publikationen bestimmt. Eine Kostenanalyse eines PEM-Brennstoffzellensystems von 2005 [20] des National Renewable Laboratory in Massachusetts besagt, dass ein 80 kW PEM-Brennstoffzellensystem bei einem Produktionsvolumen von 500 000 Stück pro Jahr 108 \$/kW (99,03 €/kW) kostet. Der Brennstoffzellenstack ohne Nebenaggregate kostet 67 \$/kW (61,43 €/kW) und die Nebenaggregate kosten 41 \$/kW (37,6 €/kW).

Eine Publikation von McKinsey&Company aus dem Jahr 2010 [21] befasst sich mit den Antriebsstrangkosten von Brennstoffzellenfahrzeugen und batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen. Der leistungsspezifische Brennstoffzellenstackpreis ist für ein Produktionsvolumen von 1000 Stück pro Jahr mit 500 €/kW, für 100 000 Stück pro Jahr mit 110 €/kW und für 1 000 000 Stück pro Jahr mit 43 €/kW angegeben, siehe Anhang Tabelle 0.3 und Abbildung 0.13. Die Kosten für den Brennstoffzellenstack ohne die Nebenaggregate machen 52,6 % des Gesamtpreises des Brennstoffzellensystems aus, d.h. die Kosten für das gesamte Brennstoffzellensystem belaufen sich auf 950,57 €/kW, 209,13 €/kW und 81,75 €/kW für die Produktionsvolumen von 1000, 100 000 und 1 000 000 Stück pro Jahr.

Die Daten, welche für die Berechnung verwendet wurden, stammen von einer Publikation des Department of Energy „Fuel Cell System Cost – 2014“. Diese wurde gewählt, da sie zeitlich die aktuellsten Werte beinhaltet und diese Daten von namhaften Autoren stammen. In Tabelle 4.2 sind die für die Kostenberechnung verwendeten Daten aufgelistet und in Abbildung 4.1 sind die Brennstoffzellenstack- und Brennstoffzellensystemkosten über die Produktionsvolumen dargestellt.

Tabelle 4.2: Brennstoffzellenkosten [22]

PEM Brennstoffzellenkosten						
Produktionsvolumen	1000	10000	30000	80000	100000	500000
Stackkosten	185,39€/kW	54,53€/kW	40,35€/kW	34,90€/kW	32,69€/kW	26,45€/kW
Systemkosten	299,89€/kW	117,78€/kW	89,42€/kW	74,15€/kW	70,82€/kW	59,76€/kW

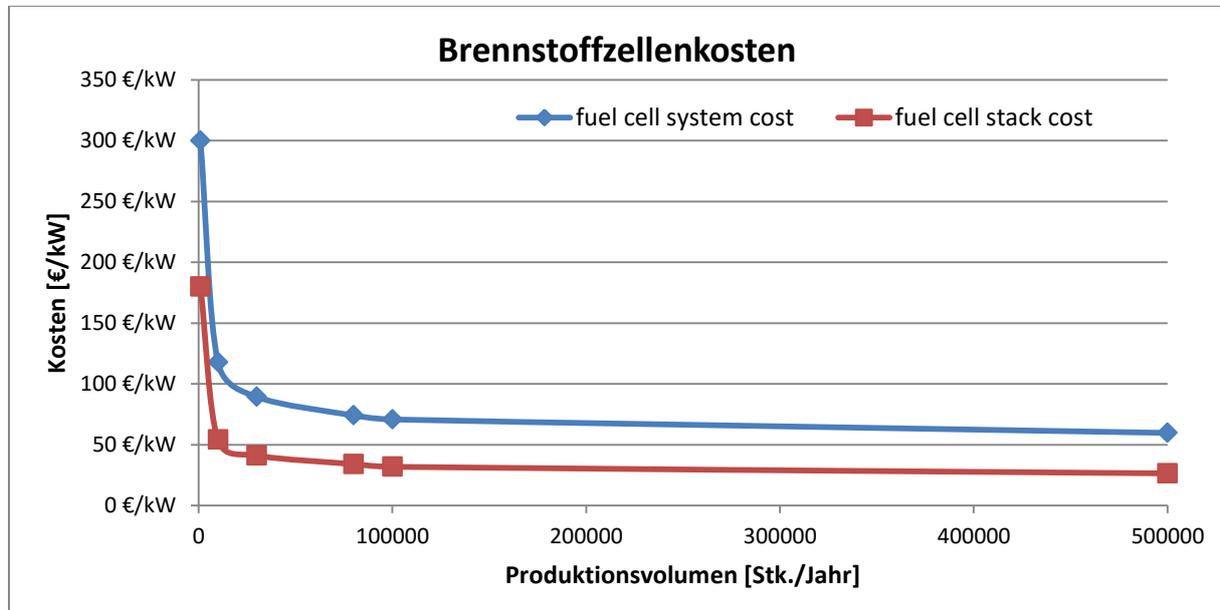


Abbildung 4.1: Brennstoffzellenstack-, Brennstoffzellensystemkosten [22]

4.3 Kosten für den Wasserstofftank

Es wurde ein Wasserstofftank, welcher bei einem Druck von 700 bar eine Wasserstoffmenge von ca. 4.5 kg speichern kann, verwendet. Die Kostenschätzung des Wasserstofftanks basiert auf Annahmen und Erfahrung von AVL-Experten. Dabei wurden die Kosten eines einzelnen Tanks auf 15 000 € geschätzt und bei einer Produktionsmenge von 50 000 Stück pro Jahr belaufen sich die Kosten auf ca. 2 800 €. Um auf die Kosten für beliebige Produktionsvolumen zu kommen, wurde eine lineare Funktion mit den zwei bekannten Punkten in einem Koordinatensystem mit logarithmischer x- und y-Achsenkalierung gebildet, da diese Funktion die Kostenfunktion über das Produktionsvolumen, mit Einbeziehung der Produktionserfahrungskurve [19], näherungsweise darstellt. Formel (4.9) beschreibt die Ausgangsfunktion und durch Einsetzen der zwei bekannten Punkte wurde Formel (4.10) berechnet. x gibt das Produktionsvolumen an, k und d sind Konstanten.

$$\log(K_{H_2\text{-tank}}) = \log(x) k + d \quad (4.9)$$

$$K_{H_2\text{-tank}} = x^{(-0,149538)} 10^{4,1760912} \quad (4.10)$$

In Abbildung 4.2 wird die lineare Funktion in einer doppelt-logarithmischen Skalierung dargestellt.

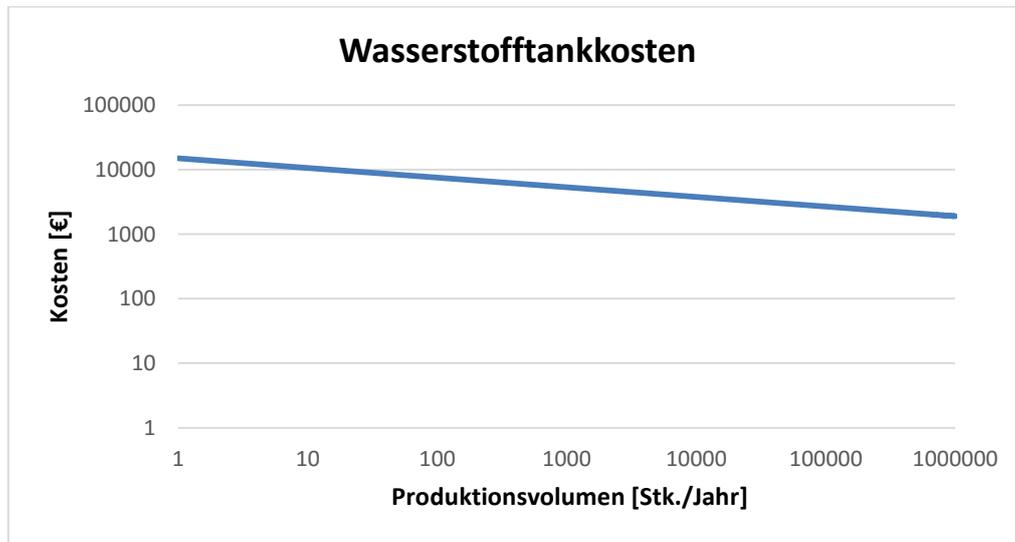


Abbildung 4.2: Wasserstofftankkostenfunktion mit doppelt-logarithmischer Skalierung

Abbildung 4.3 stellt die berechnete Funktion in (4.10) grafisch dar.

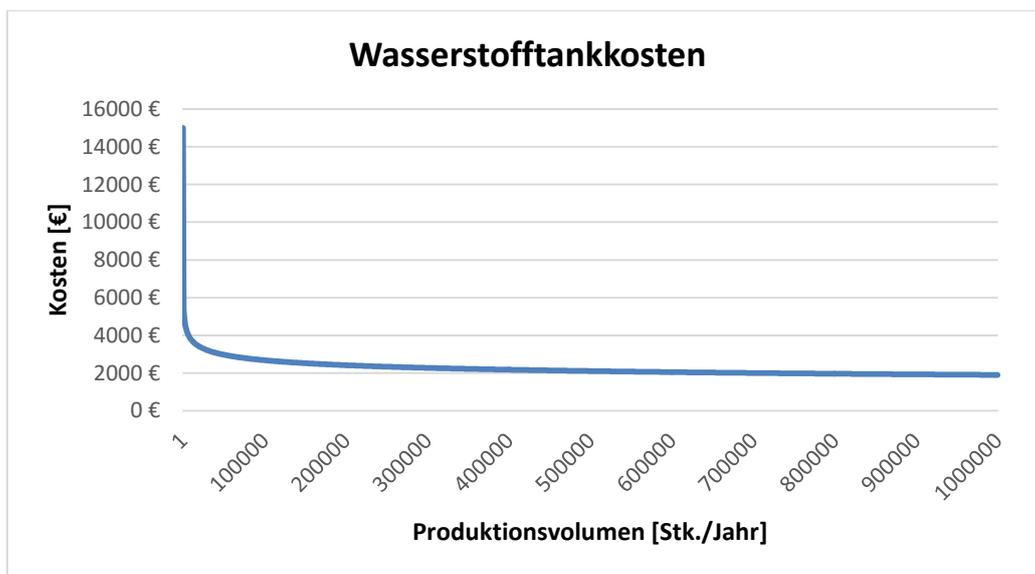


Abbildung 4.3: Wasserstofftankkosten

4.4 Kosten der Lithium-Ionen-Batterie

Die Werte für die kapazitätsspezifischen Batteriepreise unterscheiden sich zwischen den unterschiedlichen Literaturquellen sehr stark. In einer Publikation von McKinsey&Company [21] werden die Batteriepreise für das Jahr 2015 mit 275-750 €/kWh angegeben. Eine Dissertation von der RWTH Aachen [1] beziffert den Batteriepreis auf 400-600 €/kWh.

Für die Kostenberechnung wurden Informationen über den Batteriepreis aus firmeninternen Quellen verwendet, da diese der aktuellen Situation entsprechen. Diese besagen, dass sich der derzeitige kapazitätsspezifische Preis zwischen 170 €/kWh und 230 €/kWh bewegt. Da für die Kostenanalyse der Brennstoffzellenfahrzeuge und des Elektrofahrzeugs die Kosten über dem

Produktionsvolumen nötig sind, wurde der kapazitätsspezifische Preis der Batterie für niedrige, mittlere und hohe Produktionsvolumen definiert.

Für niedrige Produktionsvolumen mit ca. 1 000 Fahrzeugen pro Jahr wurde der Batteriepreis auf 230 €/kWh festgelegt, für mittlere Produktionsvolumen (ca. 100 000 Fahrzeuge pro Jahr) wurde mit 200 €/kWh gerechnet und für hohe Produktionsvolumen mit ca. 500 000 Fahrzeuge pro Jahr wurden die Kosten von 170 €/kWh verwendet, siehe Tabelle 4.3 und Abbildung 4.4.

Tabelle 4.3: Kapazitätsspezifische Batteriekosten

Batteriekosten			
Produktionsvolumen	1 000	100 000	500 000
Kosten	230 €/kWh	200 €/kWh	170 €/kWh

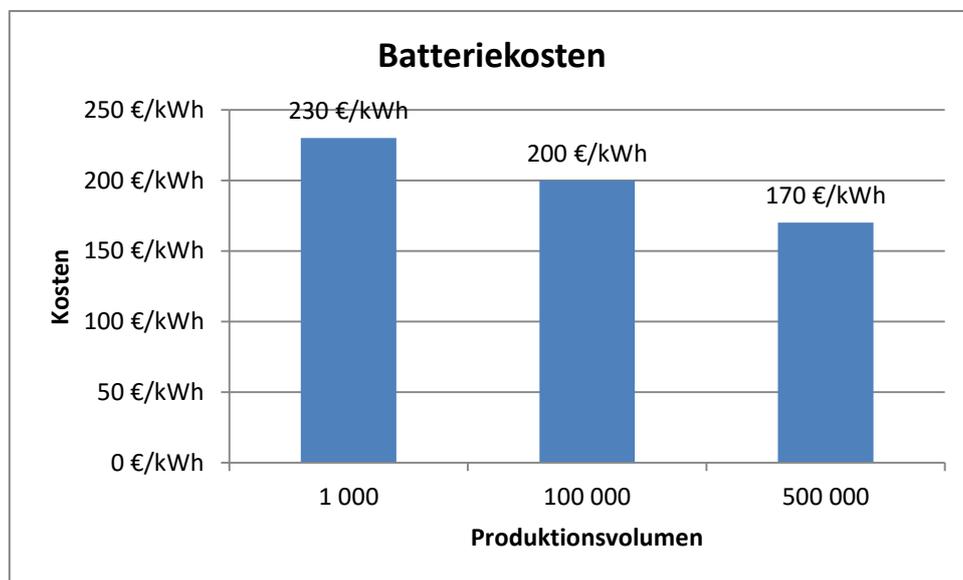


Abbildung 4.4: Kapazitätsspezifische Batteriekosten abhängig Produktionsvolumen

Die verwendeten Kosten für die Lithium-Ionen-Batterie sind für das Jahr 2015 gültig. Ab 2020 ist mit einem starken Preisverfall zu rechnen, da das Unternehmen Tesla Motors, Inc. eine Batterieproduktionsstätte in den USA plant, welche Batterien im Umfang von 3,5 GWh Batteriekapazität pro Jahr herstellt. Es wird mit Preisen von 92-138 €/kWh gerechnet [23].

4.5 Kosten für den Elektromotor

In der Kostenanalyse von alternativen Antrieben [24] wurde eine Kostenentwicklung von Elektromotoren erarbeitet. Diese gibt den leistungsspezifischen Preis vom Jahr 2008 bis 2045 an und ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

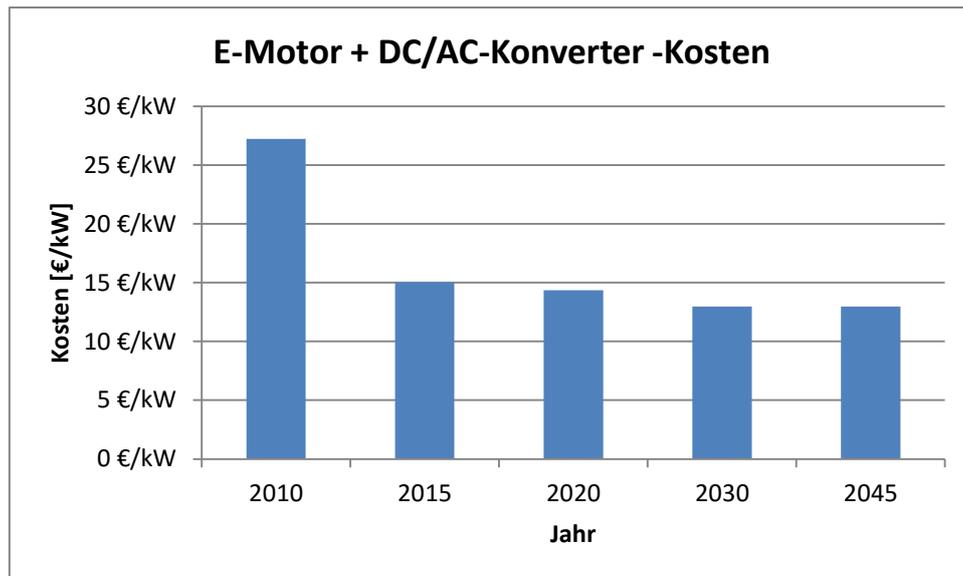


Abbildung 4.5: Kostenentwicklung des Elektromotors

Für die Kostenanalyse des gesamten Antriebsstranges ist eine Preisfunktion über die Produktionsmenge nötig. Um diese Funktion zu errechnen, wurde wie in Kapitel 4.3 die Kostenfunktion über die Produktionsmenge auf Basis der Erfahrungskurve in der Produktion erstellt. Als Ausgangsfunktion gilt (4.11).

$$\log(k_{EM}) = \log(x) k + d \quad (4.11)$$

x gibt das Produktionsvolumen an. Um die Konstanten k und d zu berechnen, werden zwei Punkte der Funktion benötigt. In [24] wird der Preis des Elektromotors nur pro Jahr angegeben und nicht für die jeweiligen Produktionsvolumen. Aus [25] wurde ermittelt, wie viel Fahrzeuge mit Elektroantrieb in den Jahren 2010 und 2015 zugelassen wurden und damit auf das Produktionsvolumen der Elektromotoren geschlossen. Der leistungsspezifische Preis des Elektromotors inkludiert auch die Kosten des DC/AC-Konverters. Tabelle 4.4 zeigt die beiden Punkte, auf Basis deren die Kostenfunktion über das Produktionsvolumen für den Elektromotor mit dem DC/AC-Konverter erstellt wurde.

Tabelle 4.4: Kosten Elektromotor inkl. DC/AC Konverter

Jahr	2010	2015
Neuzulassungen	7145 #	320 000 #
E-Motor + DC/AC-Konverter-Kosten	27,24 €/kW	15,04 €/kW

$$k_{EM} = x^{-0,156} 10^{2,036} \quad (4.12)$$

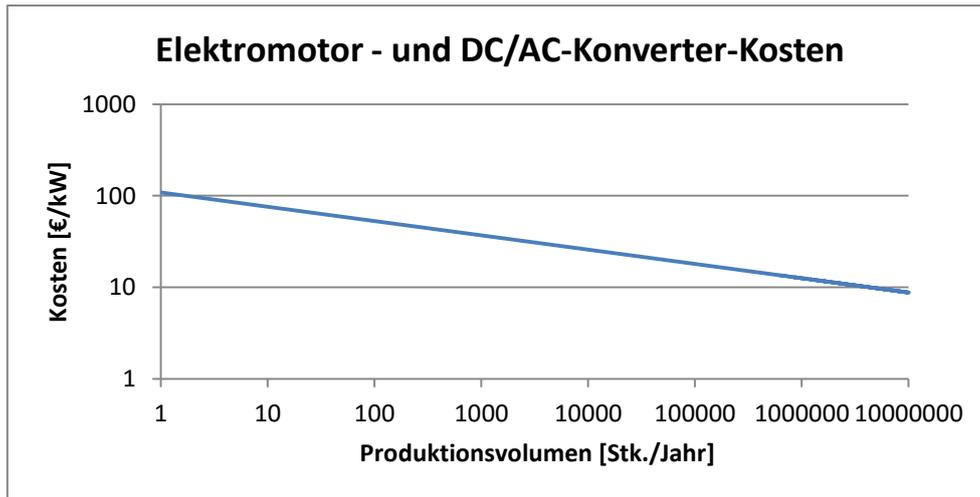


Abbildung 4.6: Kostenfunktion Elektromotor+DC/AC Konverter doppelt-logarithmische Achsenskalierung

Die Funktion (4.12) gibt die Kostenfunktion an und wird in Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 über dem Produktionsvolumen dargestellt. Abbildung 4.6 zeigt die Kostenfunktion in einer doppelt-logarithmischen Achsenskalierung. In Abbildung 4.7 ist die Kostenfunktion des Elektromotors mit DC/AC-Konverter mit linearer Skalierung dargestellt.

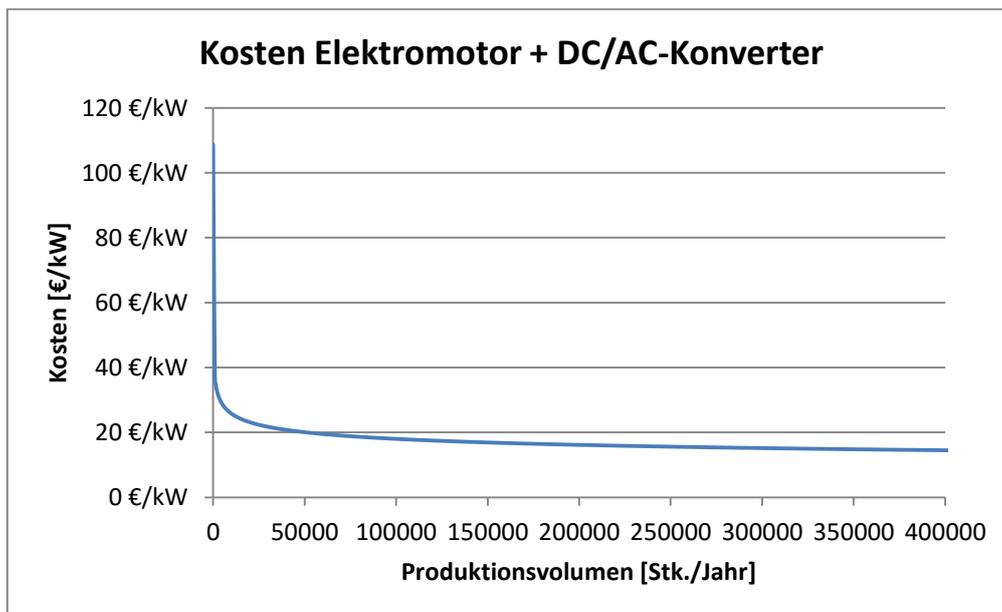


Abbildung 4.7: Kostenfunktion Elektromotor+DC/AC-Konverter

4.6 Resultate und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Kostenanalyse dargestellt und am Ende miteinander verglichen. In Tabelle 4.5 - Tabelle 4.7 sind die Gesamtkosten der Brennstoffzellenfahrzeuge aufgelistet. Diese enthalten die Kosten für den Wasserstofftank, die Kosten für die Brennstoffzelle, die Kosten für den Elektromotor, die Batteriekosten und die Betriebskosten über die Lebenszeit. Tabelle 4.8 stellt die Gesamtkosten des batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs dar.

Tabelle 4.5: Gesamtkosten FCEV (PFC=100kW, CBat=2,1kWh, Pmotor=85kW)

FCEV			
Produktionsvolumen [Stk./Jahr]	1 000	100 000	500 000
$K_{H2-Tank}$	5 339 €	2 800 €	2 108 €
K_{FC}	29 963 €	7 082 €	5 976 €
K_{EM}	855 €	852 €	840 €
K_{bat}	460 €	400 €	340 €
K_{op}	32 733 €	32 733 €	32 733 €
TCO	69 350 €	43 867 €	41 997 €

Tabelle 4.6: Gesamtkosten FCBHV (PFC=50kW, CBat=8,8kWh, Pmotor = 85kW)

FCBHV			
Produktionsvolumen [Stk./Jahr]	1 000	100 000	500 000
$K_{H2-Tank}$	5 339 €	2 800 €	2 108 €
K_{FC}	14 982 €	3 541 €	2 988 €
K_{EM}	855 €	852 €	840 €
K_{bat}	2 024 €	1 760 €	1 496 €
K_{op}	32 377 €	32 377 €	32 377 €
TCO	55 576 €	41 329 €	39 808 €

Tabelle 4.7: Gesamtkosten FCREV-v2 (PFC=35 kWh, CBat=20kWh, Pmotor=85kW)

FCREV-v2			
Produktionsvolumen [Stk./Jahr]	1 000	100 000	500 000
$K_{H2-Tank}$	5 339 €	2 800 €	2 108 €
K_{FC}	10 487 €	2 479 €	2 092 €
K_{EM}	855 €	852 €	840 €
K_{bat}	4 600 €	4 000 €	3 400 €
K_{op}	36 653 €	36 653 €	36 653 €
TCO	57 934 €	46 784 €	45 093 €

Tabelle 4.8: Gesamtkosten BEV (PFC=0, CBat=80kWh, Pmotor=85kW)

BEV			
Produktionsvolumen [Stk./Jahr]	1 000	100 000	500 000
$K_{H2-Tank}$	0 €	0 €	0 €
K_{FC}	0 €	0 €	0 €
K_{EM}	855 €	852 €	840 €
K_{bat}	18 400 €	16 000 €	13 600 €
K_{op}	20 865 €	20 865 €	20 865 €
TCO	40 120 €	37 717 €	35 305 €

Tabelle 4.9 und Tabelle 4.10 beinhalten die Ergebnisse der Betriebskostenberechnung mit den Gleichungen aus Kapitel 4.1. Die Wasserstoffkosten wurden aus [21] entnommen. Diese repräsentieren den Wasserstoffpreis für eine gemischte Herstellung.

Tabelle 4.9: Betriebskosten Brennstoffzellenfahrzeuge

Betriebskosten Brennstoffzellenfahrzeuge [€/km]			
	FCEV	FCHBV	FCREV
$b_{e,H2}$	0,0115 kg/km	0,0113 kg/km	0,0137 kg/km
$k_{FCEV_M\&R}$	0,068 €/km	0,068 €/km	0,068 €/km
k_{H2}	9,9 €/kg	9,9 €/kg	9,9 €/kg
S_{year}	30000 km	30000 km	30000 km
S_{life}	180000 km	180000 km	180000 km
$K_{op/year}$	5455,5 €	5396,1 €	6108,9 €
K_{op}	32 733 €	32 376,6 €	36 653,4 €

Tabelle 4.10: Betriebskosten BEV

Betriebskosten BEV [€/km]	
	BEV
C_{Bat}	80 kWh
Reichweite	279,51 km
S_{year}	30000 km
n_{year}	107,33
S_{life}	180000 km
n_{life}	643,98
$k_{BEV_M\&R}$	0,057 €/km
k_{Strom}	0,1795 €/kWh
η	0,872
$K_{op/year}$	3 477,51 €
K_{op}	20 865 €

Abbildung 4.8 zeigt den Antriebsstrangkostenvergleich der unterschiedlichen Fahrzeuge. Bei geringen Produktionsvolumen fällt auf, dass die Brennstoffzellenantriebsstränge teurer sind als der Antriebsstrang des reinen Elektrofahrzeugs, mit höheren Produktionsvolumen ändert sich dies jedoch. Das ist auf den hohen Preisverfall der Brennstoffzelle zurückzuführen. Bei hohen Produktionsvolumen hat der Antriebsstrang des FCBEV die geringsten Kosten.

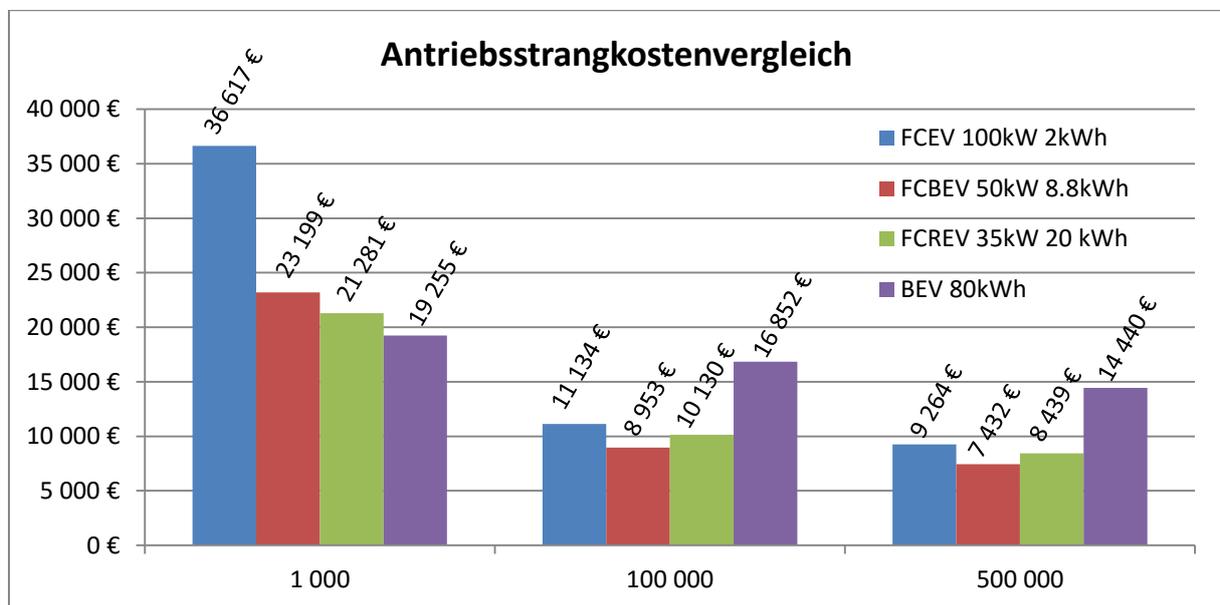


Abbildung 4.8: Vergleich der Antriebsstrangkosten

Abbildung 4.9 stellt den Vergleich der Betriebskosten über die gesamte Lebenszeit des Fahrzeugs dar. Die niedrigsten Betriebskosten hat das batteriebetriebene Elektrofahrzeug mit 20 865 €. Dies ist jedoch stark von der Entwicklung des Strompreises abhängig. Die höchsten Betriebskosten hat das FCREV mit 36 653 €, da dieser Antriebsstrang die höchsten Verbrauchswerte hat.

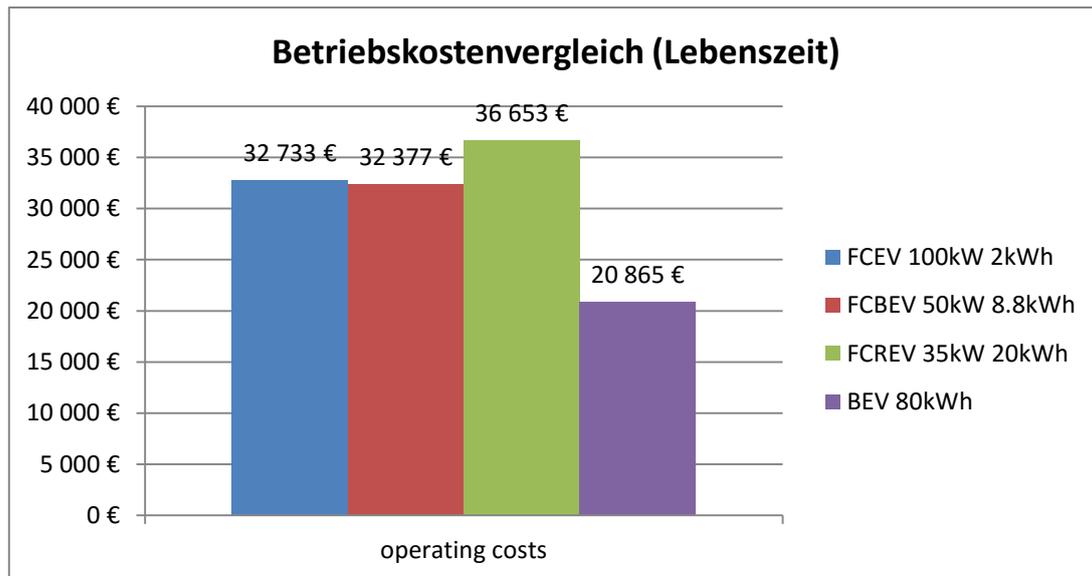


Abbildung 4.9: Vergleich der Betriebskosten über die Lebenszeit des Fahrzeugs

Beim Gesamtkostenvergleich in Abbildung 4.10 ist auffällig, dass das batteriebetriebene Elektrofahrzeug die geringsten Gesamtkosten mit allen Produktionsvolumen aufweist. Dies ist auf die relativ niedrigen Betriebskosten des BEV zurückzuführen. Die geringsten Gesamtkosten der Brennstoffzellenantriebe hat das FCBEV. Die höchsten Gesamtkosten hat bei höheren Produktionsvolumen das FCREV.

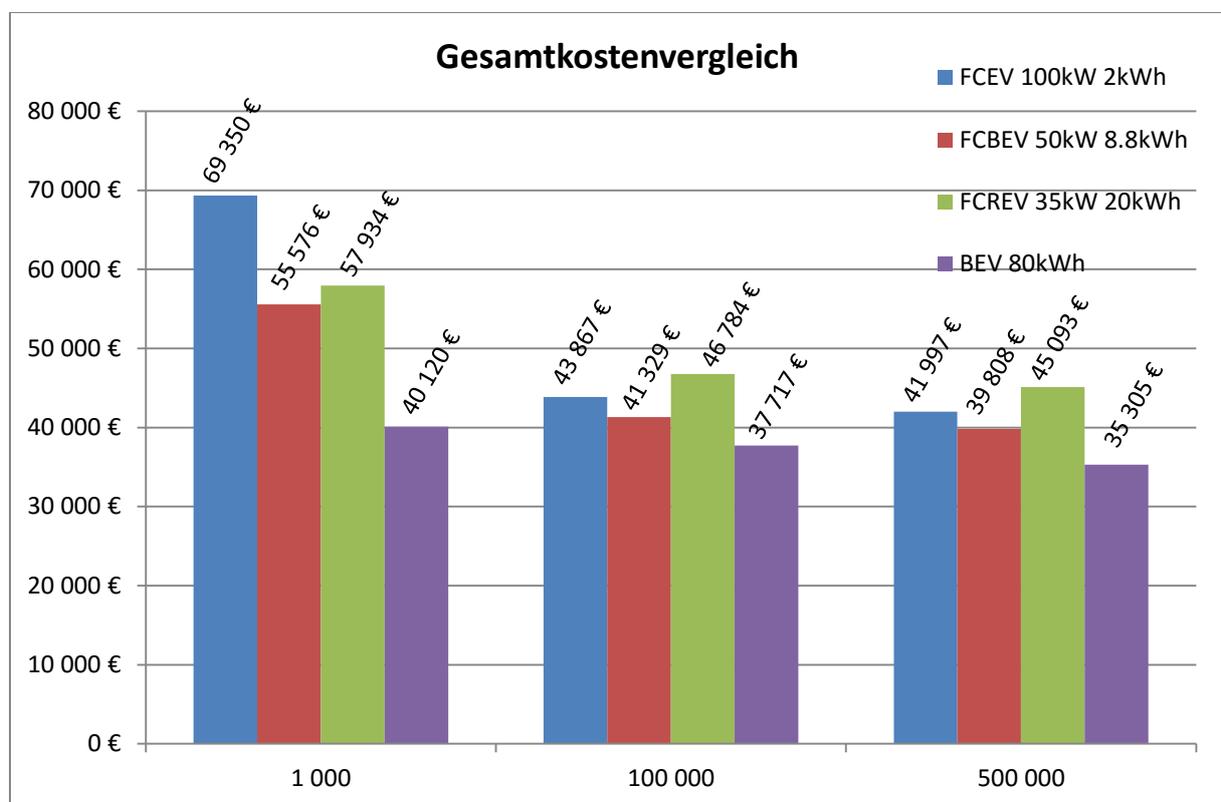


Abbildung 4.10: Gesamtkostenvergleich

5 Optimierung des Antriebsstranges

Mit Hilfe der Ergebnisse der Längsdynamiksimulation und der Kostenanalyse der definierten PEM-Brennstoffzellenantriebsstränge und des batteriebetriebenen Antriebsstranges wird versucht, den Antriebsstrang bezüglich verschiedener Kriterien zu optimieren. Es wird die geeignetste Kombination aus Brennstoffzellenleistung und Batteriekapazität ermittelt, um die unterschiedlichen Anforderungen am besten zu erfüllen. Dafür werden, neben den in dieser Masterarbeit bereits untersuchten und analysierten Antriebssträngen, mehrere unterschiedliche Kombinationen von Brennstoffzellen und Batterien begutachtet. Die Verbrauchs- und Reichweitendaten werden ausschließlich aus dem Graz-RDE-Fahrzyklus berechnet, da dieser die realitätsgetreueren Ergebnisse bringt. Auf den NEDC-, den WLTC- und den Großglockner-Fahrzyklus wird verzichtet. Die Leistungsdaten werden durch den Performance-, den Elasticity- und den Top Speed-Fahrzyklus ermittelt. Für den Kostenvergleich werden die Antriebsstrangkosten für ein Produktionsvolumen von 100 000 Stück pro Jahr berechnet.

Durch die Erstellung einer Nutzwertanalyse wird eine optimierte Version des Antriebsstrangs ermittelt. Des Weiteren werden noch für jedes Optimierungskriterium die beste Lösung bestimmt.

5.1 Untersuchte Antriebsstränge

Für die Nutzwertanalyse werden sämtliche Kombinationen mit den folgenden Brennstoffzellenleistungen und Batteriegrößen untersucht. In Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 sind die für die Brennstoffzelle-/Batteriekombinationen verwendeten Leistungen und Kapazitäten aufgelistet.

Tabelle 5.1: PEM-Brennstoffzellenstackleistungen

PEM Brennstoffzellenstackleistung
35 kW
50 kW
70 kW
90 kW
100 kW

Tabelle 5.2: Batteriekapazitäten

Batteriekapazitäten
2,1 kWh
4,1 kWh
8,8 kWh
15,8 kWh
20 kWh
77,4 kWh

Für diese jeweils fünf Brennstoffzellenleistungen und fünf Batterien werden sämtliche Kombinationen simuliert und analysiert. Tabelle 5.3 zeigt die Batteriesysteme, welche wiederum mit der Sanyo UF121285-Batterie gebildet werden. Die Berechnungsmethodik der Batteriesysteme ist in Kapitel 3.1.3.1 erläutert. Die nach dieser Methodik ausgelegten Batteriesysteme wurden, wie in Kapitel 3.1.3.1, für das Fahrzeugmodell parametrisiert.

Die jeweiligen Fahrzeugmassen werden laut Kapitel 3.1.3.4 bestimmt. Die k-Faktoren müssen für die Reichweiten- und Verbrauchsbestimmung für jeden einzelnen Antriebsstrang neu kalibriert werden; die Konfigurationen befinden sich im Anhang in Tabelle 0.4.

Tabelle 5.3: Batterieparametrisierung

Kapazität (C_{Bat})	Spannung (U_{Bat})	Ladung (Q_{Bat})	Zellen parallel pro Modul (n)	Module in Serie (m)	Gesamtzellenzahl (z)
2,1 kWh	47,71 V	43,00Ah	2	13	26
4,1 kWh	190,84 V	21,50Ah	1	52	52
8,8 kWh	407,37 V	21,50Ah	1	111	111
15,8 kWh	367 V	43,00Ah	2	100	200
20,0 kWh	466,09 V	43,00Ah	2	127	254
77,4 kWh	400,03 V	193,50Ah	9	109	981

5.2 Nutzwertanalyse

Nach der Längsdynamiksimulation und der Kostenanalyse werden die Resultate in einer Tabelle zusammengefasst und anhand einer Nutzwertanalyse bewertet. Für die Punktevergabe in der Nutzwertanalyse werden Bewertungsschlüssel für die Vergabe von 1 bis 5 Punkte definiert (siehe Tabelle 5.4 bis Tabelle 5.8) wobei die Punktezahl 1 als schlechteste Bewertung und die Punktezahl 5 als beste Bewertung gilt. Für die Berechnung des Nutzwertes des jeweiligen Antriebsstranges wurden die einzelnen Optimierungskriterien gewichtet. Die Gewichtung wird in Tabelle 5.9 dargestellt.

Tabelle 5.4: Bewertungsschlüssel Beschleunigung

0-100 km/h		
von	bis	Punkte
	11 s	5
11 s	11,4 s	4
11,5 s	11,9 s	3
12 s	12,5 s	2
12,5 s		1

Tabelle 5.5: Bewertungsschlüssel Verbrauch

Verbrauch/100 km		
von	bis	Punkte
	1 kg	5
1 kg	1,15 kg	4
1,16 kg	1,2 kg	3
1,21 kg	1,25 kg	2
1,25 kg		1

Tabelle 5.6: Bewertungsschlüssel Elastizität

80-120 km/h		
von	bis	Punkte
	9 s	5
9 s	9,4 s	4
9,5 s	9,9 s	3
10 s	10,5 s	2
10,5 s		1

Tabelle 5.7: Bewertungsschlüssel Reichweite

Reichweite		
von	bis	Punkte
	480 km	5
480 km	450 km	4
450 km	420 km	3
420 km	390 km	2
390 km		1

Tabelle 5.8: Bewertungsschlüssel Kosten

Antriebsstrangkosten		
von	bis	Punkte
	8 000 €	5
8 000 €	9 500 €	4
9 500 €	11 000 €	3
11 000 €	12 500 €	2
12 500 €		1

Tabelle 5.9: Gewichtungstabelle

Gewichtung	
Gewichtung	1-5
Beschleunigung	3
Elastizität	2
Verbrauch	4
Reichweite	4
Kosten	5

Tabelle 5.10 zeigt die Resultate der Längsdynamiksimulation und der Kostenanalyse. Als Kostenvergleich werden die Kosten des Antriebsstranges für 100 000 produzierte Stück pro Jahr genommen, da dieses Produktionsvolumen für eine Markteinführung realistisch ist. Die Verbrauchs- und Reichweitenwerte werden auf Basis des Graz-RDE-Fahrzyklus bestimmt. Tabelle 5.11 zeigt die Bewertung der Antriebsstränge mit einer Nutzwertanalyse. Für die mit „-“ markierten Felder, bzw. in der Nutzwertanalyse mit „0“ bewertet, waren keine Ergebnisse vorhanden, da die Simulation nicht möglich war, weil für die 2,1 kWh-Batterie eine größere Brennstoffzelle notwendig ist.

Tabelle 5.10: Resultate

Batterie	Brennstoffzelle	Masse	0-100 km/h	80-120 km/h	Verbrauch/100 km Graz-RDE	Reichweite Graz-RDE	Antriebsstrangkosten (100 000 Stk./Jahr)
4,1 kWh	50 kW	1460 kg	11,8 s	9,4 s	0,94 kg	495,41 km	8 012,5 €
8,8 kWh	50 kW	1518 kg	12,2	9,8 s	0,96 kg	499,62 km	8 952,5 €
15,8 kWh	50 kW	1550 kg	11,8 s	9,2 s	1,08 kg	468,56 km	10 352,5 €
20 kWh	50 kW	1600 kg	12 s	9,4 s	1,1 kg	477,01 km	11 192,5 €
2,1 kWh	100 kW	1480 kg	11,2	8,6 s	1,15 kg	399,76 km	11 133,5 €
4,1 kWh	70 kW	1480 kg	11,6 s	9,2 s	1,07 kg	438,01 km	9 428,9 €
4,1 kWh	90 kW	1500 kg	11,6 s	9 s	1,08 kg	434,65 km	10 845,3 €
4,1 kWh	100 kW	1510 kg	11,6 s	9,2 s	1,07 kg	436,58 km	11 553,5 €
8,8 kWh	70 kW	1538 kg	12,2 s	9,8 s	1,08 kg	444,83 km	10 368,9 €
8,8 kWh	90 kW	1558 kg	12,2 s	9,6 s	1,08 kg	446,65 km	11 785,3 €
8,8 kWh	100 kW	1568 kg	12,2 s	9,8 s	1,09 kg	443,36 km	12 493,5 €
20 kWh	70 kW	1620 kg	12,2 s	9,4 s	1,24 kg	430,37 km	12 608,9 €
2,1 kWh	90 kW	1470 kg	11,4 s	8,6 s	1,22 kg	379,61 km	10 425,3 €
15,8 kWh	90 kW	1590 kg	12 s	9,4 s	1,22 kg	421 km	13 185,3 €
15,8 kWh	100 kW	1600 kg	12 s	9,4 s	1,21 kg	423,6 km	13 893,5 €
15,8 kWh	70 kW	1570 kg	11,8 s	9,2 s	1,23 kg	418,92 km	11 768,9 €
20 kWh	90 kW	1640 kg	12,2 s	9,6 s	1,24 kg	430,06 km	14 025,3 €
20 kWh	100 kW	1650 kg	12,4 s	9,6 s	1,23 kg	431,62 km	14 733,5 €
4,1 kWh	35 kW	1445 kg	11,8 s	9,6 s	1,21 kg	390,23 km	6 950,2 €
15,8 kWh	35 kW	1535 kg	11,6 s	9 s	1,48 kg	356,03 km	9 290,2 €
8,8 kWh	35 kW	1503 kg	12,2 s	9,8 s	1,22 kg	388,1 km	7 890,2 €
20 kWh	35 kW	1585 kg	12 s	9,2 s	1,45 kg	377,38 km	10 130,2 €
2,1 kWh	50 kW	-	-	-	-	-	-
2,1 kWh	70 kW	-	-	-	-	-	-
2,1 kWh	35 kW	-	-	-	-	-	-

Tabelle 5.11: Nutzwertanalyse

Batterie	Brennstoffzelle	Beschl.	Elastizität	Verbrauch	Reichweite	Antriebsstrang-kosten	Nutzwert
4,1 kWh	50 kW	3	4	5	5	4	77
8,8 kWh	50 kW	2	3	5	5	4	72
15,8 kWh	50 kW	3	4	4	4	3	64
20 kWh	50 kW	2	4	4	4	2	56
2 kWh	100 kW	4	5	4	2	2	56
4,1 kWh	70 kW	3	4	4	3	4	65
4,1 kWh	90 kW	3	4	4	3	3	60
4,1 kWh	100 kW	3	4	4	3	2	55
8,8 kWh	70 kW	2	3	4	3	3	55
8,8 kWh	90 kW	2	3	4	3	2	50
8,8 kWh	100 kW	2	3	4	3	2	50
20 kWh	70 kW	2	4	2	3	1	39
2 kWh	90 kW	4	5	2	1	3	49
15,8 kWh	90 kW	2	4	2	3	1	39
15,8 kWh	100 kW	2	4	2	3	1	39
15,8 kWh	70 kW	3	4	2	2	2	43
20 kWh	90 kW	2	3	2	3	1	37
20 kWh	100 kW	2	3	2	3	1	37
4,1 kWh	35 kW	3	3	2	2	5	56
15,8 kWh	35 kW	3	4	1	1	4	45
8,8 kWh	35 kW	2	3	2	1	5	49
20 kWh	35 kW	2	4	1	1	3	37
2 kWh	50 kW	0	0	0	0	0	0
2 kWh	70 kW	0	0	0	0	0	0
2 kWh	35 kW	0	0	0	0	0	0

Formel (5.1) beschreibt die Berechnung des Nutzwertes. Dieser ist die Summe aller Produkte aus der Bewertung des Kriteriums j_i und der Gewichtung des jeweiligen Kriteriums G_i .

$$NW = \sum_{i=1}^5 j_i G_i \quad (5.1)$$

Der optimalste Antriebsstrang für die Anforderungen ist jener mit einer 50 kW-Brennstoffzelle und einer Batterie mit der Kapazität von 4,1 kWh. Auffällig bei der Reihung ist, dass die Antriebsstränge mit der Brennstoffzellenleistung von 50 kW die Besten Ergebnisse liefern. Den besten Beschleunigungswert mit 11,2 Sekunden von 0 auf 100km/h hat die Kombination mit dem 100 kW-Brennstoffzellensystem und der 2,1 kWh-Batterie. Den niedrigsten Wasserstoffverbrauchswert mit 0,94 kg/100km hat der Antriebsstrang mit der 50 kW-Brennstoffzellensystemleistung und der 4,1 kWh-Batteriekapazität. Die höchste

Reichweite hat das 50 kW-Brennstoffzellensystem mit der 8,8 kWh-Batterie, mit 499,62 km. Die geringsten Kosten von 6 950,2 € für ein Produktionsvolumen von 100 000 Stk./Jahr hat der Antriebsstrang mit dem 35 kW-Brennstoffzellensystem und der 4,1 kWh-Batterie.

5.3 Technische Spezifikationen des optimierten PEM-Antriebsstranges eines FCEV

Laut der Ergebnisse der Längsdynamiksimulation und der Kostenanalyse ist die Antriebsstrangspezifikation in Tabelle 5.12 für den Audi A3-etrn FC am optimalsten für die gegebenen Anforderungen.

Tabelle 5.12: Technische Spezifikation des optimalen Antriebsstranges

Komponente	Daten
PSM Elektromotorleistung	85 kW
Wasserstofftankkapazität	4,5 kg
PEM Brennstoffzellensystemleistung	50 kW
Batteriekapazität	4,1 kWh

Tabelle 5.13 bis Tabelle 5.17 beschreiben die optimalen Antriebsstränge für die jeweiligen Kriterien.

Tabelle 5.13: Technische Spezifikation des Antriebsstranges für die beste Beschleunigung

Komponente	Daten
PSM Elektromotorleistung	85 kW
Wasserstofftankkapazität	4,5 kg
PEM Brennstoffzellensystemleistung	100 kW
Batteriekapazität	2,1 kWh

Tabelle 5.14: Technische Spezifikation des Antriebsstranges für die beste Elastizität

Komponente	Daten
PSM Elektromotorleistung	85 kW
Wasserstofftankkapazität	4,5 kg
PEM Brennstoffzellensystemleistung	100 kW
Batteriekapazität	2,1 kWh

Tabelle 5.15: Technische Spezifikation des Antriebsstranges für den niedrigsten Verbrauch

Komponente	Daten
PSM Elektromotorleistung	85 kW
Wasserstofftankkapazität	4,5 kg
PEM Brennstoffzellensystemleistung	50 kW
Batteriekapazität	4,1 kWh

Tabelle 5.16: Technische Spezifikation des Antriebsstranges für die größte Reichweite

Komponente	Daten
PSM Elektromotorleistung	85 kW
Wasserstofftankkapazität	4,5 kg
PEM Brennstoffzellensystemleistung	50 kW
Batteriekapazität	8,8 kWh

Tabelle 5.17: Technische Spezifikation für die niedrigsten Antriebsstrangkosten

Komponente	Daten
PSM Elektromotorleistung	85 kW
Wasserstofftankkapazität	4,5 kg
PEM Brennstoffzellensystemleistung	35 kW
Batteriekapazität	4,1 kWh

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Masterarbeit wurden Brennstoffzellenantriebsstränge und ein batteriebetriebener Antriebsstrang hinsichtlich Leistungsdaten und Kosten miteinander verglichen und ein optimaler Antriebsstrang für einen Audi–A3 etron ermittelt. Die Kernkomponenten des Antriebsstranges waren das PEM-Brennstoffzellensystem, die Batterie, der Elektromotor und der Wasserstofftank. Die Leistung des Elektromotors und die Kapazität des Tanks wurden für alle untersuchten Antriebsstränge konstant gehalten. Die variablen Größen, die es zu optimieren galt, waren die Kapazität der Batterie und die Leistung des PEM- Brennstoffzellensystems. Zur Datensammlung wurden vier Antriebsstränge definiert und anschließend einer umfassenden Längsdynamiksimulation und einer Kostenanalyse unterzogen.

Die Längsdynamiksimulation der definierten Fahrzeuge wurde mit der Simulationssoftware AVL Cruise durchgeführt. Das für die Simulation verwendete Modell wurde innerhalb der Firma vom Hybrid Simulation Department erstellt. Nach der Einarbeitung in die Software und in das Fahrzeugmodell wurde das Fahrzeugmodell für die definierten Brennstoffzellen- und Batterieantriebsstränge parametrisiert. Anschließend wurden Längsdynamiksimulationen mit den Fahrzyklen Graz-RDE, NEDC, WLTC, Großglockner, Top Speed, Elasticity und Performance durchgeführt. Durch die Analyse der Resultate wurden die Werte für den Verbrauch, die Reichweite, die Elastizität und die Beschleunigung ermittelt.

Um die Kosten der Antriebsstränge zu ermitteln, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und Kostendaten für den Elektromotor, das PEM-Brennstoffzellensystem, die Batterie und den Wasserstofftank gesammelt. Die verwendeten Daten wurden durch Auswertung bezüglich Aktualität und Aussagekraft gewählt. Durch die Ermittlung der Betriebskosten und der Antriebsstrangkosten wurden die Gesamtkosten (Total Cost of Ownership) berechnet. Um eine realitätsgetreue Kostenanalyse zu gewährleisten, wurden die Lernkurven durch die Produktion berücksichtigt und die Antriebsstrangkosten über das Produktionsvolumen gestaffelt ermittelt.

Zur Findung der optimalen Kombination von Brennstoffzellenleistung zu Batteriekapazität wurden, neben den vier definierten Antriebssträngen, noch mehrere Kombinationen untersucht. Mit den Ergebnissen wurde eine Nutzwertanalyse erstellt und durch Gewichtung der Optimierungskriterien wie Verbrauch, Reichweite, Elastizität, Beschleunigung und Kosten der optimale Antriebsstrang für den Audi–A3 etron bestimmt. Dieser Brennstoffzellenantriebsstrang hat eine Elektromotorenleistung von 85 kW, einen Druckwasserstofftank mit 4,5 kg gespeicherten Wasserstoff, eine Brennstoffzellenleistung von 50 kW und eine Batteriekapazität von 4,1 kWh.

6.2 Ausblick und Verbesserungsvorschläge

Diese Masterarbeit soll als eine Vorstudie für das PEMREX-Projekt der AVL List GmbH dienen. Die Ergebnisse sollen beim Auswahlprozess der Brennstoffzelle und der Batterie

behilflich sein. Bei der Längsdynamiksimulation wurden die Ergebnisse ausschließlich auf die Leistungsbereitstellung zurückgeführt. Die Wärmeentwicklung der Brennstoffzelle und der Batterie wurde vernachlässigt, obwohl dies jedoch eine große Rolle für die Effizienz des Antriebsstranges spielt. Vor der Planung des Laboraufbaus sollte noch die thermische Entwicklung der Komponenten betrachtet und simuliert werden.

Bei der Parametrisierung der Brennstoffzelle konnte nur auf drei verschiedene Wirkungsgradkennlinien zurückgegriffen werden. Diese Kennlinien für 30, 55 und 70 kW wurden nach oben und unten skaliert und für die konfigurierten Brennstoffzellenleistungen angepasst. Das kann Abweichungen der Simulationsergebnissen von der Realität hervorrufen. Speziell die Hochskalierung der 70 kW Brennstoffzelle auf 100 kW könnte problematisch sein. Zur Fehlerminimierung sollten die bestimmten Kennlinien vom Brennstoffzellenstackhersteller Elring Klinger gefordert werden. Des Weiteren sollte noch auf aktuelle Entwicklungen in der Batterietechnologie geachtet werden, um bei einer Neuentwicklung auf eine noch effizientere Batteriezelle umsteigen zu können.

Die Ergebnisse der Kostenanalyse können durch Vorhersageunsicherheiten von der Realität abweichen. Die größte Unsicherheit sind die Kosten der Batterie. Diese sind stark von der globalen Produktion abhängig, welche wiederum von der Marktpenetration des Elektroautos und dem Wille der Gesellschaft, auf alternative Antriebsformen umzusteigen, bestimmt ist. Eine weitere Ungenauigkeit stellt der Preis des Wasserstoffes dar. Dieser ist stark von der Produktionsform abhängig, also ob Wasserstoff durch fossile Brennstoffe reformiert oder ausschließlich durch erneuerbare Energien erzeugt wird.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Druckwasserstofftank [4]	6
Abbildung 2.2: Volumetrische Energiedichten von verschiedenen Energieträgern [3].....	6
Abbildung 2.3: Gravimetrische Energiedichten von verschiedenen Energieträgern [3].....	7
Abbildung 2.4: Prinzip einer Brennstoffzelle [5]	7
Abbildung 2.5: PEM Brennstoffzelle [6]	9
Abbildung 2.6: Komponenten einer PEM-Brennstoffzelle [6]	13
Abbildung 2.7: Dreiphasengrenze Gas, Katalysator, Elektrolyt [6]	13
Abbildung 2.8: Gaskanäle in einer Stromkollektorplatte [11]	14
Abbildung 2.9: Gaskanalanordnung [11]	14
Abbildung 2.10: PEM-Stack [11].....	15
Abbildung 2.11: PEM-Stack Labor [11]	15
Abbildung 2.12: PEM-Stack mit Hilfssystemen [8].....	15
Abbildung 2.13: PEM-Antriebsstrang [12].....	16
Abbildung 2.14: Mercedes B-Klasse F-Cell [14].....	17
Abbildung 2.15: Honda Clarity FCX [12].....	18
Abbildung 2.16: Ford Focus FCV Hybrid [16]	18
Abbildung 2.17: Toyota Mirai [17].....	19
Abbildung 2.18: Fahrwiderstandskräfte	19
Abbildung 3.1: PEMREX AVL Cruise-Modell	24
Abbildung 3.2: Hybrid Operation Strategy Steuerungssystem	25
Abbildung 3.3: Ohmsche Widerstandskurve Panasonic CGR18650E.....	29
Abbildung 3.4: Wirkungsgrad-Leistungskennlinien	31
Abbildung 3.5: Elektromotorkennlinie	31
Abbildung 3.6: NEDC	34
Abbildung 3.7: WLTC	35
Abbildung 3.8: Graz RDE Cycle.....	35
Abbildung 3.9: Neigung Graz-RDE.....	36
Abbildung 3.10: Grossglockner Cycle Geschwindigkeitsprofil	36
Abbildung 3.11: Grossglockner Cycle Höhenprofil	37
Abbildung 3.12: Top Speed Geschwindigkeitsprofil	37
Abbildung 3.13: Elasticity Geschwindigkeitsprofil	38
Abbildung 3.14: Performance Geschwindigkeitsprofil.....	38
Abbildung 3.15: Beschleunigungsvergleich	46
Abbildung 3.16: Geschwindigkeitsprofile Performance-Fahrzyklus.....	47
Abbildung 3.17: Elastizitätsvergleich	47
Abbildung 3.18: Geschwindigkeitsprofile Elasticity-Fahrzyklus	48
Abbildung 3.19: Top Speed Vergleich.....	48
Abbildung 3.20: Geschwindigkeitsprofile Top Speed-Fahrzyklus	49
Abbildung 3.21: Reichweitenvergleich Graz-RDE.....	49
Abbildung 3.22: Wasserstoffverbrauchsvergleich Graz-RDE	50

Abbildung 3.23: Reichweitenvergleich NEDC	50
Abbildung 3.24: Wasserstoffverbrauchsvergleich NEDC	51
Abbildung 3.25: Reichweitenvergleich WLTC	51
Abbildung 3.26: Wasserstoffverbrauchsvergleich WLTC	51
Abbildung 3.27: Reichweitenvergleich Großglockner	52
Abbildung 3.28: Wasserstoffverbrauchsvergleich Großglockner	52
Abbildung 3.29: FCEV SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	53
Abbildung 3.30: FCBEV SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	53
Abbildung 3.31: FCREV-v2 SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	54
Abbildung 3.32: BEV SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	54
Abbildung 4.1: Brennstoffzellenstack-, Brennstoffzellensystemkosten [22].....	58
Abbildung 4.2: Wasserstofftankkostenfunktion mit doppelt-logarithmischer Skalierung.....	59
Abbildung 4.3: Wasserstofftankkosten	59
Abbildung 4.4: Kapazitätsspezifische Batteriekosten abhängig Produktionsvolumen	60
Abbildung 4.5: Kostenentwicklung des Elektromotors	61
Abbildung 4.6: Kostenfunktion Elektromotor+DC/AC Konverter doppelt-logarithmische Achsenkalibrierung	62
Abbildung 4.7: Kostenfunktion Elektromotor+DC/AC-Konverter	62
Abbildung 4.8: Vergleich der Antriebsstrangkosten	65
Abbildung 4.9: Vergleich der Betriebskosten über die Lebenszeit des Fahrzeugs	66
Abbildung 4.10: Gesamtkostenvergleich	66
Abbildung 0.1: FCEV NEDC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf.....	XV
Abbildung 0.2: FCEV WLTC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XVI
Abbildung 0.3: FCEV Grossglockner SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XVI
Abbildung 0.4: FCBEV NEDC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XVII
Abbildung 0.5: FCBEV WLTC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XVII
Abbildung 0.6: FCBEV Grossglockner SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XVIII
Abbildung 0.7: FCREVNEDC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XVIII
Abbildung 0.8: FCREV WLTC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XIX
Abbildung 0.9: FCREV Grossglockner SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XIX
Abbildung 0.10: BEV NEDC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XX
Abbildung 0.11: BEV WLTC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XX
Abbildung 0.12: BEV Grossglockner SOC-Verläufe, Leistungsverlauf	XXI
Abbildung 0.13: Brennstoffzellenstackkosten	XXII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Stoffeigenschaften Wasserstoff [2]	4
Tabelle 2.2: Arten von Brennstoffzellen [9, 10].....	8
Tabelle 2.3: Enthalpie und Entropiedaten bei Raumtemperatur [8].....	11
Tabelle 3.1: Definition der untersuchten Antriebsstränge (Startwerte)	23
Tabelle 3.2: Hybrid Operation Strategies	25
Tabelle 3.3: Strategieauswahl.....	25
Tabelle 3.4: Leistungsbereitstellung des PEM-Brennstoffzellensystems	26
Tabelle 3.5: Batteriezellentypen.....	29
Tabelle 3.6: Batterieeinheiten.....	30
Tabelle 3.7: Massenangaben	33
Tabelle 3.8: Gesamtgewicht der untersuchten Fahrzeuge.....	33
Tabelle 3.9: k-Faktortabelle	39
Tabelle 3.10: FCEV Fahrzeugdaten	42
Tabelle 3.11: FCEV Leistungsdaten	42
Tabelle 3.12: FCEV Verbrauchs- und Reichweitendaten	42
Tabelle 3.13: FCBHV Fahrzeugdaten	43
Tabelle 3.14: FCBEV Leistungsdaten.....	43
Tabelle 3.15: FCBEV Verbrauchs- und Reichweitendaten	43
Tabelle 3.16:FCREV-v1 Fahrzeugdaten	43
Tabelle 3.17: FCREV-v1 Leistungsdaten	44
Tabelle 3.18: FCREV-v1 Verbrauchs- und Reichweitendaten	44
Tabelle 3.19: FCREV-v2 Fahrzeugdaten	44
Tabelle 3.20: FCREV-v2 Leistungsdaten	45
Tabelle 3.21: FCREV-v2 Verbrauchs- und Reichweitendaten	45
Tabelle 3.22: BEV Fahrzeugdaten	45
Tabelle 3.23: BEV Leistungsdaten.....	45
Tabelle 3.24: BEV Reichweitendaten	46
Tabelle 4.1: Übersicht Fahrzeugdaten.....	55
Tabelle 4.2: Brennstoffzellenkosten [22]	58
Tabelle 4.3: Kapazitätsspezifische Batteriekosten	60
Tabelle 4.4: Kosten Elektromotor inkl. DC/AC Konverter	61
Tabelle 4.5: Gesamtkosten FCEV (PFC=100kW, CBat=2,1kWh, Pmotor=85kW)	63
Tabelle 4.6: Gesamtkosten FCBHV (PFC=50kW, CBat=8,8kWh, Pmotor = 85kW)	63
Tabelle 4.7: Gesamtkosten FCREV-v2 (PFC=35 kWh, CBat=20kWh, Pmotor=85kW)	63
Tabelle 4.8: Gesamtkosten BEV (PFC=0, CBat=80kWh, Pmotor=85kW)	64
Tabelle 4.9: Betriebskosten Brennstoffzellenfahrzeuge.....	64
Tabelle 4.10: Betriebskosten BEV	65
Tabelle 5.1: PEM-Brennstoffzellenstackleistungen	67
Tabelle 5.2: Batteriekapazitäten	67
Tabelle 5.3: Batterieparametrisierung	68

Tabelle 5.4: Bewertungsschlüssel Beschleunigung	68
Tabelle 5.5: Bewertungsschlüssel Verbrauch	68
Tabelle 5.6: Bewertungsschlüssel Elastizität	68
Tabelle 5.7: Bewertungsschlüssel Reichweite	68
Tabelle 5.8: Bewertungsschlüssel Kosten	68
Tabelle 5.9: Gewichtungstabelle	69
Tabelle 5.10: Resultate	70
Tabelle 5.11: Nutzwertanalyse	71
Tabelle 5.12: Technische Spezifikation des optimalen Antriebsstranges	72
Tabelle 5.13: Technische Spezifikation des Antriebsstranges für die beste Beschleunigung..	72
Tabelle 5.14: Technische Spezifikation des Antriebsstranges für die beste Elastizität	72
Tabelle 5.15: Technische Spezifikation des Antriebsstranges für den niedrigsten Verbrauch	72
Tabelle 5.16: Technische Spezifikation des Antriebsstranges für die größte Reichweite	73
Tabelle 5.17: Technische Spezifikation für die niedrigsten Antriebsstrangkosten	73
Tabelle 0.1: Brennstoffzellenfahrzeuge	VII
Tabelle 0.2: Batteriezellentypen.....	XXI
Tabelle 0.3: Brennstoffzellenstackkosten	XXI
Tabelle 0.4: k-Faktor Konfigurationen.....	XXII

Literaturverzeichnis

- [1] B. Gnörich, *Vergleichende Gesamtkostenanalyse Von Brennstoffzellenfahrzeugen*. Forschungsges. Kraftfahrwesen, 2010.
- [2] H. Eichlseder and M. Klell, "Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik," 2008.
- [3] J. Lehmann and T. Luschtinetz, *Wasserstoff Und Brennstoffzellen: Unterwegs Mit Dem Saubersten Kraftstoff*. Springer-Verlag, 2014.
- [4] (2016). *Fuel Cell e-mobillity Stand: 10.3.2016*. Available: <http://www.fuel-cell-e-mobility.info/>.
- [5] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. Academic Press, 2012.
- [6] M. Backes, *Impedanzbasierte Online-Diagnose Des Zustands Von Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen*, 2006.
- [7] C. Spiegel, *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation using MATLAB*. Academic Press, 2011.
- [8] L. Guzzella and A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems*. Springer, 2007.
- [9] M. Morcos, *Auslegung Eines HT-PEFC Stacks Der 5 kW Klasse*, 2007.
- [10] K. Kordesch and G. Simader, *Fuel Cells and their Applications*. VCH, 1996.
- [11] J. Zhang, J. Wu and H. Zhang, *PEM Fuel Cell Testing and Diagnosis*. Newnes, 2013.
- [12] (05.02.2016). *Honda Clarity FCX Stand: 10.2.2016*. Available: <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity>.
- [13] (2009). *6 Partner, ein Ziel: 400 Wasserstoffstationen Stand: 28.1.2016*. Available: <http://h2-mobility.de/>.
- [14] (19.5.2012). *Mercedes B-Klasse F-Cell Stand: 9.9.2015*. Available: www.mercedes-benz.at/.
- [15] M. Matsunaga, T. Fukushima and K. Ojima, *Advances in the Power Train System of Honda FCX Clarity Fuel Cell Vehicle*, 2009.
- [16] (2006). *Ford Focus FCV Hybrid Stand: 10.1.2016*. Available: <http://www.autoblog.com/>.
- [17] (2015). *Toyota Mirai Stand: 15.2.2016*. Available: <https://www.toyota.at>.

- [18] M. Mitschke and H. Wallentowitz, *Dynamik Der Kraftfahrzeuge*. Springer, 1972.
- [19] A. Gälweiler, "Unternehmensplanung, Grundlagen und Praxis, Neuauflage bearbeitet und ergänzt von M.," *Schwaninger, Frankfurt aM*, 1986.
- [20] E. Carlson, P. Kopf, J. Sinha, S. Sriramulu and Y. Yang, "Cost Analysis of PEM Fuel Cell," *National Renewable Energy Laboratory NREL, Systems for Transportation, Report no.NREL/SR-560-39104*, 2005.
- [21] McKinsey&Company, "portfolio of powertrains for Europe: a fact-based analysis," 2010.
- [22] J. S. DOE, J. M. DOE and S. S. DOE, "DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, Fuel Cell System Cost 2014," 2014.
- [23] (2015). *Rapidly falling costs of battery of battery packs for electric vehicles Stand: 23.12.2015*. Available: <http://www.nature.com/nclimate/journal/v5/n4/full/nclimate2564.html>.
- [24] A. Delorme, S. Pagerit, P. Sharer and A. Rousseau, "Cost benefit analysis of advanced powertrains from 2010 to 2045," in *Electric Vehicle Symposium*, 2009, pp. 13-16.
- [25] A. Del Regno and A. Vartmann, "Presseinformation 06/2015," Baden-Württemberg, 2015.

A. Anhang

Tabelle 0.1: Brennstoffzellenfahrzeuge

Hersteller	Name	Jahr	P_{em}	P_{FC}	C_{Bat}	Reichweite	m_{ges}	0-100 km/h	Top Speed	Tank
Toyota	Mirai	2014	114 kW			500 km	1850 kg	9,6 s	178 km/h	
Audi	Audi a7 H-tron quattro	2014	170 kW		8,8 kWh	500 km		7,9 s	180 km/h	
SAIC	Roewe 950	2014				400 km				4,34 kg
Hyundai	Hyundai Intrado	2014			36 kWh	600 km				
Renault in Cooperation mit Symbio FCell	HYKangoo Maxi Z.E.	2014	44 kW	5 kW	22 kWh	300 km			90 km/h	1,8 kg
Hyundai	ix35 FuelCell	2013	100 kW	100 kW	24 kWh	594 km	1846 kg		160 km/h	5,64 kg
Nissan	Nissan TeRRA	2012								
BMW	i8 Fuel Cell	2012								
Daimler AG	Mercedes Concept F125!	2011			10 kWh	1000 km	1700 kg	4,9 s	220 km/h	7,5 kg
Audi	Audi Q5 Hybrid Fuel Cell	2011	90 kW	98 kW	1,3 kWh					
FAW Group	FAW Besturn B70 FCV	2010	42 kW	55 kW	2,813 kWh				120 km/h	
Chang'An Automobile	Z-SHINE SC7003EV	2010	42 kW	55 kW	2,813 kWh				150 km/h	
Chery Automobile Co. Ltd.	Chery Eastar SQR700FEB11	2010	42 kW	55 kW	2,813 kWh					
Tongji University	Volkswagen Passat LingYu new 2010 SVW7553FCV	2010	42 kW	40 kW					128 km/h	
SAIC	Roewe 750 E CSA7002FCEV	2009	45 kW	55 kW					150 km/h	
Fiat	Panda HyTRAN	2009						4,5 0-50 km/h	150 km/h	2,2 kg
Fiat	Serenergy Fiat Scudo	2009	30 kW	6,4 kW	44 kWh	500 km			110 km/h	
Volkswagen AG	Caddy Maxi HyMotion	2009	80 kW	85 kW	22 kWh					
General Motors	GM HydroGen	2008	73 kW		1,8 kWh	320 km		12 s		
General Motors	Cadillac Provoq	2008	70 kW	88 kW	9 kWh	483 km		8,5 s	160 km/h	6 kg
Hochschule Esslingen Daimler AG	Smart fortwo Coupe BR451	2008	35 kW	2,5 kW	21 kWh	250 km				1,13 kg
SAIC	Roewe 750 E CSA7001FCEV	2008	42 kW	25 kW					150 km/h	
Honda	FCX Clarity	2007	100 kW	100 kW		470 km	1625 kg	9 s	161 km/h	
Hyundai	Hyundai i-blue	2007		100 kW		600 km				3,33 kg
Toyota	Kluger V/ Highlander	2007	80 kW	90 kW		560 km	1880 kg			

Anhang

Hersteller	Name	Jahr	P _{em}	P _{FC}	C _{Bat}	Reich- weite	m _{ges}	0-100 km/h	Top Speed	Tank
Tongji University	Volkswagen Passat LingYu	2007						15 s	150 km/h	3,4 kg
SAIC	Roewe 750 E CSA7000FCEV	2007	42 kW	45 kW	2,813 kWh	300 km	1871 kg	12 s	150 km/h	1,2 kg
Ford	Ford Edge	2007				360 km			140 km/h	4,5 kg
General Motors	Chevy Volt	2007	53 kW	120 kW	16 kWh			8,8 s	192 km/h	4 kg
PSA Peugeot Citroen	Peugeot Partner van facelift as electric car	2006		10 kW						
Ford	Ford Explorer	2006	130 kW	60 kW	50 kWh	560 km	2560 kg			10 kg
Daimler AG	Mercedes F-Cell B-Klasse	2005	100 kW	80 kW	1,4 kWh					
Nissan	X-Trail	2005	90 kW	90 kW		500 km			150 km/h	
Daihatsu, Toyota	Move FCV-K2	2005	32 kW	30 kW		160 km				
Daimler AG	F600 Hygenius	2005	85 kW	60 kW		400 km				
Honda	Honda FCX	2005	130 kW	100 kW		560 km			160 km/h	5 kg
Daimler AG	Mercedes T 245 B-Klasse	2005	100 kW	80 kW	1,4 kWh	400 km			180 km/h	
Volkswagen AG	VW Touran	2004	80 kW		1,9 kWh	160 km		14 s	140 km/h	1,9 kg
Hyundai	Kia Sportage	2004	80 kW			300 km			150 km/h	4,40 kg
Audi	Audi A2, alloy body	2004	110 kW	66 kW	38 kWh	220 km		10 s	175 km/h	1,8 kg
Hyundai	Tucson FCEV	2004	80 kW			300 km				4,40 kg
Honda	Honda FCX	2004	80 kW	86 kW		430 km			150 km/h	
Nissan	X-Trail	2003	85 kW	63 kW		350 km			145 km/h	
Mitsubishi	Mitsubishi Grandis minivan	2003	45 / 65 kW	85 / 68 kW	1,4 kWh	150 km	2000 kg		140 km/h	3,39 kg
Honda	Honda FCX	2003	86 kW	80 kW		395 km			150 km/h	
Ford	Focus FCV Hybrid	2002	68 kW			320 km	1500 kg			5,16 kg
Daimler AG	A-class (long version)	2002	65 kW	85 kW		150 km			145 km/h	
General Motors	Opel Zafira	2001	60 kW	94 kW		400 km	1590 kg	16 s	160 km/h	
Toyota	Based on Kluger V/Highlander	2001	80 kW	90 kW		500 km				1,45 kg
Fiat	Based on Seicento Elettra	2001	30 kW	7 kW		140 km			100 km/h	
DaimlerChrysler	Mercedes-Benz NECAR 2	1996								
Volkswagen AG	VW Truck	1989	17 kW	52,5 kW		120 km	2880 kg		70 km/h	1,5 kg
Nissan	Nissan X-trail 2005		90 kW	90 kW						

Programmcode 0.1: HOS-Selector

```
/* INPUT VARIABLES */
/* Control Signals */
double EM_P_el_002;
double HOS_state_old;
double BATT_SOC;
double time;
double DRV_rLoad, DRV_rLoad_min;
double VEH_v, VEH_v_max_Off;
double BATT_SOC_low_Old;
double desiredspeedfromprofile;
double ForceeDRV;
double ForceFCOnly;

/* Calibration Parameters */
double EM_P_el_max_e_Drive, VEH_v_max_e_Drive;
double FC_LPM_K_factor, BATT_SOC_min, FC_P_el_Opt;

/* INTERNAL VARIABLES */
double hsynt_EM_P_el = 1.0;
double hsynt_BATT_SOC = 1.01;
double BATT_SOC_low;

/* OUTPUT VARIABLES */
double HOS_state;

/* ALLOCATION */
/* Control Signals */
EM_P_el_002 = a[0];
HOS_state_old = a[1];
BATT_SOC = a[2];
time = a[3];
BATT_SOC_low_Old = a[4];
DRV_rLoad = a[6];
DRV_rLoad_min = a[7];
VEH_v = a[8];
VEH_v_max_Off = a[9];
desiredspeedfromprofile = a[10];
ForceeDRV=a[11];
ForceFCOnly=a[5];

/* Calibration Parameters */
EM_P_el_max_e_Drive = a[20];
VEH_v_max_e_Drive = a[24];
FC_LPM_K_factor = a[21];
BATT_SOC_min = a[22];
FC_P_el_Opt = a[23];

/* CODE */
/* Hysteresis */

if (time<0.1)
```

```

{BATT_SOC_low=0;}

if (BATT_SOC_low_Old==0)
{
    BATT_SOC_min = BATT_SOC_min / hsyT_BATT_SOC;
    if (BATT_SOC < BATT_SOC_min / hsyT_BATT_SOC)
    { BATT_SOC_low=1; }
}
else
{ BATT_SOC_min = BATT_SOC_min * hsyT_BATT_SOC;
  if (BATT_SOC > BATT_SOC_min * hsyT_BATT_SOC)
  { BATT_SOC_low=0; }
}

if (HOS_state_old < 1)
{ EM_P_el_max_e_Drive = EM_P_el_max_e_Drive / hsyT_EM_P_el; }
else
{ EM_P_el_max_e_Drive = EM_P_el_max_e_Drive * hsyT_EM_P_el; }

/* Positive Traction Power */
if (DRV_rLoad > DRV_rLoad_min)
{
    if (BATT_SOC_low==1)
    {
        /* LPM */
        if (EM_P_el_002 < FC_P_el_Opt)
        { HOS_state=2; }

        else
        /* FC Alone */
        { HOS_state=3; }
    }
    else
    {
        /* e-Drive (FC off) */
        if ((EM_P_el_002 < FC_P_el_Opt) && (EM_P_el_002 < EM_P_el_max_e_Drive) &&
(VEH_v < VEH_v_max_e_Drive))
        { HOS_state=1; }

        /* LPM */
        else
        { HOS_state=2; }

        if(ForceeDRV==1)
        {
            HOS_state=1;
        }

        if(ForceFCOnly==1)
        {
            HOS_state=3;
        }
    }
}
else
{
/* Regenerative Braking */
if ( VEH_v > VEH_v_max_Off )
    { HOS_state=5; }
}

```

```
        /* Vehicle Stop */
        if (fabs(desiredspeedfromprofile)<0.1)
        { HOS_state=6; }
    }
    /* OUTPUT */
    y[0] = HOS_state;
    y[1]=BATT_SOC_low;
    y[2]=BATT_SOC_min ;
```

Programmcode 0.2: eDrive

```
/* INPUT VARIABLES */
double DRV_rLoad;
double EM_Load_sup;
double coeff_EM_Derating, EM_Power_limiter;
```

```
/* INTERNAL VARIABLES */
```

```
/* OUTPUT VARIABLES */
double EM_Load1;
double FC_Pel1;
double BR_Tq1;
```

```
/* ALLOCATION */
DRV_rLoad = a[3];
coeff_EM_Derating = a[10];
EM_Power_limiter = a[11];
EM_Load_sup = a[12];
```

```
/* CODE */
EM_Load1 = DRV_rLoad;
if (EM_Power_limiter>0)
{ EM_Load1= EM_Load1*coeff_EM_Derating; }
EM_Load1 =(( EM_Load1<EM_Load_sup) ? EM_Load1:EM_Load_sup);
```

```
BR_Tq1 = 0;
FC_Pel1 = 0;
```

```
/* OUTPUT */
y[0] = EM_Load1;
y[1] = FC_Pel1;
y[4] = BR_Tq1;
```

Programmcode 0.3: FC LPM

```
/* INPUT VARIABLES */
double FC_Pel_max;
double DRV_rLoad;
double EM_Load_sup;
double coeff_EM_Derating, EM_Power_limiter;
double EM_Aux_Pel;
double BATT_SOC;
double FC_LPM_K_factor, FC_P_el_Opt;
```

```
/* INTERNAL VARIABLES */
double hsynt_BATT_SOC = 1.01;
double BATT_SOC_low;

/* OUTPUT VARIABLES */
double EM_Load2;
double FC_Pel2;
double BR_Tq2;

/* ALLOCATION */
DRV_rLoad = a[3];
FC_LPM_K_factor = a[4];
BATT_SOC_low = a[5];
FC_P_el_Opt = a[6];
BATT_SOC = a[7];
FC_Pel_max = a[8];
coeff_EM_Derating = a[10];
EM_Power_limiter = a[11];
EM_Load_sup = a[12];
EM_Aux_Pel = a[13];

/* CODE */
EM_Load2 = DRV_rLoad;
if (EM_Power_limiter>0)
{ EM_Load2= EM_Load2*coeff_EM_Derating; }
EM_Load2 =(( EM_Load2<EM_Load_sup) ? EM_Load2:EM_Load_sup);

BR_Tq2 = 0;

if (BATT_SOC_low == 1)
{
FC_Pel2 = FC_P_el_Opt;
}
else
{
FC_Pel2 = EM_Aux_Pel;
FC_Pel2 = ( (FC_Pel2<FC_Pel_max) ? FC_Pel2:FC_Pel_max);
FC_Pel2 = FC_Pel2 * FC_LPM_K_factor;
}

/* OUTPUT */
y[0] = EM_Load2;
y[1] = FC_Pel2;
y[4] = BR_Tq2;
```

Programmcode 0.4: FC Alone

```
/* INPUT VARIABLES */
double FC_Pel_max;
double DRV_rLoad;
double EM_Load_sup;
double coeff_EM_Derating, EM_Power_limiter;
double EM_Aux_Pel;
```

```
/* INTERNAL VARIABLES */

/* OUTPUT VARIABLES */
double EM_Load3;
double FC_Pel3;
double BR_Tq3;

/* ALLOCATION */
DRV_rLoad = a[3];
FC_Pel_max = a[8];
coeff_EM_Derating = a[10];
EM_Power_limiter = a[11];
EM_Load_sup = a[12];
EM_Aux_Pel = a[13];

/* CODE */
EM_Load3 = DRV_rLoad;
if (EM_Power_limiter>0)
{ EM_Load3= EM_Load3*coeff_EM_Derating; }

EM_Load3 =(( EM_Load3<EM_Load_sup) ? EM_Load3:EM_Load_sup);

BR_Tq3 = 0;

FC_Pel3 = EM_Aux_Pel;
FC_Pel3 = ( (FC_Pel3<FC_Pel_max) ? FC_Pel3:FC_Pel_max);
/* OUTPUT */
y[0] = EM_Load3;
y[1] = FC_Pel3;
y[4] = BR_Tq3;
```

Programmcode 0.5: Regenerative Braking

```
/* INPUT VARIABLES */
double BPP; // Brake Pedal Position
double BR_Tq_max;
double EM_Tq_BR_max;
double coeff_BR_EM;
double Wheel_speed, EM_speed;
double VEH_v;
double EM_Load_inf;
double Time;

/* INTERNAL VARIABLES */
double Transm_eta =0.89; // To consider the transmission efficiency in the split between the EM and the
traditional brakes
double BR_Tq;

/* OUTPUT VARIABLES */
double EM_Load5;
double FC_Pel5;
double BR_Tq5;
```

```
/* ALLOCATION */
BPP = a[0];
BR_Tq_max = a[4];
EM_Tq_BR_max = a[5];
coeff_BR_EM = a[6];
Wheel_speed = a[7];
EM_speed = a[8];
VEH_v = a[9];
EM_Load_inf = a[10];
Time = a[12];

/* CODE */
BR_Tq = 2*BPP * BR_Tq_max; // BPP resulted to be in [0 – 0.5]

if ( (EM_Tq_BR_max < -0.1) && (VEH_v > 1) )
{
EM_Load5 = -coeff_BR_EM*BR_Tq /EM_Tq_BR_max;
EM_Load5 =(( EM_Load5>-1) ? EM_Load5:-1);
}
else
{ EM_Load5 = 0; }

EM_Load5 =(( EM_Load5>EM_Load_inf) ? EM_Load5:EM_Load_inf);

BR_Tq5 = -( BR_Tq + (EM_Load5*EM_Tq_BR_max) ) * ( EM_speed/ ((Wheel_speed > 100) ? Wheel_speed:100)
) * Transm_eta / 4; // traditional braking equally shared between the 4 wheels

if(BR_Tq5<0.01)
{
BR_Tq5=0;
}

FC_Pel5 = 0;

/* OUTPUT */
y[0] = EM_Load5;
y[1] = FC_Pel5;
y[4] = BR_Tq5;
```

Programmcode 0.6: Vehicle Stop

```
/* INPUT VARIABLES */
double Switch_CD_to_CS;
double DRV_rLoad;
double EM_Load_sup;
double coeff_EM_Derating, EM_Power_limiter;

/* INTERNAL VARIABLES */

/* OUTPUT VARIABLES */
double EM_Load6;
double FC_Pel6;
double BR_Tq6;
```

```
/* ALLOCATION */
```

```
/* CODE */  
EM_Load6 = 0;  
BR_Tq6 = 800;  
FC_Pel6 = 0;
```

```
/* OUTPUT */  
y[0] = EM_Load6;  
y[1] = FC_Pel6;  
y[4] = BR_Tq6;
```

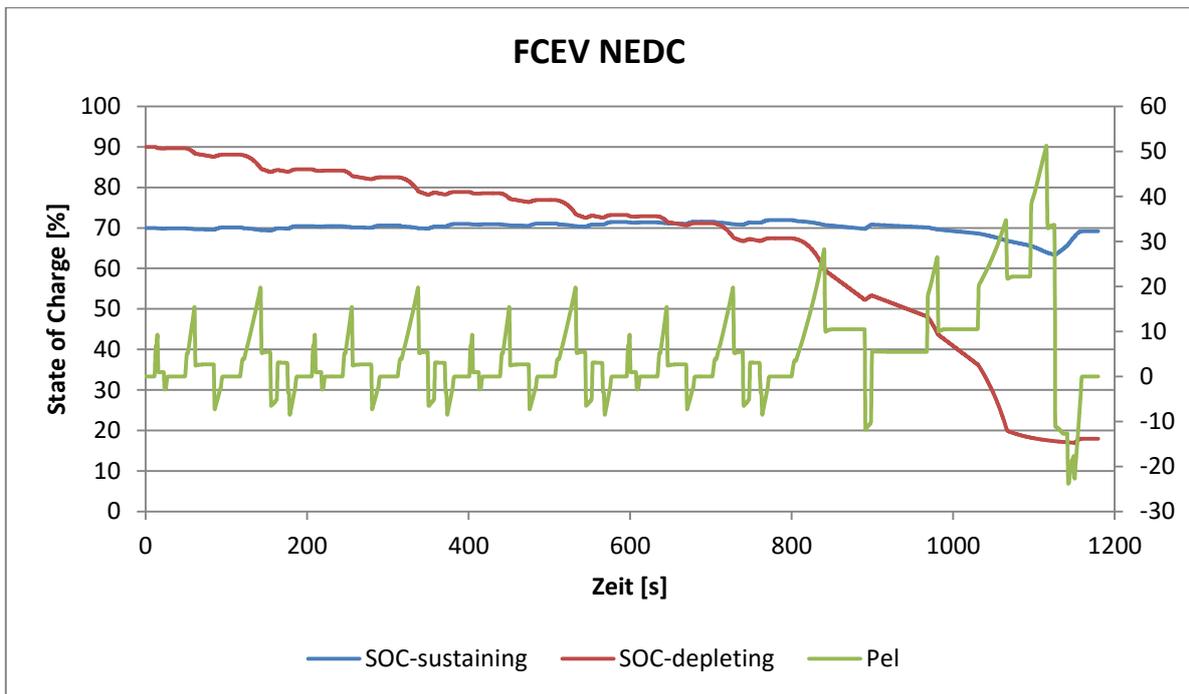


Abbildung 0.1: FCEV NEDC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

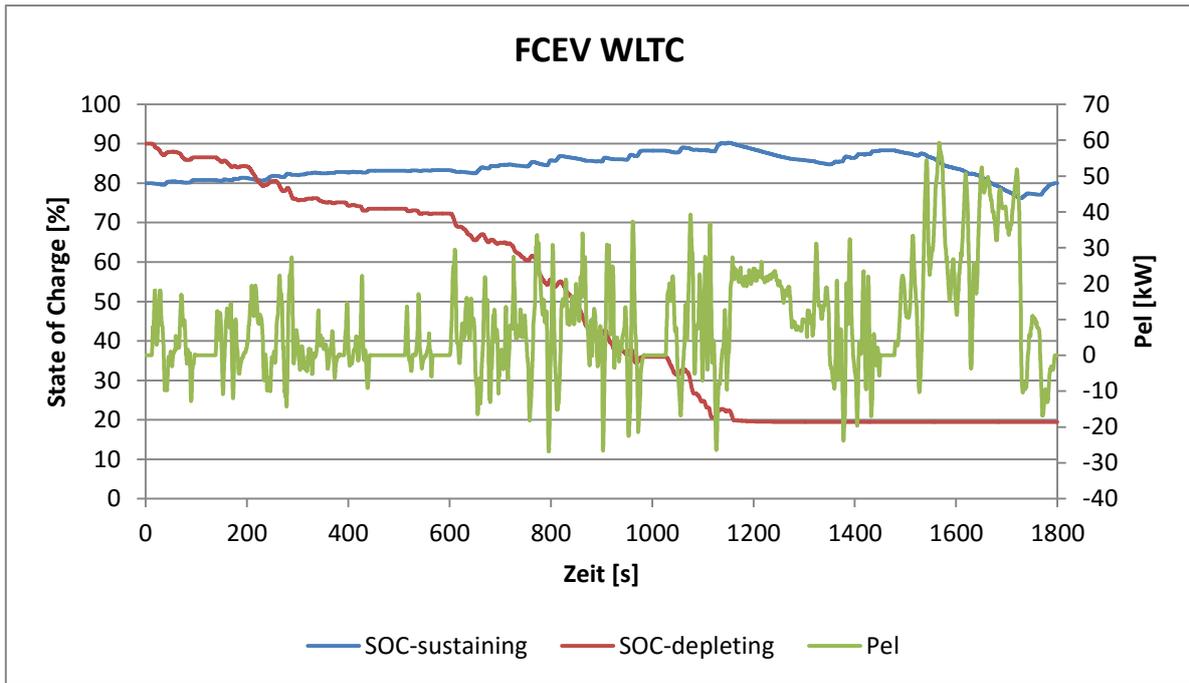


Abbildung 0.2: FCEV WLTC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

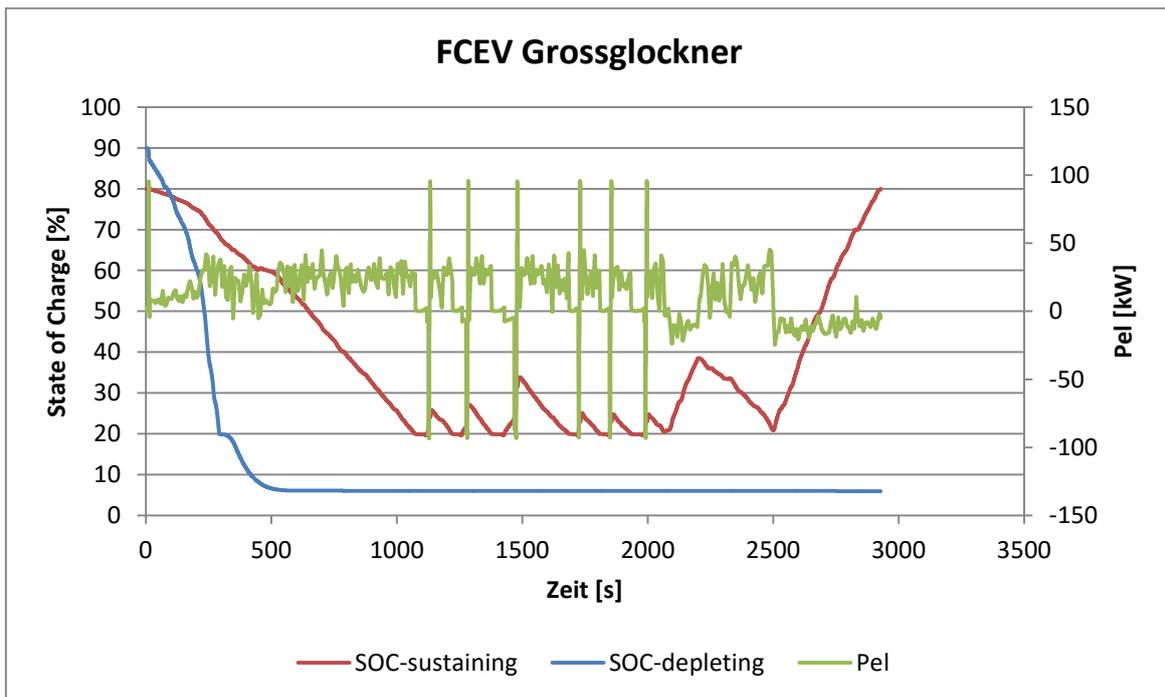


Abbildung 0.3: FCEV Grossglockner SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

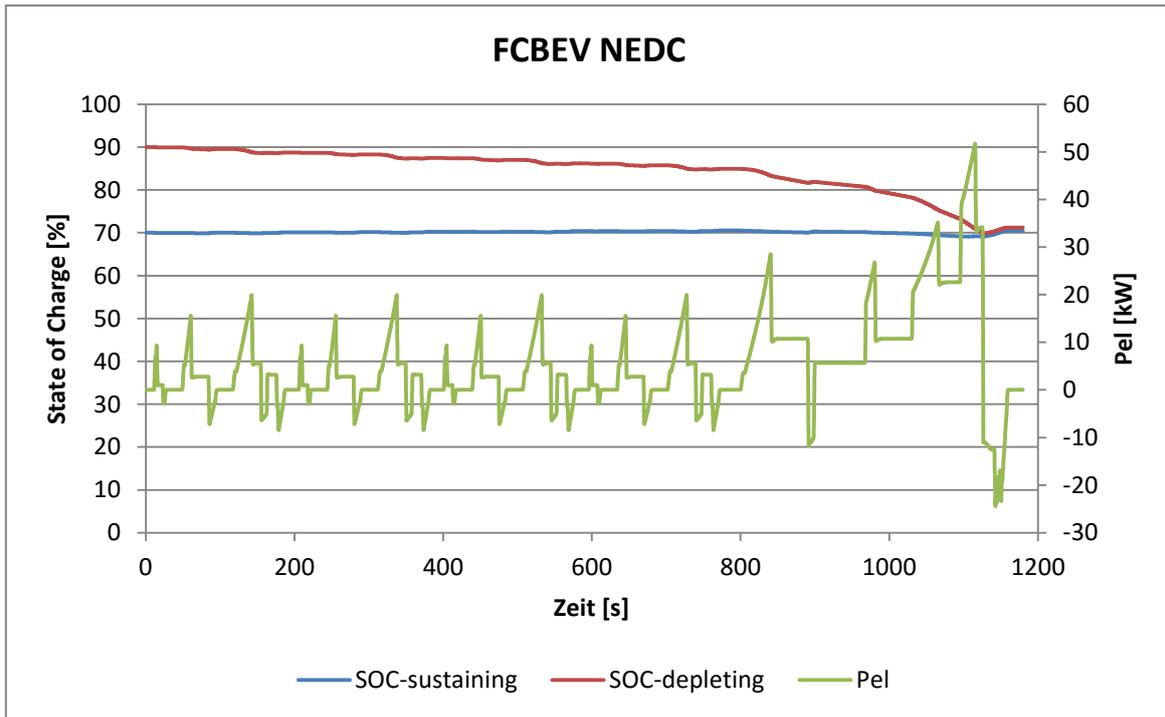


Abbildung 0.4: FCBEV NEDC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

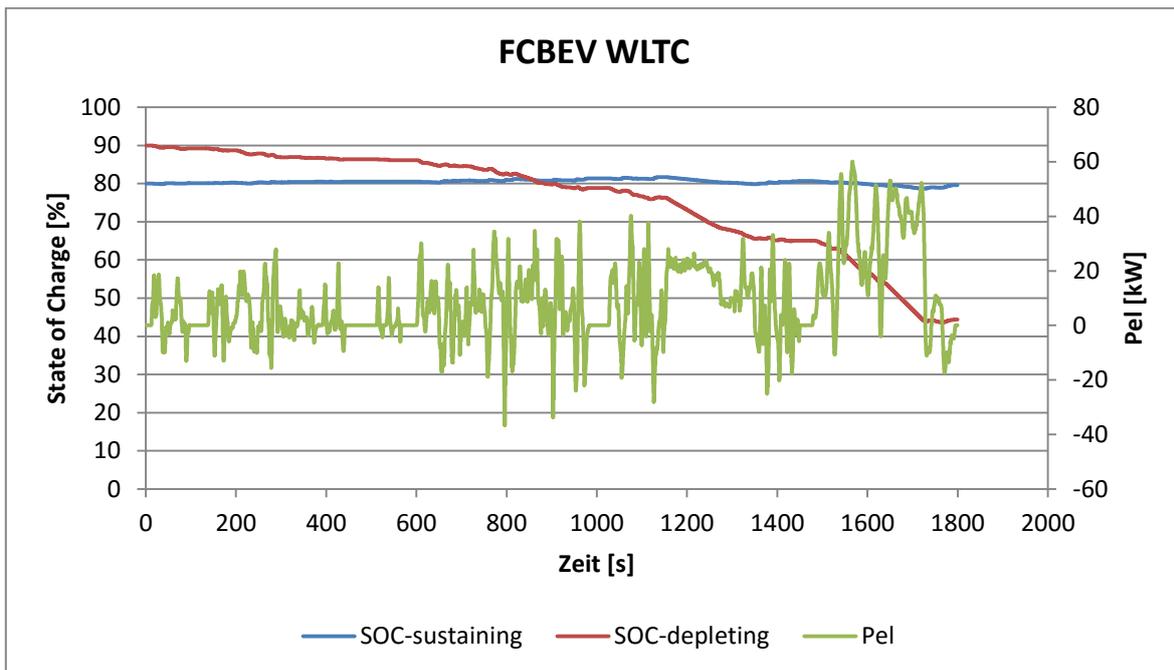


Abbildung 0.5: FCBEV WLTC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

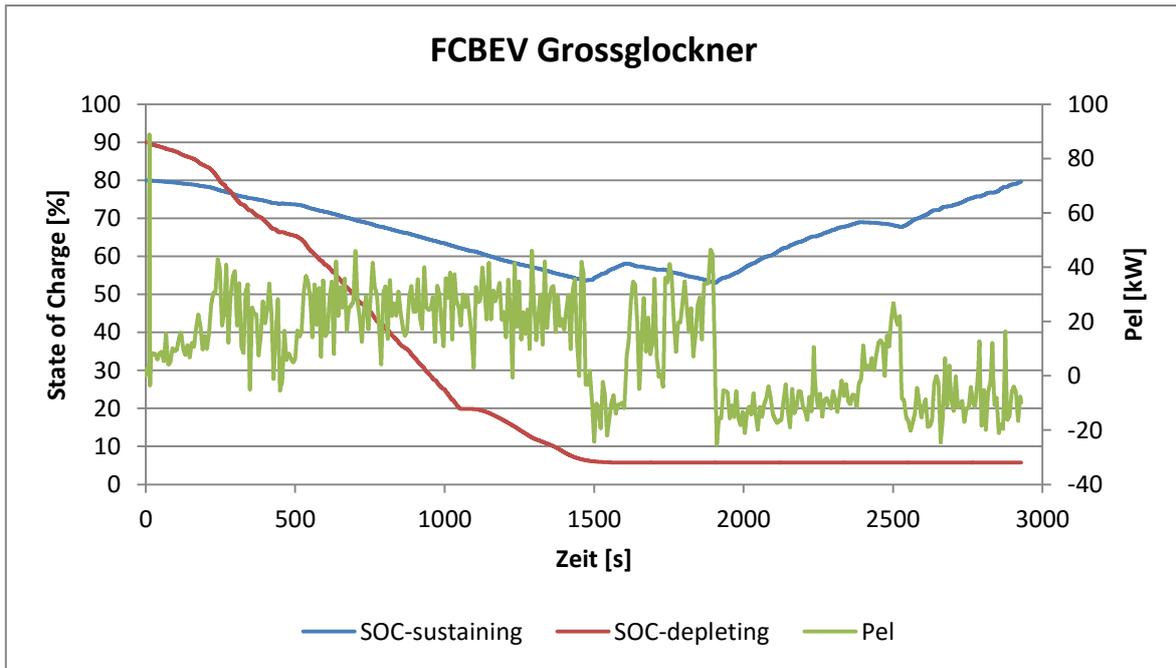


Abbildung 0.6: FCBEV Grossglockner SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

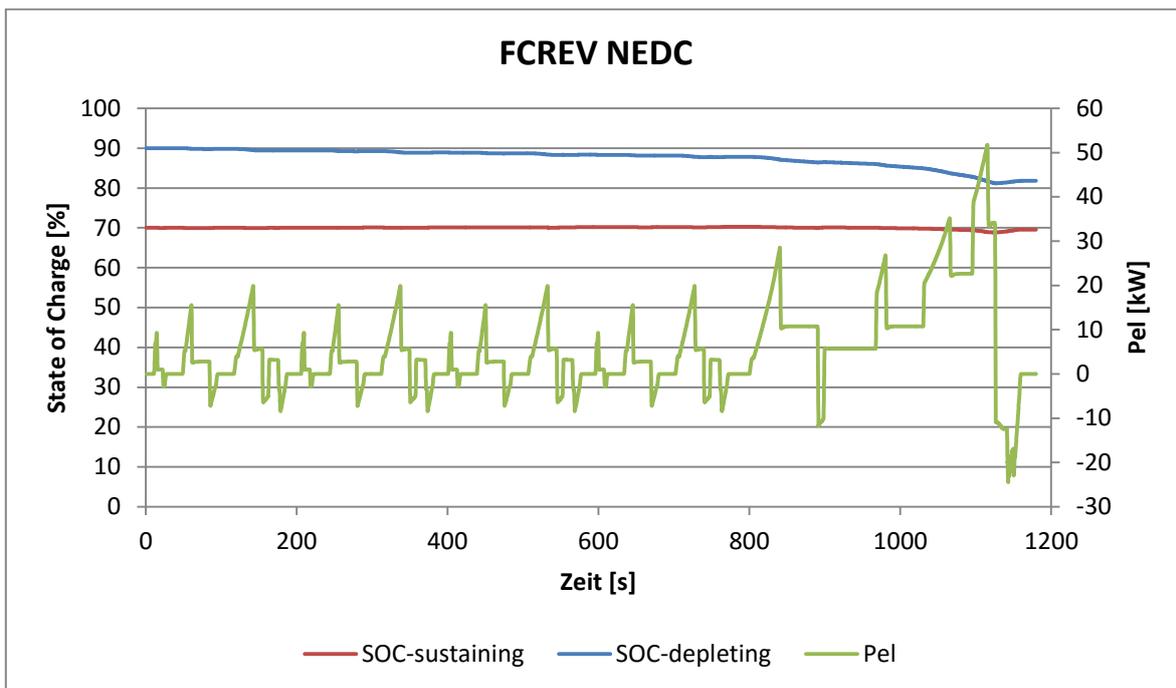


Abbildung 0.7: FCREV NEDC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

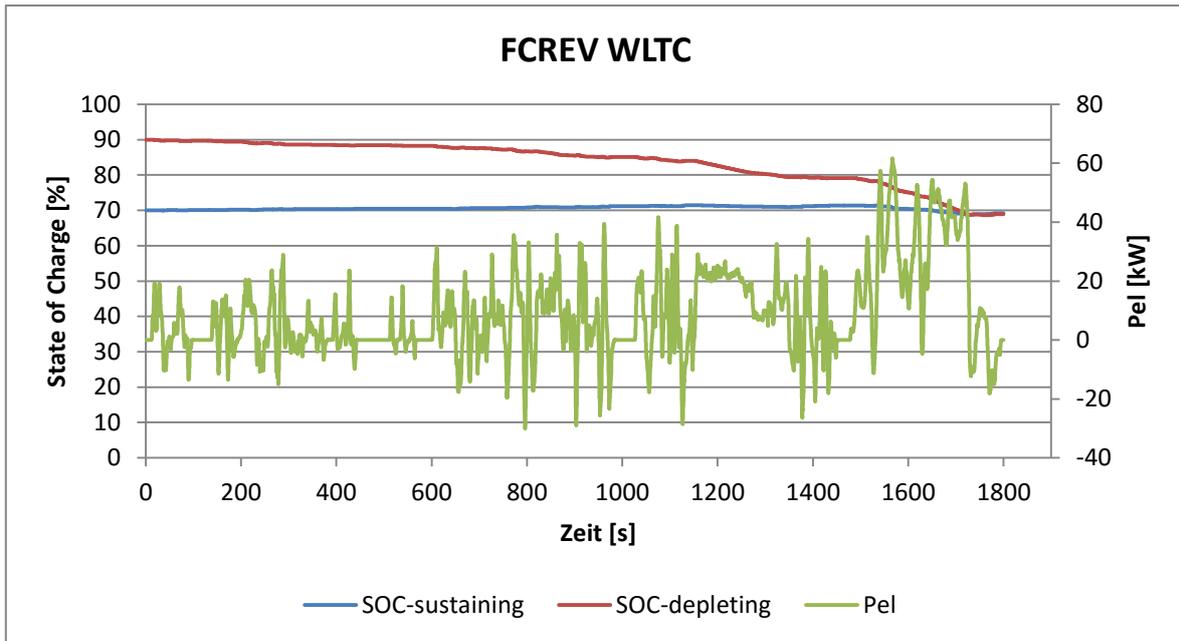


Abbildung 0.8: FCREV WLTC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

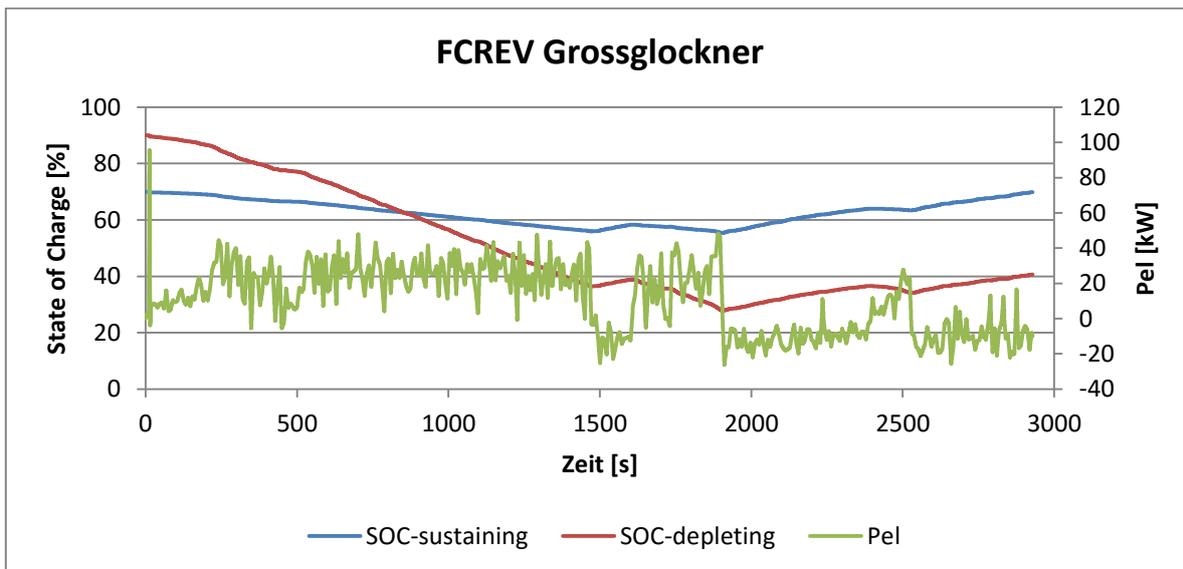


Abbildung 0.9: FCREV Grossglockner SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

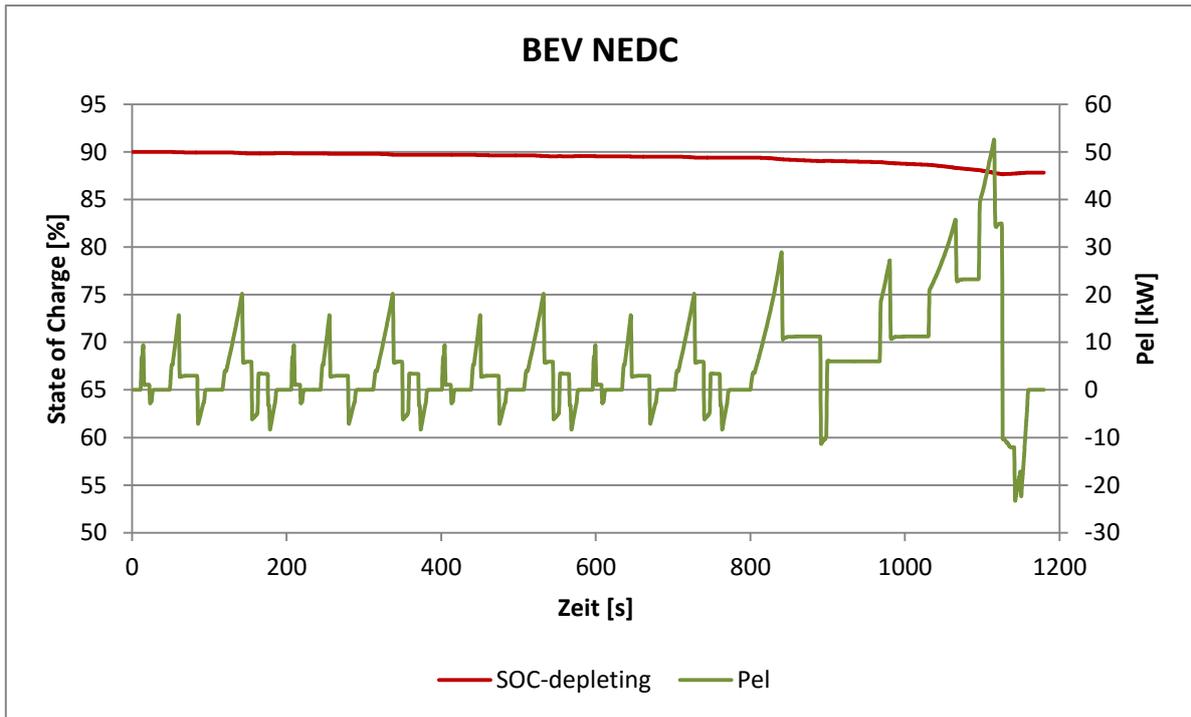


Abbildung 0.10: BEV NEDC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

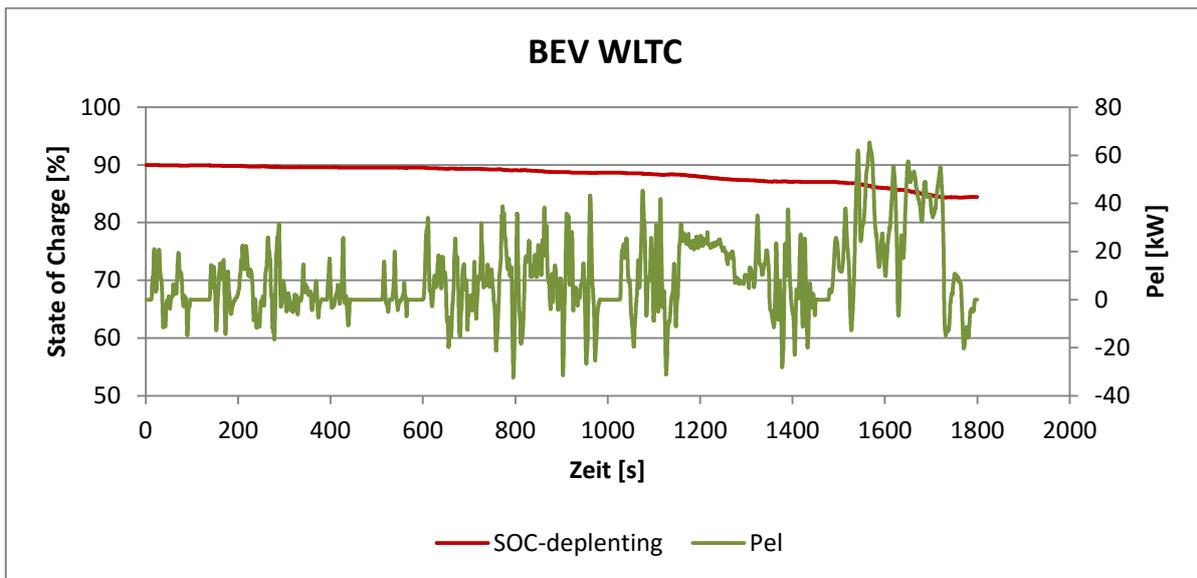


Abbildung 0.11: BEV WLTC SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

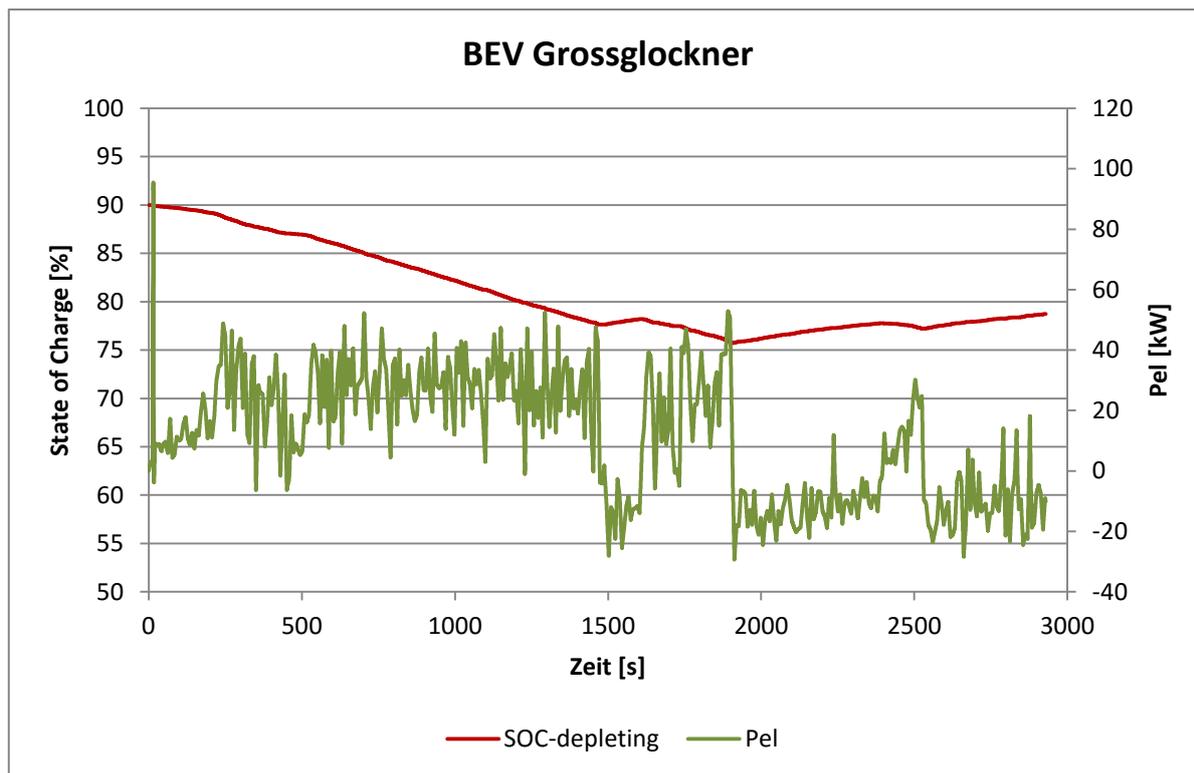


Abbildung 0.12: BEV Grossglockner SOC-Verläufe, Leistungsverlauf

Tabelle 0.2: Batteriezellentypen

Batteriebezeichnung	Hersteller	Nominelle Kapazität	Nominelle Spannung	Zellgewicht	Faktor [Wh/kg]
Sonata® 4400 Rechargeable Lithium-ion Cell	Boston - Power	4400 mAh	3,7 V	92 g	176,96
Swing™4400 Rechargeable Lithium-ion Cell	Boston - Power	4400 mAh	3,7 V	90 g	180,89
HEA 40 High Energy Zelle ICMNP 110190240	li - Tec	4000 mAh	3,6 V	106,7g	135,00
Panasonic CGA103450A	Panasonic	1950 mAh	3,7 V	39 g	185,00
Panasonic CGA633450B	Panasonic	1200 mAh	3,7 V	24 g	185,00
Panasonic CGR18650CG	Panasonic	2250 mAh	3,6 V	45 g	180,00
Panasonic CGR18650DA	Panasonic	2450 mAh	3,6 V	45 g	196,00
Panasonic CGR18650E	Panasonic	2550 mAh	3,7 V	46,5 g	202,90
Panasonic CGR26650A	Panasonic	2650 mAh	3,6 V	90 g	106,00
Powerstream H083448	Powerstream	1250 mAh	3,7 V	37 g	125,00
Valence IFR18650e	Valence	1400 mAh	3,2 V	40 g	112,00
LQ100-A1	LG Chem	41000 mAh	3,8 V	965 g	161,45
Model S 300 mile pack batteries	Tesla	3100 mAh	3,7 V	44 g	260,68

Tabelle 0.3: Brennstoffzellenstackkosten

Brennstoffzellenstackkosten			
Produktionsvolumen	1 000	100 000	1 000 000
Obere Kostengrenze	781 €/kW	252 €/kW	98 €/kW
Untere Kostengrenze	221 €/kW	42 €/kW	16 €/kW
Kosten	500 €/kW	110 €/kW	43 €/kW

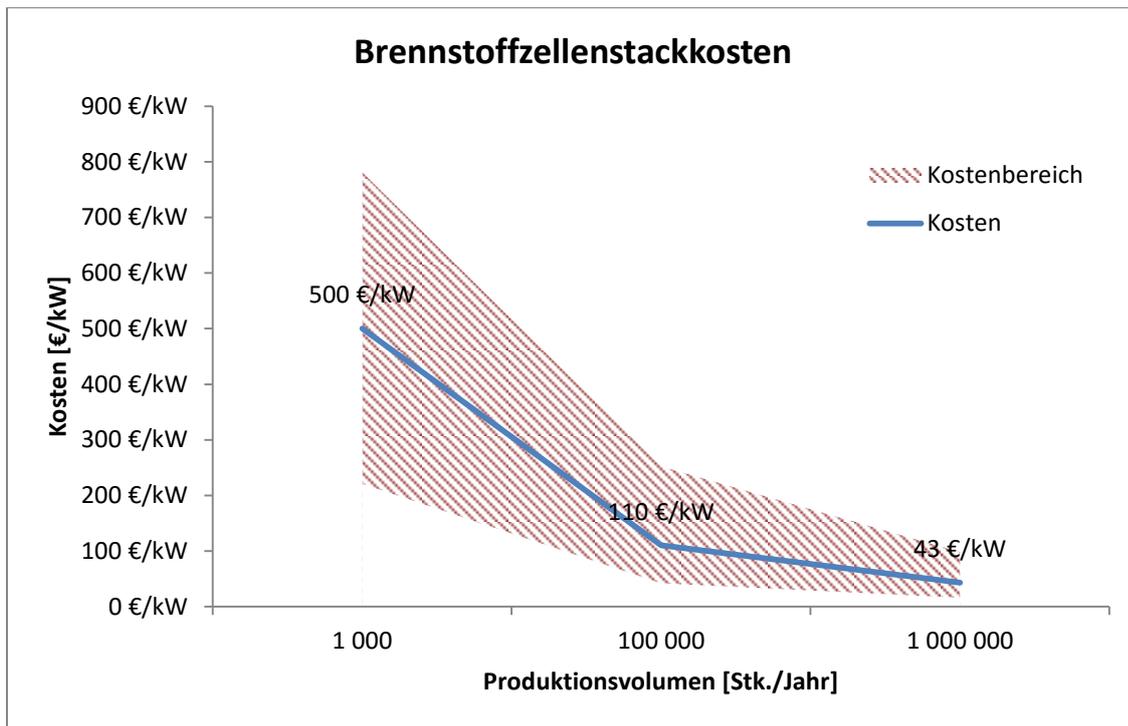


Abbildung 0.13: Brennstoffzellenstackkosten

Tabelle 0.4: k-Faktor Konfigurationen

	FCEV	FCBEV	FCREV-v1	FCREV-v3	FCREV-v2
P_{FC}	100 kW	50 kW	20 kW	30 kW	35 kW
C_{Bat}	2,1 kWh	8,8 kWh	20 kWh	20 kWh	20 kWh
WLTC	0,874	0,88	0,95	0,93	0,89
NEDC	0,858	0,87	0,93	0,84	0,84
GrazRDE	0,82	0,83	-	-	0,92
Großglockner	0,8	0,767	-	0,8	0,75