



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

**Analyse eines Brennstoffzellenfahrzeugs
anhand von Längsdynamiksimulation**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer
und

Assoc. Prof. Dr.techn. Peter Hofmann
E315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Johannes Höflinger

0727259

Schwarzspanierstraße 15/4/4, 1090 Wien, Österreich

Wien, am _____

Diplomaufgabe

Herrn Johannes Höflinger, Matr. Nr.: 0727259 wird folgende Diplomaufgabe gestellt:

“Analyse eines Brennstoffzellenfahrzeugs anhand von Längsdynamiksimulation“

Folgende Arbeiten sind durchzuführen:

Es soll ein Simulationsmodell eines Brennstoffzellenfahrzeuges erstellt und hinsichtlich Kraftstoffverbrauch analysiert und bewertet werden. Fokus der Untersuchung soll die Modellierung der Brennstoffzelle sein. Für den Vergleich mit bereits bestehenden Brennstoffzellenfahrzeugen sollen möglichst reale Komponenten und spezifizierte Fahrzyklen verwendet werden.

Im Einzelnen sind folgende Punkte zu bearbeiten:

- Literaturrecherche bezüglich Brennstoffzellensysteme
- Komponentenauswahl für das Brennstoffzellenfahrzeug
- Erstellung eines Brennstoffzellenfahrzeug-Längsdynamikmodells in GT-SUITE
- Analyse und Bewertung des Kraftstoffverbrauchs in spezifizierten Fahrzyklen
- Analyse unterschiedlicher Brennstoffzellen-Betriebsstrategien
- Vergleich des Modells mit vergleichbaren Brennstoffzellenfahrzeugen

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Analyse eines Brennstoffzellenfahrzeugs anhand von Längsdynamiksimulation

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am _____

Johannes Höflinger

Kurzfassung

Im Zuge der Entwicklung von alternativen Antriebskonzepten für Fahrzeuge stellt die PEM-Brennstoffzelle aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades und lokaler Emissionsfreiheit eine vielversprechende Lösung dar. Um die Verhaltensweise der Komponenten, die Wirkungsgrade und damit entstehenden Energieverluste entlang des Antriebsstranges eines Brennstoffzellenfahrzeuges zu untersuchen, wurde in dieser Arbeit mithilfe der Simulationssoftware *GT-SUITE* ein Längsdynamiksimulationsmodell erstellt. Dadurch konnten nach Erläuterung des zugrundeliegenden Modells anhand von ausgewählten Fahrzyklen der Kraftstoffverbrauch des Fahrzeuges und die Leistungsbedarfe der einzelnen Komponenten, wie etwa des Luftkompressors, ermittelt werden. In weiterer Folge wurde der Einfluss von unterschiedlichen Parametern, wie der Brennstoffzellentemperatur und des Systemdruckes, auf die Energieverluste dargelegt. Ebenso konnte die Dimensionierung der Batterie und der Brennstoffzelle hinsichtlich der Fahrzyklen erläutert werden. Drei Betriebsstrategien der Brennstoffzelle wurden zwecks Kraftstoffverbrauchsreduzierung verglichen, wobei die Kraftstoffverbräuche der zwei alternativen Betriebsstrategien im Vergleich zur Referenzstrategie keine nennenswerten Einsparungen aufwiesen. Jedoch zeigten sich unterschiedliche Verluste und Verhalten der einzelnen Fahrzeugkomponenten, sodass diese Erkenntnisse als Grundlage für erweiterte Strategien herangezogen werden können.

Abstract

With the development of alternative drive concepts for vehicles, the PEM-fuel cell constitutes a highly promising solution due to its high efficiency and local zero emissions. In order to analyze the behavior of the components, the efficiency and thus energy losses along the drive train, a model capable of simulating the longitudinal dynamics of the vehicle was build in the simulation software *GT-SUITE*. In this way, after outlining the underlying model, the fuel consumption of the vehicle and the power consumption of the vehicle components, e.g. of the aircompressor, could be determined by means of driving cycle-analysis. Furthermore the influence of different parameters regarding the energy losses, such as the fuel cell temperature and system pressure, was demonstrated. Likewise the dimension of the battery and fuel cell concerning the driving cycles was elucidated. Three different operating strategies of the fuel cell were compared for the purpose of lowering the fuel consumption, whereby none of the two alternative strategies showed considerable reduction in contrast to the reference strategy. However, different energy losses and behaviors of the vehicle components were exhibited, so that these insights could be used for advanced strategies.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Personen bedanken, die während der Erstellung dieser Arbeit unterstützend dazu beigetragen haben. Besonderer Dank gilt Prof. Dr. Bernhard Geringer und Prof. Dr. Peter Hofmann, welche durch die Themenvergabe diese Diplomarbeit erst möglich gemacht haben. Ebenso möchte ich besonders meinem direkten Betreuer Dipl.-Ing. Thorsten Krenek, Bakk.techn. für all die Beihilfe, die Denkanstöße und den Leitfaden danken. Ausdrücklich erwähnt seien an dieser Stelle auch meine Eltern, welche in jedweder Weise ihre Unterstützung zeigten.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BHKW	Blockheizkraftwerk
BZ	Brennstoffzelle
DC	Direct Current
FC	Fuel Cell
HHV	Higher Heating Value
LHV	Lower Heating Value
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NEDC	New European Driving Cycle
PEM	Polymerelektrolytmembran
PKW	Personenkraftwagen
SFTP	Supplemental Federal Test Procedure
SOC	State Of Charge
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
US06	Supplemental Federal Test Procedure (SFTP)

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	V	Parameter der Aktivierungsverluste
A	cm ²	Fläche
a	-	Aktivität
C	V	Druckeinflussparameter
c_p	J/kg/K	spezifische Wärmekapazität
E	V	Spannung
E^0	V	Spannung bei Standarddruck
F	C	Faraday Konstante
G	J	Gibbsfunktion
$\Delta\bar{g}_f$	J/mol	Änderung der molaren Gibbsschen Energie
H	J	Enthalpie
\dot{H}_2	mol/s	Wasserstoffmolenstrom
h	W/K/m ²	Wärmeübergangskoeffizient
$\Delta\bar{h}_f$	J/mol	Änderung der molaren Bildungsenthalpie
I	A	Strom
i	A/cm ²	Stromdichte
i_0	A/cm ²	spezifische Austauschstromdichte
i_{limit}	A/cm ²	limitierende Stromdichte
i_n	A/cm ²	interne Stromdichte
m	V	Parameter der Konzentrationsverluste
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
\dot{N}	mol/s	Molenstrom
n	cm ² /A	Parameter der Konzentrationsverluste

Zeichen	Einheit	Bedeutung
n	-	Zellenanzahl
\dot{O}_2	mol/s	Sauerstoffmolenstrom
P	W	Leistung
p	W/cm ²	Leistungsdichte
P	bar	Druck
P^0	bar	Standarddruck
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R	J/K	Universelle Gaskonstante
R_{ohm}	Ω	ohmscher Widerstand
R_{int}	Ω	Innenwiderstand
R_{Rad}	m	Reifenradius
r_{ohm}	$\Omega \text{ cm}^2$	spezifischer ohmscher Widerstand
S	J/K	Entropie
$\Delta \bar{s}$	J/K/mol	Änderung der molaren Entropie steht
T	K	Temperatur
u	-	Übersetzungsverhältnis
V_C	V	tatsächliche Spannung
V_{OC}	V	Leerlaufspannung
ΔV_{act}	V	Aktivierungsspannungsverluste
ΔV_{compr}	V	Spannungsverluste Kompressor
ΔV_{conc}	V	Konzentrationsspannungsverluste
ΔV_{gain}	V	Spannungserhöhung durch Druck
ΔV_{netto}	V	Nettospannung
ΔV_{ohm}	V	ohmsche Spannungsverluste
v	m/s	Geschwindigkeit
\dot{W}_{compr}	W	Kompressorleistung
z	-	Anzahl übertragener Elektronen

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	-	Ladungstransferkoeffizient
α_i	-	Molenbruch der Komponente i
η	-	Wirkungsgrad
η_C	-	Carnot-Wirkungsgrad
$\eta_{coulomb}$	-	coulombsche Wirkungsgrad
η_m	-	Wirkungsgrad Elektromotor
κ	-	Isentropenexponent
λ	-	Luftzahl
ω	rad/s	Drehzahl

Inhaltsverzeichnis

Diplomaufgabe	i
Eidesstattliche Erklärung	ii
Kurzfassung	iii
Abstract	iv
Danksagung	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
Formelzeichen	vii
1 Einleitung	1
2 Problemstellung	2
3 Die Brennstoffzelle	3
3.1 Funktion und Aufbau	3
3.2 Geschichtliche Entwicklung	5
3.3 Brennstoffzellentypen	5
3.4 Brennstoffzelle im Automotive-Bereich	7
3.5 Modell	8
3.5.1 Freie Gibbssche Energie	8
3.5.2 Zellenspannung im Leerlauf	8
3.5.3 Spannungsverluste im Betrieb	10
3.5.4 Wirkungsgrad	12
3.5.5 Kennlinien der Brennstoffzelle	14

Inhaltsverzeichnis	xi
3.5.6 Kraftstoffverbrauch und Wasserproduktion	14
4 PEM-Brennstoffzellenmodellierung mithilfe der Simulationssoftware GT-SUITE	17
4.1 Bestehendes Modell in <i>GT-SUITE</i>	17
4.1.1 Elektrisch-chemisches Modell	17
4.1.2 Thermisches Modell	21
4.1.3 Leistung der Brennstoffzelle	23
4.2 Eigens aufgebautes Modell in <i>GT-SUITE</i>	24
4.2.1 Modell der elektrisch-chemischen Komponenten	25
4.2.2 Modell der thermischen Komponenten	25
4.2.3 Vor- und Nachteile des eigens aufgebauten Modells	25
5 Modell des gesamten Fahrzeuges	27
5.1 Fahrermodell und Leistungsfluss	27
5.2 Fahrzeug	30
5.3 Elektrische Komponenten	30
5.3.1 Elektromotor	30
5.3.2 Batterie	32
5.3.3 DC-DC Konverter	33
5.4 Komponenten des Brennstoffzellensystems	33
5.5 Betriebsstrategie der Brennstoffzelle	36
5.6 Wirkungsgrad des gesamten Brennstoffzellensystems	39
5.7 Einfluss des Druckes auf das Brennstoffzellensystem	40
5.8 Rekuperation	43
5.9 Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs	44
5.10 Maximale Beschleunigung	45
5.11 Wirkungsgradkette	48
6 Fahrzyklenanalyse	50
6.1 Verhalten der Brennstoffzelle während des NEFZ und US06	52
6.2 Verluste und Fahrwiderstände im NEFZ und US06	59
6.3 Analyse der Verluste durch Parametervariation	62
6.4 Minimale Brennstoffzellengröße und Batteriekapazität	71
6.5 Vergleich unterschiedlicher Betriebsstrategien der Brennstoffzelle	75
6.5.1 Betriebsstrategien im US06	76

Inhaltsverzeichnis	xii
6.5.2 Betriebsstrategien im NEFZ	80
6.5.3 Betriebsstrategien im innerstädtischen Teil des NEFZ	85
6.5.4 Fazit aus der Analyse unterschiedlicher Betriebsstrategien	85
7 Zusammenfassung	88
8 Ausblick	90
Quellenverzeichnis	91
Literatur	91
Online-Quellen	92

Kapitel 1

Einleitung

Mit der Entwicklung von Fahrzeugantriebskonzepten hin zu lokaler Emissionsfreiheit und Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern stellt die PEM-Brennstoffzellentechnik eine vielversprechende Alternative zum Verbrennungsmotor dar. Mit unter Hochdruck gespeicherten gasförmigen Wasserstoff als Kraftstoff wandelt die Brennstoffzelle diesen in Wasser und elektrische Energie um, ohne schädliche Abgase als Nebenprodukte. Weiters bietet der in Verbindung mit diesem Energiewandler verwendete Elektromotor als Fahrzeugantrieb einige Vorteile gegenüber Verbrennungskraftmaschinen, wie z.B. das bereits bei Stillstand maximal lieferbare Drehmoment und die nahezu verzögerungsfreie Ansprechbarkeit. Um unterschiedliche Einflüsse und das Verhalten der einzelnen Komponenten des Brennstoffzellenantriebssystems abzuschätzen, wurde in dieser Arbeit in dem Simulationsprogramm *GT-SUITE* ein Brennstoffzellenfahrzeug aufgebaut. Dadurch konnten relativ einfach Auswirkungen unterschiedlicher Parameter, Komponentendimensionen und Betriebsstrategien auf die Fahrzeugperformance und den Kraftstoffverbrauch analysiert werden.

Kapitel 2

Problemstellung

Zu Beginn dieser Arbeit ist eine Recherche zum aktuellen Stand der verwendeten Brennstoffzellentechnik im Automotive-Bereich durchzuführen. In weiterer Folge ist in der Simulationssoftware *GT-SUITE* ein Modell eines gesamten Fahrzeuges mit Brennstoffzellenantrieb aufzubauen. Dazu sollen bereits bestehende Komponenten adaptiert werden, um diese in das Gesamtmodell einfließen zu lassen. Anhand dessen soll das Antriebssystem durch Längsdynamiksimulation analysiert werden. Dazu ist das Brennstoffzellenmodell und dessen Funktionsweise zu erläutern und der Einfluss von Parametern des Brennstoffzellensystems, wie Druck und Temperatur, zu untersuchen. Weiters sollen mit Hilfe des gesamten Fahrzeugmodells Aussagen über Effizienz und Verluste der einzelnen Systemkomponenten anhand ausgewählter Fahrzyklen getroffen werden. Die Auswirkungen von unterschiedlichen Betriebsstrategien der Brennstoffzelle hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches und der Energieverluste sowie die Dimensionierung von Batterie und Brennstoffzelle sollen aufgezeigt werden.

Kapitel 3

Die Brennstoffzelle

3.1 Funktion und Aufbau

Die Funktion der Brennstoffzelle ist ähnlich der einer Batterie. Die chemische Energie wird aber nicht in der Zelle gespeichert, sondern aus einem kontinuierlichen Gasstrom gewonnen. Die Brennstoffzelle ist also ein Energiewandler und kein Energiespeicher. Dennoch weist sie im Aufbau einige Ähnlichkeiten mit einer Batterie auf, weshalb sie im 19. Jahrhundert nach ihrer Entdeckung auch "gaseous voltaic battery" genannt wurde. Eine Zelle besteht im Wesentlichen aus einer Anode, einem Elektrolyten und einer Kathode, [Abbildung 3.1](#), [1]. Bei der Wasserstoffbrennstoffzelle werden an der Anode von jedem zugeführten Wasserstoffmolekül (H_2) zwei Elektronen abgespalten und über einen

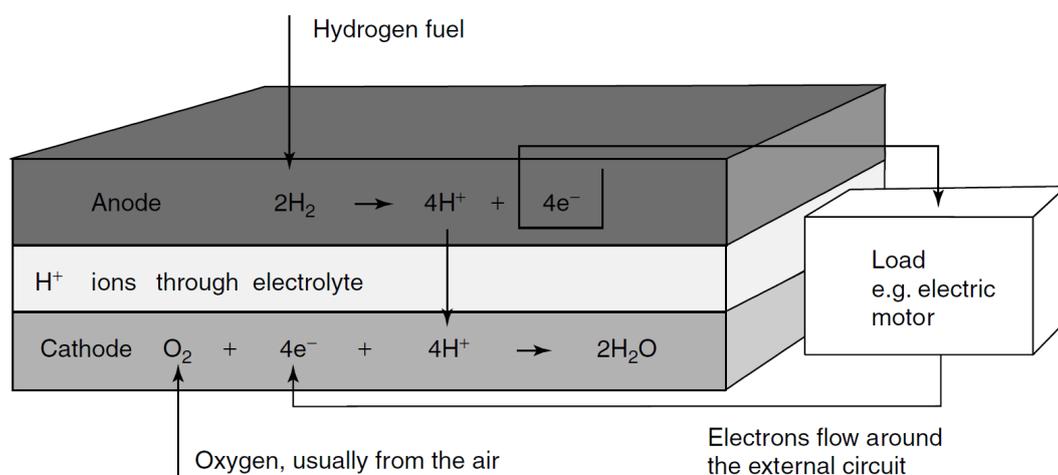
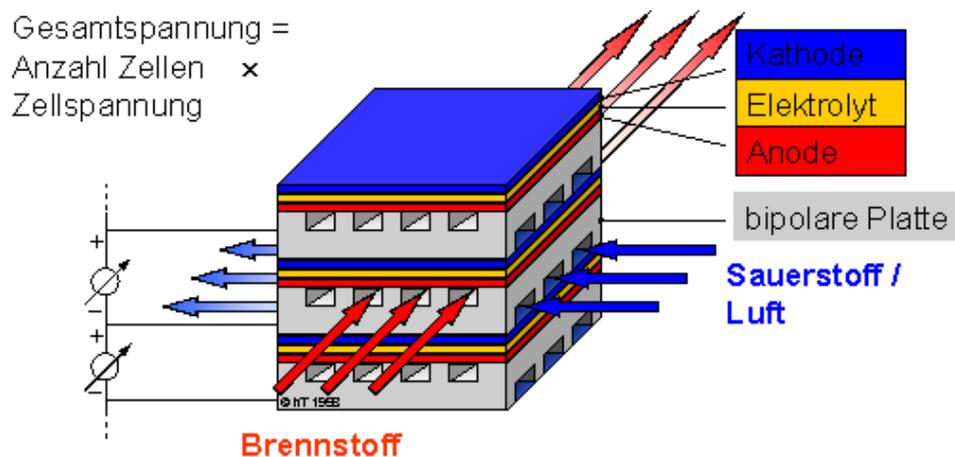


Abbildung 3.1: Prinzip einer Brennstoffzelle [1].

Aufbau einer Brennstoffzelle (planares Zelldesign)



Universität Hannover
Institut für Thermodynamik



Abbildung 3.2: Brennstoffzellen-Stack mit Gasströmen [13].

elektrischen Leiter über die Last (z.B. Elektromotor, Akku) zur Kathode geleitet. Der Elektrolyt ist für die positiv geladenen Wasserstoffatome durchlässig. An der Kathode bildet der zugeführte Sauerstoff, die Wasserstoffionen und die Elektronen das Reaktionsprodukt Wasser (H_2O). Die Gesamtreaktion, [Gleichung 3.1](#), lautet also wie die der Verbrennung von Wasserstoff,



wobei die chemische Energie in elektrische Energie und Wärme umgewandelt wird. Die abgreifbare Leerlaufspannung zwischen Anode und Kathode wird von der Reaktionsenthalpie bestimmt. Ähnlich wie bei einer Batterie lassen sich durch Serienschaltung von mehreren Brennstoffzellen die Spannung erhöhen (ein sogenannter Brennstoffzellen-Stack) und durch Vergrößerung der aktiven Reaktionsfläche die Stromstärken erhöhen. [Abbildung 3.2](#) zeigt einen Stack mit den Gaskanälen. Zwischen den Zellen liegen bipolare Platten (der Name bipolar kommt daher, da sie positive und negative Pole zweier Zellen verbinden)

die meist aus Graphit, Edelstahl oder einem anderen leitfähigen Material gefertigt werden [1]. In ihren Kanälen fließen das Kühlmittel und die Wasserstoffgas- und Luft- oder Sauerstoffströme. Anoden und Kathoden sind porös und mit einem Katalysator versehen, um die Reaktionsgeschwindigkeit zu erhöhen.

3.2 Geschichtliche Entwicklung

Die erste funktionsfähige Brennstoffzelle präsentierte der britische Anwalt und Wissenschaftler Sir William Robert Grove (1811-1896) im Jahre 1839 [1]. Er spaltete mithilfe von elektrischem Strom Wasser (H_2O) in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2), heute auch bekannt als Elektrolyse. Umgekehrt gelang es ihm, Wasserstoff und Sauerstoff ohne Verbrennung wieder zu Wasser zu kombinieren und dabei einen elektrischen Strom zu messen, das Prinzip der Brennstoffzelle. Er verwendete als Elektrodenmaterial Platin, da es als Katalysator für Reaktionen der Reaktanten Wasserstoff und Sauerstoff bekannt war, und als Elektrolyten wässrige Schwefelsäure. Mond und Langer entdeckten 1889 durch Einbetten des flüssigen Elektrolyten in einer Matrix eine wesentliche Verbesserung und stellten die erste praktisch nutzbare Brennstoffzelle her [2]. Danach erfolgten einige Versuche, Kohle mithilfe der Brennstoffzellentechnik und dadurch höheren Wirkungsgraden direkt zu verstromen, da die damaligen Dampfmaschinen nur Wirkungsgrade um 10% aufwiesen. Daraus entstanden verschiedene Typen von Brennstoffzellen, [Abbildung 3.3](#). 1965 wurde die Alkalische Brennstoffzelle in der bemannten Raumfahrt für das Apollo-Programm eingesetzt, um die Strom- und Wasserversorgung zu gewährleisten (Vorteil der geringeren Masse gegenüber Batterien). In weiterer Folge wurde sie auch für die Raumfähre Space-Shuttle verwendet. Im Raumfahrtprogramm Gemini kamen Feststoff Polymerelektrolytzellen zum Einsatz. In den 1990er Jahren wurde durch die Verbesserung der Polymerzellen die Versuchsfahrzeugserie NeCar entwickelt. Weitere Anwendungsbereiche von Brennstoffzellen sind derzeit unter anderem U-Boote, Direktmethanolzellen in tragbaren Elektronikgeräten und Strom und Wärmeerzeugung in Blockheizkraftwerken (BHKW).

3.3 Brennstoffzellentypen

Gewöhnlicherweise werden die verschiedenen Typen von Brennstoffzellen nach den verwendeten Elektrolyten eingeteilt, wobei sich dadurch auch die Arbeitstemperatur ergibt und in weiterer Folge auch das Material der Elektroden, Katalysatoren, bipolaren Platten

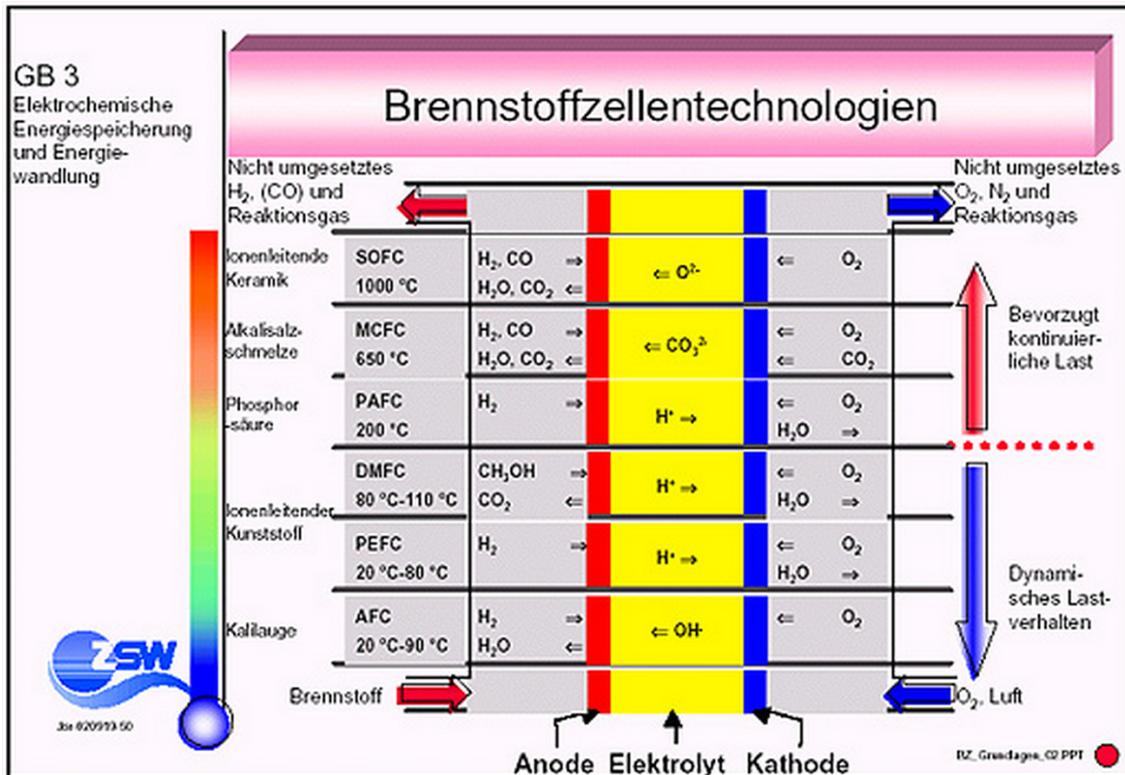


Abbildung 3.3: Überblick über Brennstoffzellentypen, Temperaturbereiche, Elektrolyte, Lastverhalten und Ladungsträger [14].

und Reinheit des als Kraftstoff verwendeten Wasserstoffs [1], [3], siehe [Abbildung 3.3](#). [Abbildung 3.4](#) zeigt die Leistungs- und Anwendungsbereiche der verschiedenen Typen. Der Kraftstoff kann entweder vor der Verwendung in der Zelle je nach Arbeitstemperatur zu Wasserstoff umgewandelt werden oder aber direkt verwendet werden. Daher kann man alternativ die Zellen auch nach dem direkt verwendeten Kraftstoff kategorisieren: Wasserstoff, Methanol (CH₄O) und Kohle. Die Direktverstromung von Kohle gelingt bis heute nicht befriedigend und ist noch Teil der Forschung.

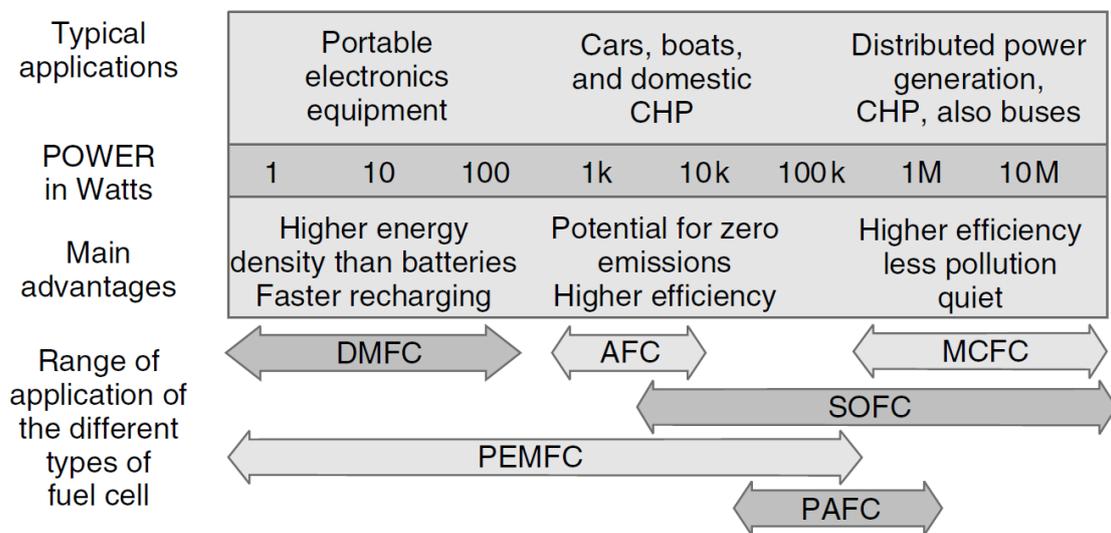


Abbildung 3.4: Leistungs- und Anwendungsbereiche von Brennstoffzellen [1].

3.4 Brennstoffzelle im Automotive-Bereich

Das erste brennstoffzellenbetriebene Fahrzeug, den Electrovan, stellte General Motors 1966 vor [2], [15]. Er hatte ein Gewicht von 3400kg, zwei Sitzplätze und eine alkalische Brennstoffzelle (32 kW kontinuierlich) als Antrieb. Die Kraftstoffe Wasserstoff und Sauerstoff wurden in Flüssigtanks gespeichert, mit denen der Electrovan eine Reichweite von 240 km aufwies. Durch den erfolgreichen Einsatz von luftbetriebenen PEMFC im Automotive-Bereich des Unternehmens Ballard Power Systems in den 1980er Jahren wurden nahezu alle anderen Brennstoffzellentypen in diesem Bereich verdrängt. Der Sauerstoff muss nicht extra in Tanks mitgeführt werden und auch die Temperatur der Brennstoffzelle liegt mit etwa 80°C unter der der anderen Typen. Dynamische Lastverhalten, der feste Elektrolyt und die höhere Leistungsdichte (Leistung pro m² Zellfläche) sind weitere Vorteile der PEMFC für den Automotive-Bereich. Die SOFC, die ebenfalls einen festen Elektrolyten besitzen, kommen aufgrund von Betriebstemperaturen von 1000°C vermehrt in der stationären Stromerzeugung, unter anderem in Kombination mit Gasturbinen, zum Einsatz. Daher sind seit Mitte der 1990er Jahre nahezu ausschließlich PEM-Brennstoffzellen für den Automotive-Bereich in Verwendung [15], [16]. Nach einigen Prototypen wie z.B. der NECAR Serie (1-5) von Daimler wird Toyota 2015 mit dem Toyota FCV das erste Serienfahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb auf den Markt bringen.

3.5 Modell

In den folgenden Unterkapiteln werden die physikalischen Grundlagen und Gleichungen zur Berechnung der Leerlaufspannung einer Brennstoffzelle erläutert. Weiters werden die Spannungsverluste im Betrieb sowie die Berechnung des Wirkungsgrades und Kraftstoffverbrauchs ausgeführt und die Kennlinie einer Brennstoffzelle erläutert.

3.5.1 Freie Gibbsche Energie

Die freie Gibbsche Energie ist jene Energie, die maximal aus einem chemischen Energieträger in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Die in einer Brennstoffzelle entstehende elektrische Spannung hängt ebenfalls von der freien Gibbschen Energie ab und somit auch von der chemischen Reaktion des Kraftstoffes. In einer Wasserstoffbrennstoffzelle reagieren Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, siehe [Gleichung 3.1](#). Mit der Gibbsfunktion G , der Enthalpie H und Entropie S gilt [Gleichung 3.3](#), [1]:

$$G = H - TS. \quad (3.2)$$

Ausschlaggebend ist die Änderung der freien Gibbschen Energie

$$\Delta\bar{g}_f = \Delta\bar{h}_f - T\Delta\bar{s} \quad (3.3)$$

der Reaktion, wobei $\Delta\bar{g}_f$ für die Änderung der molaren Gibbschen Energie, $\Delta\bar{h}_f$ für die Änderung der molaren Bildungsenthalpie, T für die Temperatur und $\Delta\bar{s}$ für die Änderung der molaren Entropie steht. Die Werte für $\Delta\bar{g}_f$, $\Delta\bar{h}_f$ und $\Delta\bar{s}$ sind temperaturabhängig und liegen für verschiedene Reaktionen in tabellierter Form vor. [Tabelle 3.1](#) zeigt die Werte der Änderung der freien Gibbschen Energie.

3.5.2 Zellenspannung im Leerlauf

Mit der Änderung der freien Gibbschen Energie $\Delta\bar{g}_f$ und der Faraday Konstante F

$$F = 96485 \text{ C} \quad (3.4)$$

ergibt sich die Zellenspannung im Leerlauf E zu

$$E = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{zF} \quad (3.5)$$

Tabelle 3.1: Änderung der molaren Gibbsschen Energie $\Delta\bar{g}_f$, Leerlaufzellenspannung (electromotive force EMF) und maximaler Wirkungsgrad für die Reaktion $\text{H}_2 + 0.5 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ bei unterschiedlichen Temperaturen [1].

Form of water product	Temp °C	$\Delta\bar{g}_f$, kJ mol ⁻¹	Max EMF V	Efficiency limit %
Liquid	25	-237.2	1.23	83
Liquid	80	-228.2	1.18	80
Gas	100	-225.2	1.17	79
Gas	200	-220.4	1.14	77
Gas	400	-210.3	1.09	74
Gas	600	-199.6	1.04	70
Gas	800	-188.6	0.98	66
Gas	1000	-177.4	0.92	62

wobei z die Anzahl an Elektronen angibt, die pro Molekül Kraftstoff übertragen werden. Für die Wasserstoffreaktion gilt $z = 2$ [1], [2]. Damit ergeben sich für eine Wasserstoffbrennstoffzelle folgende in [Tabelle 3.1](#) angegebene Spannungen. Dieser grundsätzliche Zusammenhang gilt nicht nur speziell für Brennstoffzellen, sondern für jede elektrochemische Energiequelle. Z.B. lassen sich damit auch die Spannung von Primärzellen (Batterien) oder Sekundärzellen (Akkumulatoren) berechnen was wiederum die Analogie zur Brennstoffzelle zeigt. Zusätzlich zur Temperaturabhängigkeit der freien Gibbsschen Energie und somit auch der Spannung beschreibt die Nernst-Gleichung die Druckabhängigkeit der Spannung, für die Wasserstoffbrennstoffzelle gilt [Gleichung 3.6](#).

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{a_{\text{H}_2} \cdot a_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \quad (3.6)$$

Darin ist E^0 die Spannung bei Standarddruck (0.1 MPa) die in [Tabelle 3.1](#) gegeben ist und a die Aktivitäten der Edukte und Produkte. Im Logarithmus stehen die Aktivitäten potenziert mit ihrem stöchiometrischen Koeffizienten, also im Zähler die Edukte und im Nenner die Produkte. Mit der Annahme, dass alle Gase ideale Gase sind, lässt sich die

Aktivität als Quotient von Partialdruck P und Standarddruck $P^0 = 0.1 \text{ MPa}$ schreiben, siehe [Gleichung 3.7](#).

$$a = \frac{P}{P^0} \quad (3.7)$$

Für die Aktivität von flüssigem Wasser gilt $a_{H_2O} = 1$ ¹. Für detailliertere Informationen zum Thema Aktivität sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. Damit lässt sich die Leerlaufspannung einer Wasserstoffzelle in Abhängigkeit der Temperatur und der Partialdrücke mit [Gleichung 3.8](#) berechnen,

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3.8)$$

wobei eine Erhöhung der Partialdrücke der Reaktanten eine höhere Spannung ergibt.

3.5.3 Spannungsverluste im Betrieb

Die Spannung einer Brennstoffzelle weist im Betrieb einen niedrigeren Wert auf als im Leerlauf. Die strom- und temperaturabhängigen Spannungsverluste werden im Folgenden erläutert (die Temperaturabhängigkeit wird oft vernachlässigt, da die Zellen meist bei einer möglichst konstanten optimalen Temperatur betrieben werden).

Aktivierungsverluste

Der Spannungsabfall der Aktivierungsverluste ist gegeben durch die Tafel-Gleichung [3.9](#), mit dem Ladungstransferkoeffizienten α , [1], [4].

$$\Delta V_{act} = \frac{RT}{\alpha z F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (3.9)$$

Sie gilt nur wenn die Stromdichte größer ist als die spezifische Austauschstromdichte $i > i_0$ ist (i_0 steigt gewöhnlich mit der Temperatur an und vermindert deshalb bei höheren Temperaturen die Aktivierungsverluste). Fasst man die Werte vor dem Logarithmus als $A = \frac{RT}{\alpha z F}$ zusammen und nimmt man eine interne Stromdichte i_n an (jener Strom der nicht über die Last, sondern über den Elektrolyten fließt), können die Aktivierungsverluste

¹Liegt zusätzlich zur flüssigen Phase auch gasförmiges Wasser vor, gilt für die Aktivität des gasförmigen Wassers $a_{H_2O} = P_{H_2O}/P_{H_2O}^0$ wobei $P_{H_2O}^0$ der Dampfdruck bei der entsprechenden Temperatur ist.

nach [Gleichung 3.10](#) modelliert werden.

$$\Delta V_{act} = A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right). \quad (3.10)$$

Typische Werte einer Polymerelektrolytmembranzelle (PEMFC) sind $A = 0.06 \text{ V}$, $i_0 = 0.04 \text{ mAcm}^{-2}$ und $i_n = 3 \text{ mAcm}^{-2}$. Um die Verluste zu verringern, kann die Rauheit Elektroden (und damit die tatsächliche Oberfläche), die Temperatur und der Druck erhöht werden oder ein effektiverer Katalysator verwendet werden (wie z.B. Platin (Pt)).

Ohmsche Verluste

Der Spannungsverlust durch den ohmschen Widerstand der Elektroden und den Widerstand des Elektrolyten gegen den Ionenfluss R_{ohm} oder als spezifischen Widerstand r_{ohm} (Widerstand mal Fläche) kann proportional dem Strom I oder der Stromdichte i (Strom pro Fläche) angegeben werden, siehe [Gleichung 3.11](#), [1], [4].

$$\Delta V_{ohm} = i r_{ohm} \quad (3.11)$$

Meistens wird anstatt des Stromes I die Stromdichte i angegeben, dadurch lassen sich Zellen unterschiedlicher Größe (Fläche) besser vergleichen. Typische Werte für r sind für eine Polymerelektrolytmembranzelle (PEMFC) $2.45 \cdot 10^{-4} \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ und für eine Feststoff-oxidzelle (SOFC) $2 \cdot 10^{-3} \text{ k}\Omega\text{cm}^2$ [1].

Konzentrationsverluste

Die Verluste entstehen bei höheren Stromdichten zufolge von verringerten Gaskonzentrationen an der Anode und insbesondere zu geringen Sauerstoffkonzentrationen an der Kathode beim Betrieb mit Luft. Dies kann entweder durch zu hohe Wassergehalte oder auch durch zu langsamen Transport der Edukte zu der Katalysatoroberfläche bedingt sein² [1], [4]. Modelliert werden die Verluste mit [Gleichung 3.12](#), wobei i_{limit} die limitierende Stromdichte ist (bei dieser Stromdichte gehen die Verluste gegen unendlich).

$$\Delta V_{conc} = -\frac{RT}{zF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_{limit}} \right) \quad (3.12)$$

²Deshalb werden diese Verluste in der englischsprachigen Literatur auch mit *Mass Transport Losses* bezeichnet.

Da dies eine mit der Stromdichte exponentiell ansteigende Verlustspannung ergibt, werden die Konzentrationsverluste auch mit den Parametern m und n mit [Gleichung 3.13](#) dargestellt.

$$\Delta V_{conc} = m \exp(ni) \quad (3.13)$$

Typische Werte der Parameter sind $m = 3 \cdot 10^{-5} \text{ V}$ und $n = 8 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ mA}^{-1}$.

3.5.4 Wirkungsgrad

Der Carnot-Wirkungsgrad ist mit dem höchsten Temperaturniveau T_1 und dem niedrigsten Temperaturniveau T_2 in Kelvin definiert als

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (3.14)$$

und gibt den maximal möglichen Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen an. Bei der Verstromung von Wasserstoff mithilfe einer Verbrennungskraftmaschine würde dieser maximale Wirkungsgrad zur Anwendung kommen. Setzt man Wasserstoff in einer Brennstoffzelle um, ist ein anderer maximaler Wirkungsgrad ausschlaggebend. Damit kann man mit dem Brennwert³ $\Delta \bar{h}_f$ eines Energieträgers und der freien Gibbschen Energie den maximalen Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle definieren als

$$\eta = \frac{\Delta \bar{g}_f}{\Delta \bar{h}_f}. \quad (3.15)$$

[Abbildung 3.5](#) zeigt den Vergleich der beiden Wirkungsgrade und den Vorteil eines hohen Wirkungsgrades der Brennstoffzellen bei niedriger Temperatur (dieser Vorteil wird aber teilweise durch temperaturabhängige Spannungsverluste im Betrieb, [Kapitel 3.5.3](#), wieder relativiert). Würde die gesamte chemische Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie umgewandelt werden, beträgt die Zellenspannung nach [Gleichung 3.16](#) mit dem Brennwert \bar{h}_f 1.48 V. Setzt man statt des Brennwertes den Heizwert ein, ergibt dies eine Zellenspannung von 1.25 Volt.

$$E = \frac{\Delta \bar{h}_f}{zF} \quad (3.16)$$

³Englisch: Higher Heating Value HHV, Reaktionsprodukt Wasser liegt in flüssiger Form vor, nicht zu verwechseln mit dem Heizwert, bei dem das Reaktionsprodukt Wasser als Dampf vorliegt, Englisch: Lower Heating Value LHV. Der Brennwert ist höher als der Heizwert, dadurch ergeben sich höhere Wirkungsgrade falls auf den Heizwert bezogen wird.

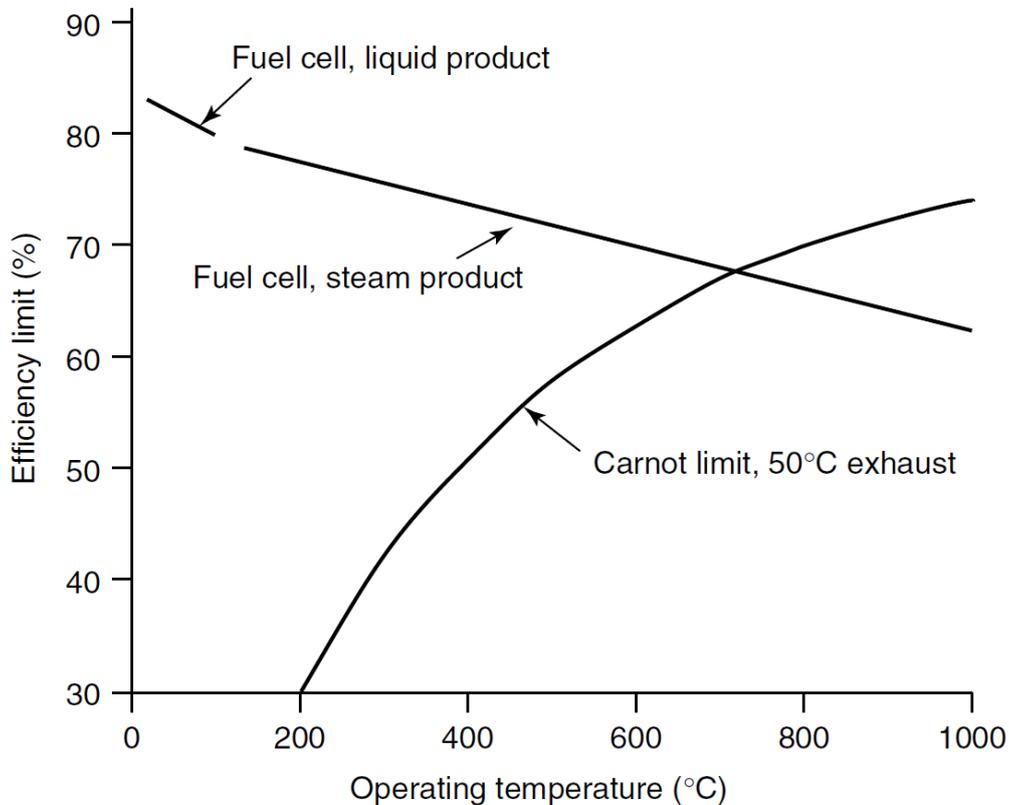


Abbildung 3.5: Vergleich von Carnotwirkungsgrad mit dem niedrigen Temperaturniveau bei 50°C und maximalen Brennstoffzellenwirkungsgrad [1].

Dadurch kann der Wirkungsgrad im Betrieb auch als Quotient aus tatsächlicher Spannung V_C und idealer maximaler Spannung (1.48 V) angegeben werden.

$$\eta = \frac{V_C}{1.48V} \quad (3.17)$$

Dies ist insbesondere hilfreich bei der Berechnung der entstehenden Wärme im Betrieb. Nimmt man an, dass im Endeffekt nur gasförmiges Wasser vorliegt (was im Betrieb nahezu immer der Fall ist) kann die Heizleistung \dot{Q} von n Zellen in Serie mit dem Strom I mit

$$\dot{Q} = nI(1.25 - V_C) \text{ W} \quad (3.18)$$

berechnet werden. Zieht man von der Heizleistung \dot{Q} den durch die Kühlung abgeführten Wärmestrom $\dot{Q}_{kühl}$ ab, ergibt sich der Wärmestrom \dot{Q}_{Stack} , mit welchem die Änderung der inneren Energie des Stack berechnet wird. Mit der spezifischen Wärmekapazität der Brennstoffzelle c_p (es kann angenommen werden, dass der Großteil der Zelle aus den

bipolaren Platten (z.B. Graphit) besteht, spezifische Wärmekapazität Graphit $c_p = 691 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) und der Masse m kann durch Integration des Wärmestromes die Änderung der Temperatur des Stacks berechnet werden, siehe [Gleichung 3.19](#) [4].

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q}_{Stack}}{c_p m} \quad (3.19)$$

3.5.5 Kennlinien der Brennstoffzelle

Trägt man die Leerlaufspannung einer Zelle vermindert um die von der Stromdichte abhängigen Verluste über der Stromdichte auf, ergibt sich die [Abbildung 3.6](#) gezeigte Spannungs-Stromdichte-Kennlinie einer Brennstoffzelle. Die Spannung wird nach [Gleichung 3.20](#) berechnet.

$$V = E - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{act} - \Delta V_{conc} \quad (3.20)$$

Bei geringen Stromdichten dominieren die logarithmischen Aktivierungsverluste, bei moderaten Stromdichten ist ein annähernd linearer Verlauf durch die ohmschen Verluste erkennbar und bei hohen Stromdichten überwiegen die exponentiell ansteigenden Konzentrationsspannungsverluste. Der Wirkungsgrad ist annähernd proportional zur Zellenspannung und kann daher, wie in [Gleichung 3.21](#) angegeben, mit der momentanen Zellspannung V_C berechnet werden.

$$\eta = \frac{V_C}{1.25V} \quad (3.21)$$

Die maximale elektrische Leistung einer Zelle liegt je nach Betriebsdruck und Temperatur bei etwa 0.5 V und 0.9 Acm^{-2} und damit bei 0.45 Wcm^{-2} , wobei bei diesem Betriebspunkt auch der Wirkungsgrad am niedrigsten ist.

3.5.6 Kraftstoffverbrauch und Wasserproduktion

Der Wasserstoffverbrauch einer Wasserstoffbrennstoffzelle ist direkt proportional zum Strom I da für jedes H_2 Molekül (Molmasse $2.02 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$) zwei Elektronen abgespalten werden [1]. Damit ergibt sich der Wasserstoffverbrauch (Kraftstoffverbrauch) eines Stack mit n Zellen in Serie nach [Gleichung 3.22](#).

$$\dot{H}_2 = \frac{In}{2F} \text{ mol s}^{-1}. \quad (3.22)$$

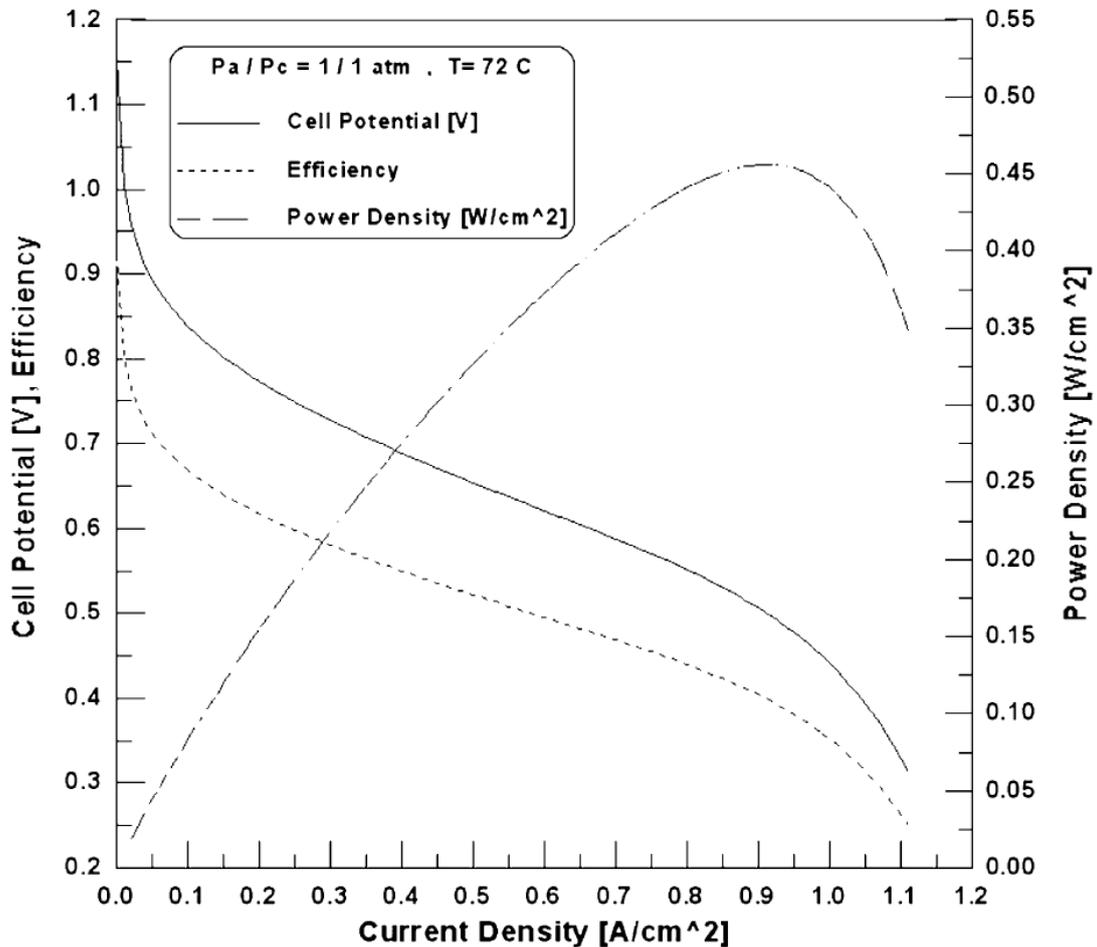


Abbildung 3.6: Zellenspannung, Wirkungsgrad und Leistungsdichte einer PEM-Brennstoffzelle über der Stromdichte mit Luft als Kathodengas bei 72°C und 1 atm Druck [5].

Analog dazu gilt für den Sauerstoffverbrauch, dass vier Elektronen pro Sauerstoffmolekül (O_2 , Molmasse $32 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$) übertragen werden, siehe [Gleichung 3.23](#).

$$\dot{O}_2 = \frac{In}{4F} \text{ mol s}^{-1}. \quad (3.23)$$

Da typischerweise der Sauerstoff aus der Luft (molare Masse $28.97 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$, Molanteil Sauerstoff 0.21) gewonnen wird und mehr als der stöchiometrisch notwendige Sauerstoffstrom angesaugt wird, gilt für den Luftmolenstrom [Gleichung 3.24](#), wobei λ die Luftzahl beschreibt. Eine PEM-Brennstoffzelle wird gewöhnlicherweise mit einem Wert

von $\lambda = 2$ betrieben.

$$\dot{N}_{Luft} = 1.23 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda I n \text{ mol s}^{-1}. \quad (3.24)$$

Für das produzierte Wasser (H_2O , Molmasse $18 \cdot 10^{-3} \text{ kg mol}^{-1}$) gilt der gleiche Molenstrom wie für den Wasserstoff, da für jedes Wasserstoffmolekül ein Wassermolekül entsteht:

$$\dot{N}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{I n}{2F} \text{ mol s}^{-1}. \quad (3.25)$$

Kapitel 4

PEM-Brennstoffzellenmodellierung mithilfe der Simulationssoftware *GT-SUITE*

4.1 Bestehendes Modell in *GT-SUITE*

In *GT-SUITE* (Version 7.3.0 Build 3) lag bereits ein PEM-Brennstoffzellenmodell vor. In diesem Unterkapitel wird dieses durch die Verifikation mit den Modellgleichungen aus [Kapitel 3.5](#) näher erläutert.

4.1.1 Elektrisch-chemisches Modell

Für das bestehende PEM-Brennstoffzellenmodell in *GT-SUITE* ist die Gleichung zur Berechnung der Leerlaufzellenspannung aus der freien Gibbschen Energie angegeben, welche temperaturabhängig ist und in etwa (Abweichung der daraus berechneten Spannung von vernachlässigbaren 0.005 V pro Zelle) den angegebenen Werten in [Tabelle 3.1](#) entspricht. Die Gleichungen für die Abhängigkeit der Leerlaufzellenspannung von den Molenbrüchen und Drücken an der Anode und Kathode sind nicht angegeben, entsprechen aber [Gleichung 3.8](#). Eine Erhöhung der Partialdrücke von Wasserstoff und Sauerstoff von 1 bar auf 5 bar bewirkt eine konstante Zellenspannungserhöhung von 0.034 V pro Zelle (größere Spannungserhöhungen durch den Druck bei größeren Stromdichten sind nicht modelliert). Die Gleichungen für die stromabhängigen Spannungsverluste im Betrieb sind in der Beschreibung des Modells angegeben. Die Aktivierungsverluste entsprechen [Gleichung 3.9](#), wobei die spezifische Austauschstromdichte i_0 keine Konstante

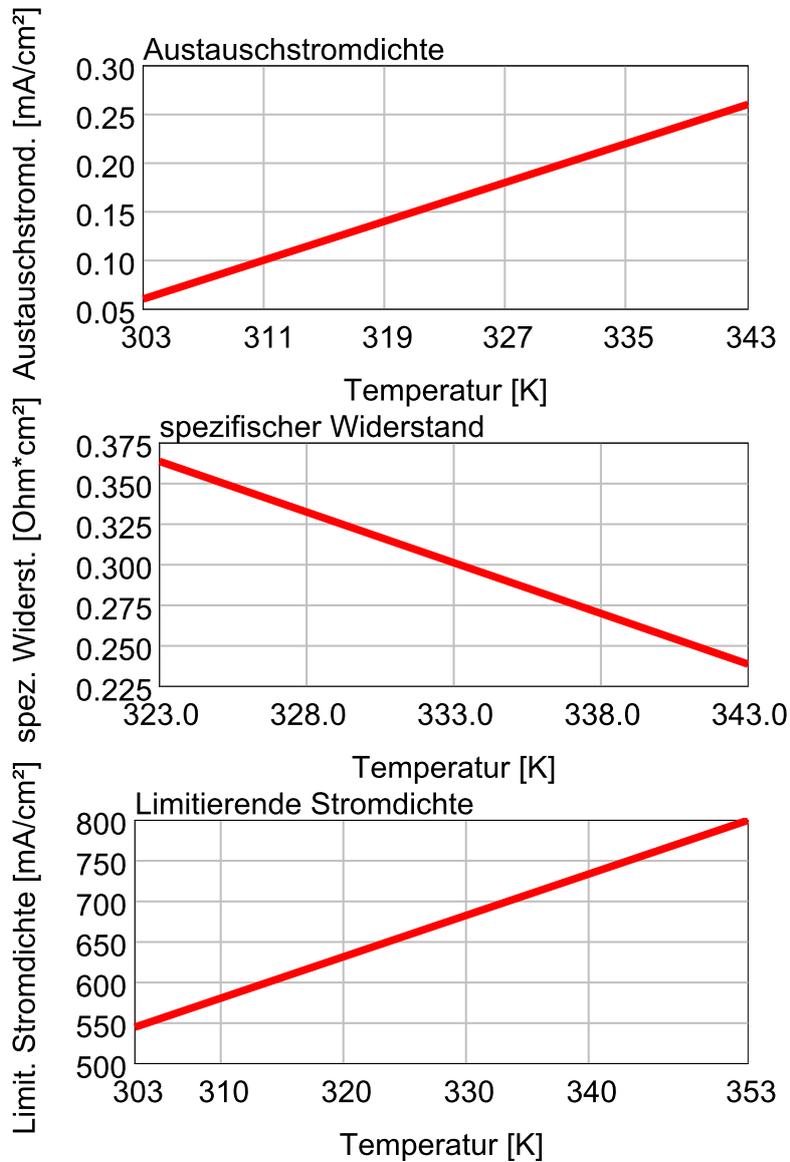


Abbildung 4.1: Temperaturabhängige Parameter zur Modellierung der Spannungsverluste im Betrieb der PEM-Brennstoffzelle.

ist sondern als Funktion der Temperatur angenommen wird, siehe [Abbildung 4.1](#). Für Temperaturen außerhalb der in der Abbildung angegebenen Werte wird linear extrapoliert. Der Ladungstransferkoeffizient α beträgt 0.48. Die Ohmschen Verluste sind nach [Gleichung 3.11](#) modelliert und der temperaturabhängige spezifische Widerstand r_{ohm} ist

in [Abbildung 4.1](#) dargestellt. Für Temperaturen außerhalb des angegebenen Bereichs wird ebenfalls linear extrapoliert. Zu beachten ist, dass in der Abbildung der spezifische Widerstand mit der Einheit Ωcm^2 angegeben ist. Im bestehenden Modell in *GT-SUITE* muss der gesamte Widerstand mit der Einheit Ω angegeben werden. Dies ist insbesondere deshalb nachteilig, da bei einer Parametervariation der Zellenfläche der gesamte Widerstand für die Fläche gleich bleiben würde. Dadurch ergeben sich mit zunehmender Fläche immer größere spezifische Widerstände und die ohmschen Spannungsverluste werden ebenfalls immer größer. Daher wurde in *GT-SUITE* der temperaturabhängige Verlauf des spezifischen Widerstandes mit der Einheit Ωcm^2 eingegeben. Um dem Programm aber den zur Berechnung benötigten Widerstand der gesamten Fläche mit der Einheit Ω zur Verfügung zu stellen, wurden die angegebenen Werte durch die Fläche dividiert. Dadurch bleibt trotz Parametervariation der Zellenfläche der spezifische Widerstand konstant und kann auch, wie in der Literatur üblich, mit der Einheit Ωcm^2 im Programm angegeben werden. Die Konzentrationsverluste entsprechen [Gleichung 3.9](#) wobei die limitierende Stromdichte i_{limit} wiederum temperaturabhängig ist und in [Abbildung 4.1](#) dargestellt ist. Für Werte außerhalb des dargestellten Temperaturbereichs wird wieder linear extrapoliert. Der Term $\frac{RT}{zF}$ aus [Gleichung 3.12](#) wird als konstant angenommen und beträgt in der Modellrechnung 0.027 (der Wert hängt von Brennstoffzelle und Betriebszustand ab [1]). Die in [Abbildung 4.1](#) angegebenen Werte sind aus der Literatur entnommen [6]. Für die limitierenden Stromdichte wurden nur Werte bei einer Temperatur angegeben, daher wurde diese gewählt und die Temperaturabhängigkeit von den bestehenden Werten des Modells aus *GT-SUITE* entnommen. Mit diesen Parametern lässt sich nun in Abhängigkeit der Temperatur und des Stromes die Zellenspannung im Betrieb ermitteln. Der Wasserstoff- und Sauerstoffverbrauch wird nach [Gleichung 3.22](#) und [3.23](#) berechnet und mit der entsprechenden Molmasse in kg s^{-1} umgerechnet. Der Wirkungsgrad wird nach [Gleichung 3.21](#) ermittelt. Die Brennstoffzellenkennlinie ist für verschiedene Temperaturen und konstanten Druck in [Abbildung 4.2](#) dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass bei höheren Temperaturen und Stromdichten die Zellenspannung ebenfalls höher wird. Dies liegt einerseits an dem sinkenden spezifischen Widerstand mit der Temperatur und andererseits an der zunehmenden limitierenden Stromdichte mit der Temperatur (dadurch sinken die Konzentrationsspannungsverluste). Bei höheren Temperaturen ergeben sich somit insgesamt geringere Spannungsverluste. Der Einfluss der Temperatur auf die Aktivierungsverluste, welche bei geringen Stromdichten vorherrschen, ist kaum zu erkennen. [Abbildung 4.3](#) zeigt die Kennlinie bei konstanter Temperatur und unterschiedlichen Partialdrücken von Wasserstoff an Anode und Sauerstoff an der Ka-

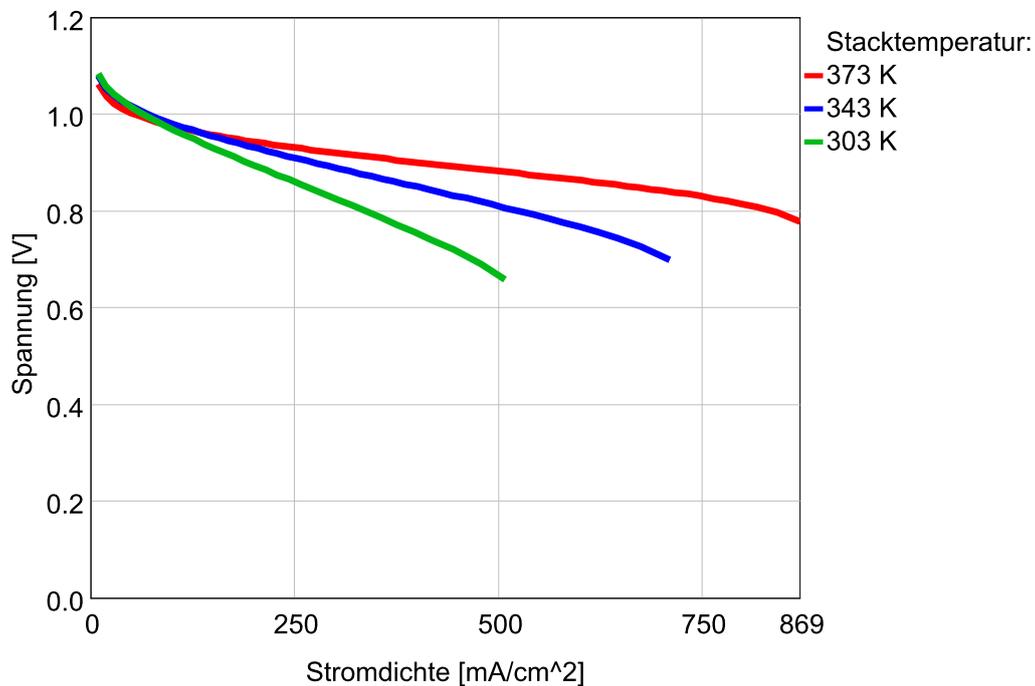


Abbildung 4.2: Kennlinie der Brennstoffzelle bei unterschiedlichen Stacktemperaturen und 1 bar Anoden- und Kathodenpartialdruck.

thode. Eine geringe Parallelverschiebung zu höheren Spannungen mit höherem Druck ist erkennbar. In [Abbildung 4.4](#) ist die Leistungsdichte und der Wirkungsgrad bei 1 bar Anoden- und Kathodendruck und einer Temperatur von 343 K angegeben. Der Wirkungsgrad fällt analog zur Spannung mit zunehmender Stromdichte ab. Die Leistungsdichte steigt mit zunehmender Stromdichte an und fällt ab einem gewissen Wert wieder ab. Das bestehende Modell in *GT-SUITE* begrenzt hingegen die Stromdichte und damit auch die maximale Leistung der Brennstoffzelle. Da in der Beschreibung nicht angegeben ist, wodurch diese Begrenzung zustande kommt, wird angenommen, dass die Stromdichte und damit die maximale Leistung mit der maximalen Leistungsdichte begrenzt ist. Dies ist teilweise auch aus [Abbildung 4.4](#) ersichtlich, da bei der höchsten Stromdichte der Anstieg der Leistungsdichte nahezu Null ist und dort etwa das Maximum der Leistungsdichte angenommen werden kann. Der Betrieb bei höheren Stromdichten über die maximale Leistungsdichte hinaus würde keinen Sinn machen, da die Leistungsdichte wieder abnimmt und der Wirkungsgrad ebenfalls weiter sinkt, siehe [Abbildung 3.6](#).

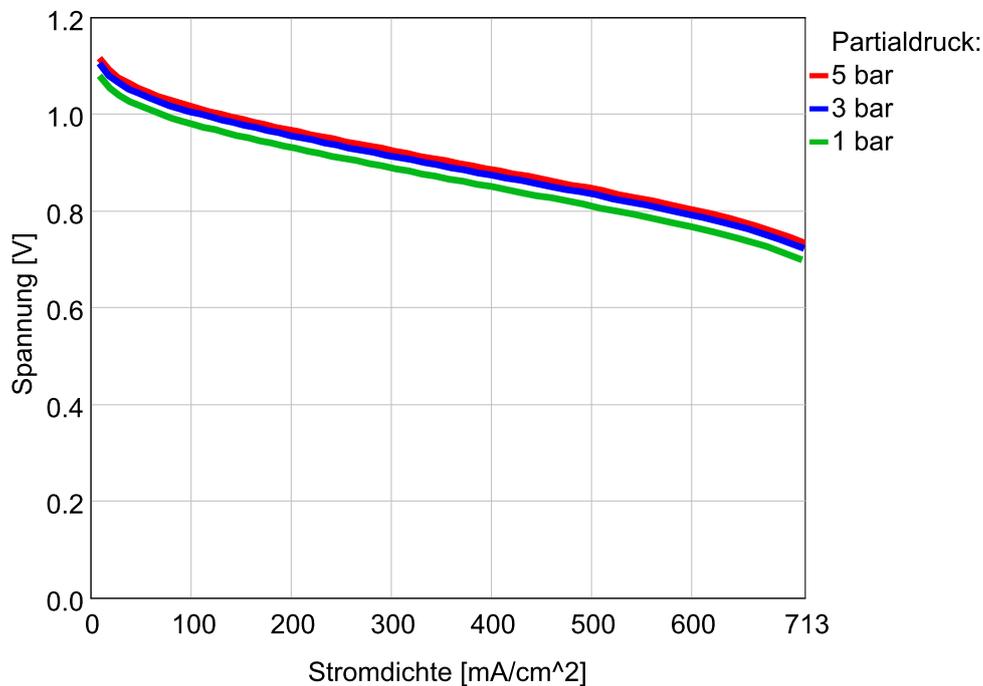


Abbildung 4.3: Kennlinie der Brennstoffzelle bei 343 K und unterschiedlichen Partialdrücken an Anode und Kathode.

4.1.2 Thermisches Modell

Das bestehende thermische Modell der Brennstoffzelle in *GT-SUITE* besteht aus 10 Ersatzmassen, welche den gesamten Brennstoffzellenstack repräsentieren. Je mehr Ersatzmassen gewählt werden, desto genauer lässt sich die unterschiedliche Temperaturverteilung entlang des Brennstoffzellenstacks untersuchen. Die Ersatzmassen sind jeweils über eine thermische Verbindung mit der Brennstoffzelle verbunden. Die abgegebene Wärme wird zu je einem Zehntel an die Ersatzmassen verteilt. Jede Masse ist mit ihren zwei Nachbarmassen wärmeleitend verbunden, wobei die zwei Äußersten nur mit einer verbunden sind. Dadurch ist der Wärmestrom innerhalb des Stacks modelliert. Weiters wird der Wärmeübergang zur Umgebung mithilfe eines konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten und der entsprechenden Fläche ermittelt. Die Temperatur wird an einer der Ersatzmassen gemessen und über einen PI-Regler wird der Wärmeübergangskoeffizient verändert, um so den an die Umgebung abgegebenen Wärmestrom zu regeln und gewünschte Temperatur des Stacks zu erhalten. Diese starke Vereinfachung wurde gewählt,

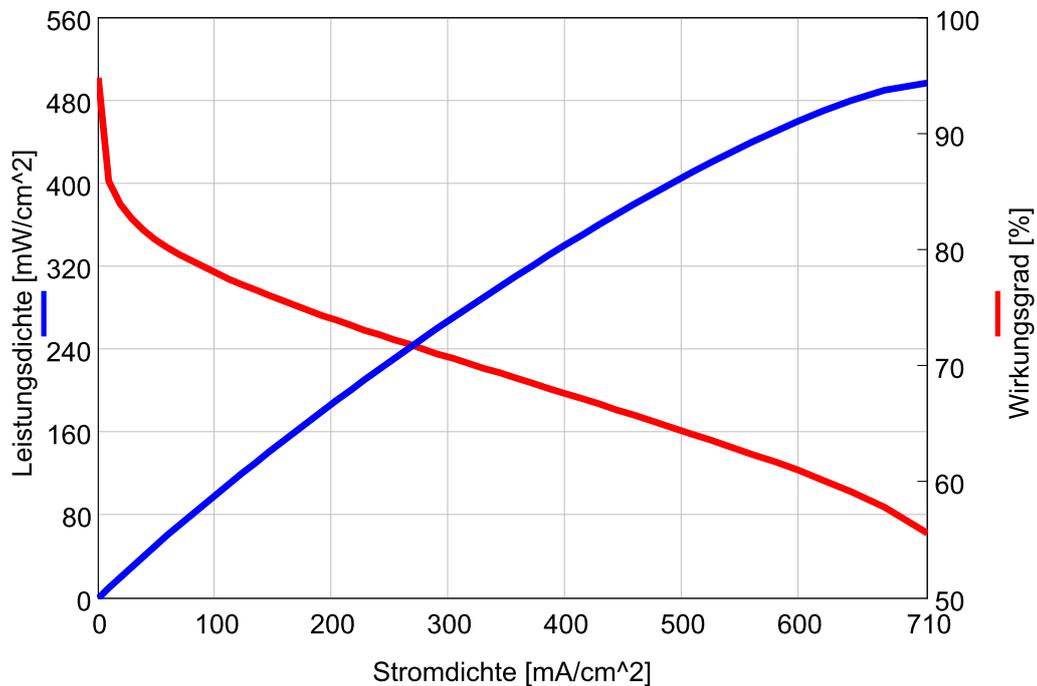


Abbildung 4.4: Leistungsdichte und Wirkungsgrad der Brennstoffzelle bei 343 K und 1 bar Anoden und Kathodendruck.

um den Modellierungsaufwand zu senken. Weiters ist diese Vereinfachung zulässig, da nur eine gesamtenergetische Betrachtung zugrunde gelegt wird. Durch den einheitlichen Wärmeübertragungskoeffizienten ergibt sich bei allen Massen die gleiche Temperatur. Die Oberfläche wurde mit 3.4 m^2 angenommen, da dies in etwa der Oberfläche des Brennstoffzellenstacks entspricht. In weiterer Folge könnte ein Kühlmittelkreislauf zum Kühlen der Massen modelliert werden. Dieser würde sich ab der ersten Masse allmählich erwärmen und nach der letzten Masse die höchste Temperatur aufweisen. Damit lassen sich unterschiedliche Temperaturverteilungen entlang des Kühlmittelkanals innerhalb der Brennstoffzelle untersuchen.

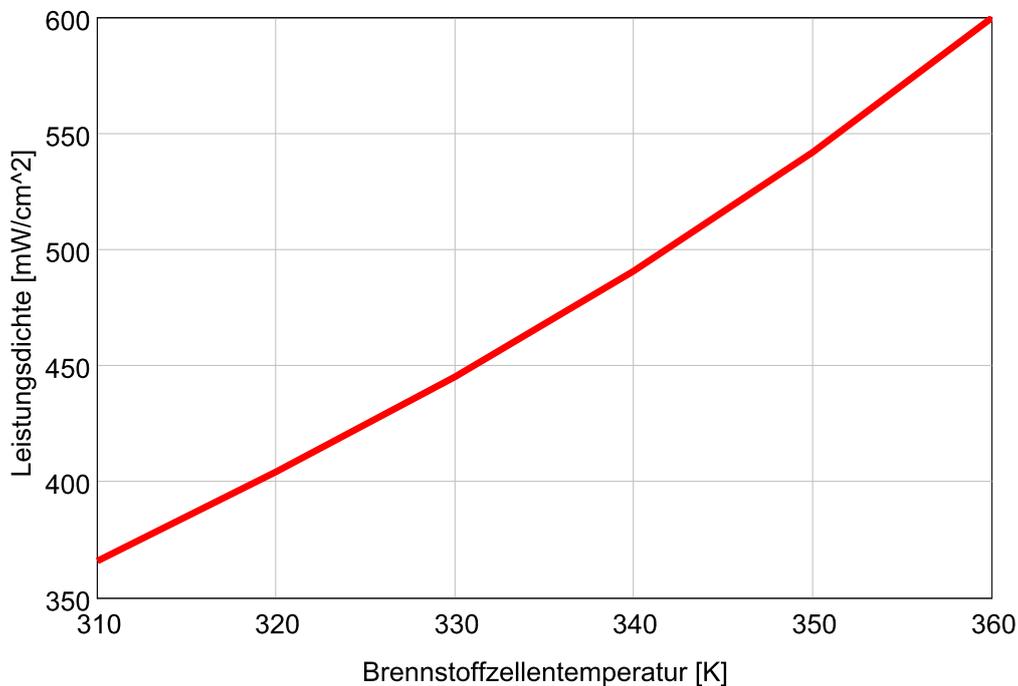


Abbildung 4.5: Maximale Leistungsdichte der Brennstoffzelle in Abhängigkeit der Temperatur.

4.1.3 Leistung der Brennstoffzelle

Die Leistung der Brennstoffzelle ergibt sich aus der Leistungsdichte p multipliziert mit der Zellenfläche A und der Zellenanzahl n , [Gleichung 4.1](#).

$$P_{max} = pAn. \quad (4.1)$$

Somit steigt die Leistung linear mit der Zellenfläche oder Zellenanzahl an. Für eine Temperatur von 350 K, Wasserstoffdruck von 3 bar, und Luftdruck an der Kathode von 3 bar gilt für die maximale Leistungsdichte $p_{max} = 0.54 \text{ W/cm}^2$. In [Abbildung 4.5](#) ist die maximale Leistungsdichte in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Der Verlauf ist annähernd linear. Typische Betriebstemperaturen der PEM-Brennstoffzelle liegen zwischen 340 K und 355 K. Beim Betrieb der Brennstoffzelle ist die Temperatur ein wichtiger Faktor, da der Dampfdruck insbesondere bei höheren Temperaturen stark von der Temperatur abhängt und damit auch die relative Luftfeuchtigkeit an der Kathode. Diese

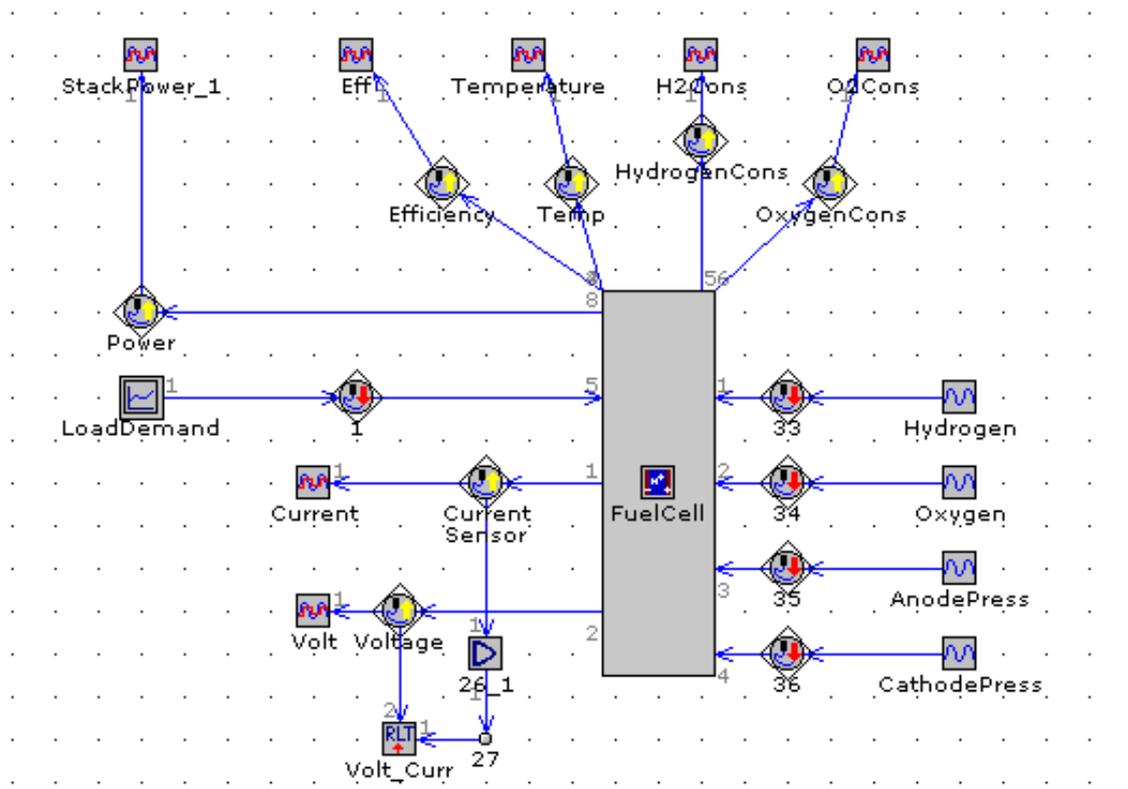


Abbildung 4.6: Block des bestehenden Brennstoffzellenmodells in *GT-SUITE*

muss für die optimale Befeuchtung der Elektrolytmembran genau kontrolliert werden, da sonst die Leistung stark abfällt oder Beschädigungen auftreten können. [Abbildung 4.6](#) zeigt den Block des bestehenden Brennstoffzellenmodells in *GT-SUITE*.

4.2 Eigens aufgebautes Modell in *GT-SUITE*

Da das bestehende Brennstoffzellenmodell in *GT-SUITE* nicht vollständig dokumentiert ist, wurden zur Verifikation die aus der Literatur bekannten Modellgleichungen in die Software programmiert und dem bestehenden Modell gegenübergestellt. Zusätzlich lassen sich dadurch alle Parameter und Gleichungen individuell anpassen bzw. verändern. In [Kapitel 6.3](#) wird der nur im eigens aufgebauten Modell veränderbare Parameter des Druckeinflusses auf die Zellenspannung anhand der Brennstoffzellenverluste untersucht. In diesem Unterkapitel wird das eigens aufgebaute Modell erläutert.

4.2.1 Modell der elektrisch-chemischen Komponenten

Mit den in [Kapitel 3.5](#) angegebenen Modellgleichungen wurden durch Vorgabe des Anoden- und Kathodendrucks und der Molenbrüche die Partialdrücke von Wasserstoff und Sauerstoff und der temperaturabhängigen freien Gibbschen Energie die Leerlaufspannung einer Zelle ermittelt. Über die strom- und temperaturabhängigen Verluste wurde die Spannung im Betrieb berechnet. Wasserstoff- und Sauerstoffstrom sind proportional dem elektrischen Strom. [Abbildung 4.7](#) zeigt den Teil des Programms bei dem die Spannung im Betrieb berechnet wird.

4.2.2 Modell der thermischen Komponenten

In weiterer Folge wird über den Wirkungsgrad, und der damit entstehenden Wärme, und der spezifischen Wärmekapazität die Temperatur der Brennstoffzelle berechnet. Diese wird auch für die temperaturabhängigen Parameter der Brennstoffzelle benötigt. Mit dem Wärmeleitungsgesetz, siehe [Gleichung 4.2](#),

$$\dot{Q} = hA\Delta T. \quad (4.2)$$

der Temperaturdifferenz zur Umgebung ΔT , dem Wärmeübergangskoeffizienten h und der Oberfläche A wird der an die Umgebung abgegebene Wärmestrom berechnet. Ein PI-Regler regelt dabei den Wärmeübergangskoeffizienten (und mit der Oberfläche und der Temperaturdifferenz zur Umgebung auch den Wärmestrom), um die gewünschte Temperatur zu erhalten. Dadurch ist keine reale sondern eine vereinfachte Kühlung modelliert, welche es erlaubt, den für ein bestimmtes Temperaturniveau notwendigen Wärmestrom an die Umgebung zu ermitteln. In der Realität müsste das Kühlsystem in der Lage sein, den durch den Wärmeübergangskoeffizienten ermittelte Wärmestrom abzuführen und so die für den Betrieb notwendige Brennstoffzellenstacktemperatur zu sicherzustellen.

4.2.3 Vor- und Nachteile des eigens aufgebauten Modells

Vorteile gegenüber dem bestehendem Modell sind die leichte Einsehbarkeit der verwendeten Gleichungen (in der Beschreibung des bestehenden Modells sind nicht alle angegeben) und die leichte Veränderbarkeit und Erweiterbarkeit des Modells (z.B. mögliche Modellierung des Wasserdampfes und relativer Luftfeuchtigkeit, Modellierung des Double-Layer Charging Effects, Veränderbarkeit der maximalen Stromdichte, detailliertere Abhängigkeit der Zellspannungen bei unterschiedlichen Drücken und höheren Stromdichten). Wei-

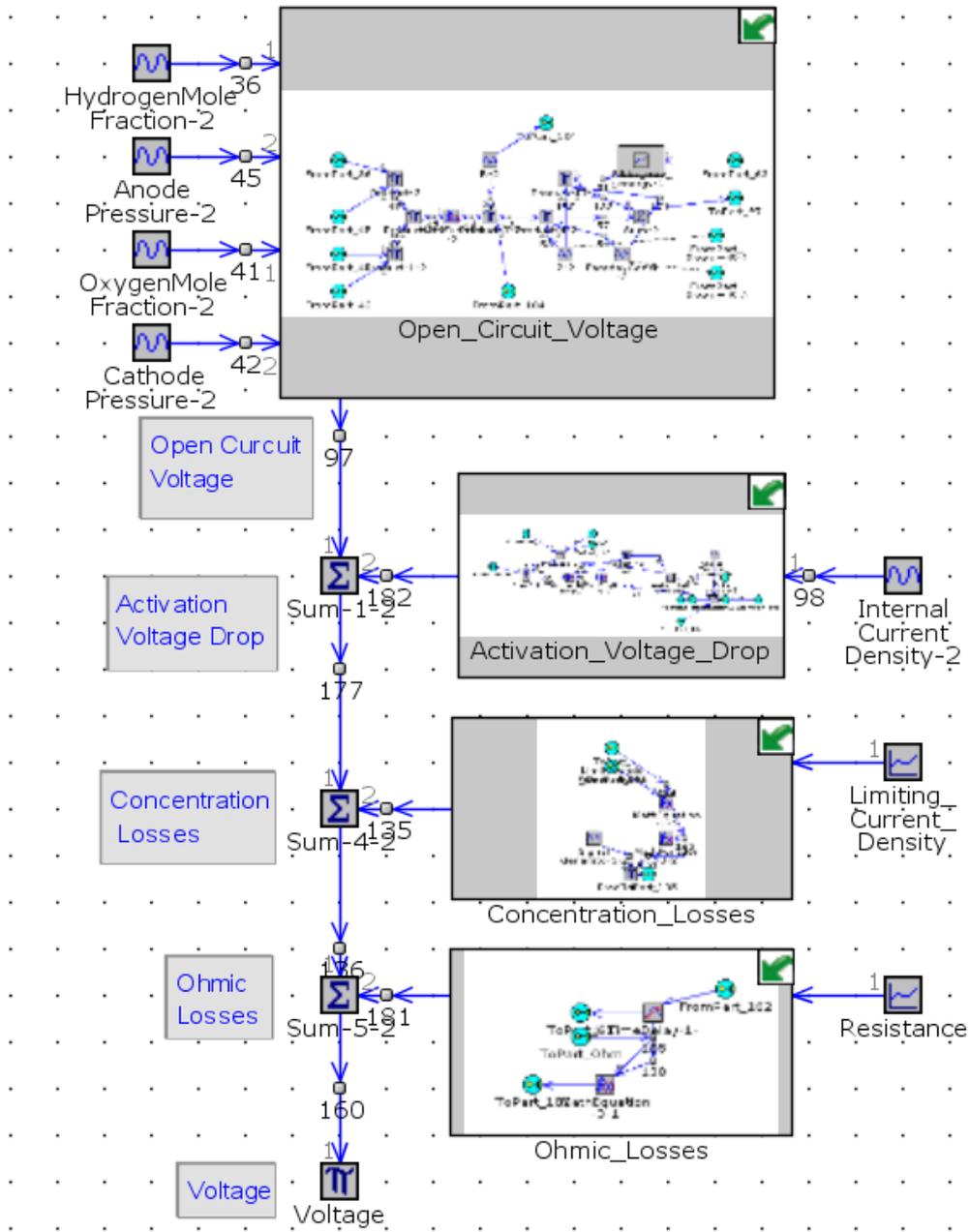


Abbildung 4.7: Modell der elektrischen Komponenten in *GT-SUITE*

ters wurde das Modell verwendet, um das bestehende zu verifizieren bzw. nachzubilden, da die Achsenbeschriftung der Parameterdiagramme und sonstige benötigte Gleichungen nicht angegeben waren. Nachteile sind die schlechte Übersicht über die größere Anzahl an einzelnen Blöcken und der Zeitaufwand bei der Erstellung des Modells.

Kapitel 5

Modell des gesamten Fahrzeuges

Für die weitere Simulation wurde das bestehende Brennstoffzellenmodell verwendet. Um das ganze Fahrzeug zu modellieren, sind weitere Komponenten notwendig, die in den folgenden Unterkapiteln erläutert werden.

5.1 Fahrermodell und Leistungsfluss

Der Hybrid Electric Vehicle-Controller ermittelt aus der Information der tatsächlichen und der gewünschten Fahrzeuggeschwindigkeit oder Beschleunigung und den Daten des Fahrzeuges (Masse, Frontalfläche, Luftwiderstandsbeiwert,...) das benötigte Drehmoment bzw. die benötigte Leistung. Ein PI-Regler wird darin verwendet, um den Fehler zwischen aktuellen Werten und gewünschten Werten zu minimieren. Die dadurch ermittelte mechanische Leistung wird an den Elektromotor geschickt, welcher über das Wirkungsgradkennfeld die benötigte elektrische Leistung ermittelt. Von dieser wird die von dem Brennstoffzellensystem gelieferte elektrische Leistung (verringert um den Wirkungsgrad des DC-DC Konverters) abgezogen und der Rest von der Batterie bereitgestellt. Bei der Rekuperation wird über die Bremsleistung und den Elektromotor im Generatorbetrieb die in die Batterie einspeisbare Leistung ermittelt. In [Abbildung 5.1](#) wird die schematische Darstellung des Brennstoffzellenantriebssystems gezeigt. Die Brennstoffzelle wird über einen DC-DC-Konverter mit der Batterie verbunden. Diese Gleichspannung wird über einen Inverter in für den Elektromotor benötigten Drehstrom gewandelt. Die Hybridisierung des Fahrzeuges (zusätzliche Verwendung einer Batterie zur Brennstoffzelle) hat den Vorteil, dass beim Bremsen kinetische Energie rekuperiert werden kann. Dadurch lässt sich der Kraftstoffverbrauch vermindern. Weiters wirken sich verminderte dynamische Belastungen, welche durch die Batterie ausgeglichen werden, positiv auf die

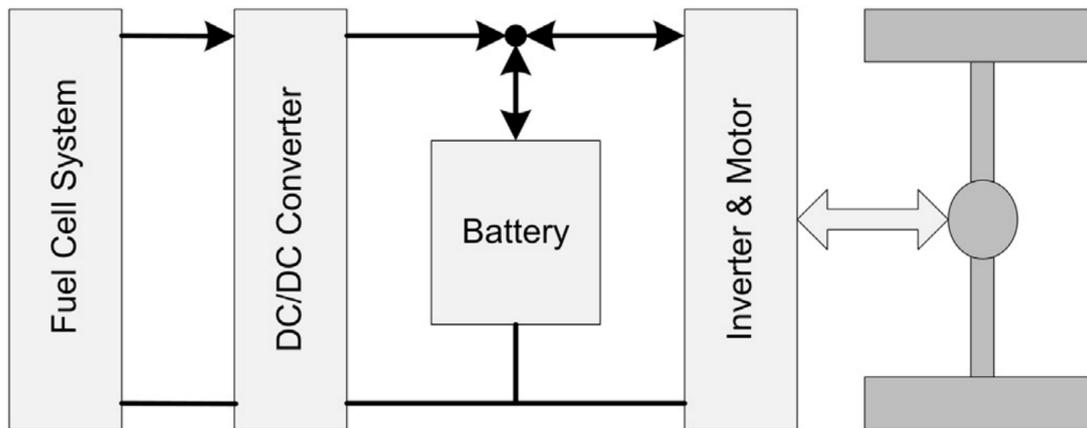


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Brennstoffzellenantriebssystems [8].

Lebensdauer der Brennstoffzelle aus. Statt 10 000 Stunden im stationären Betrieb, lässt sich eine typische PEM-Brennstoffzelle nur 5000 Stunden dynamisch betreiben, [7]. In [Abbildung 5.2](#) ist das Fahrzeugmodell in *GT-SUITE* dargestellt. Durch die Richtung der Pfeile ist der Informationsfluss zu erkennen. Der Kompressor und das Kühlsystem werden direkt von der Brennstoffzelle angetrieben. Wie in der Dissertation [9] beschrieben, wird der Kompressor auch beim Hochfahren der Brennstoffzelle, bedingt durch einen kleinen Überdruck an der Wasserstoffseite, nur von dieser mit Energie versorgt. Die sonstigen Komponenten, wie z.B. Licht, Radio, die Energieversorgung der Steuersysteme, usw., hängen direkt an der Batterie. Inverter- und Gleichspannungswandlerverluste sind bei der Leistungsaufnahme der Systemkomponenten bereits berücksichtigt.

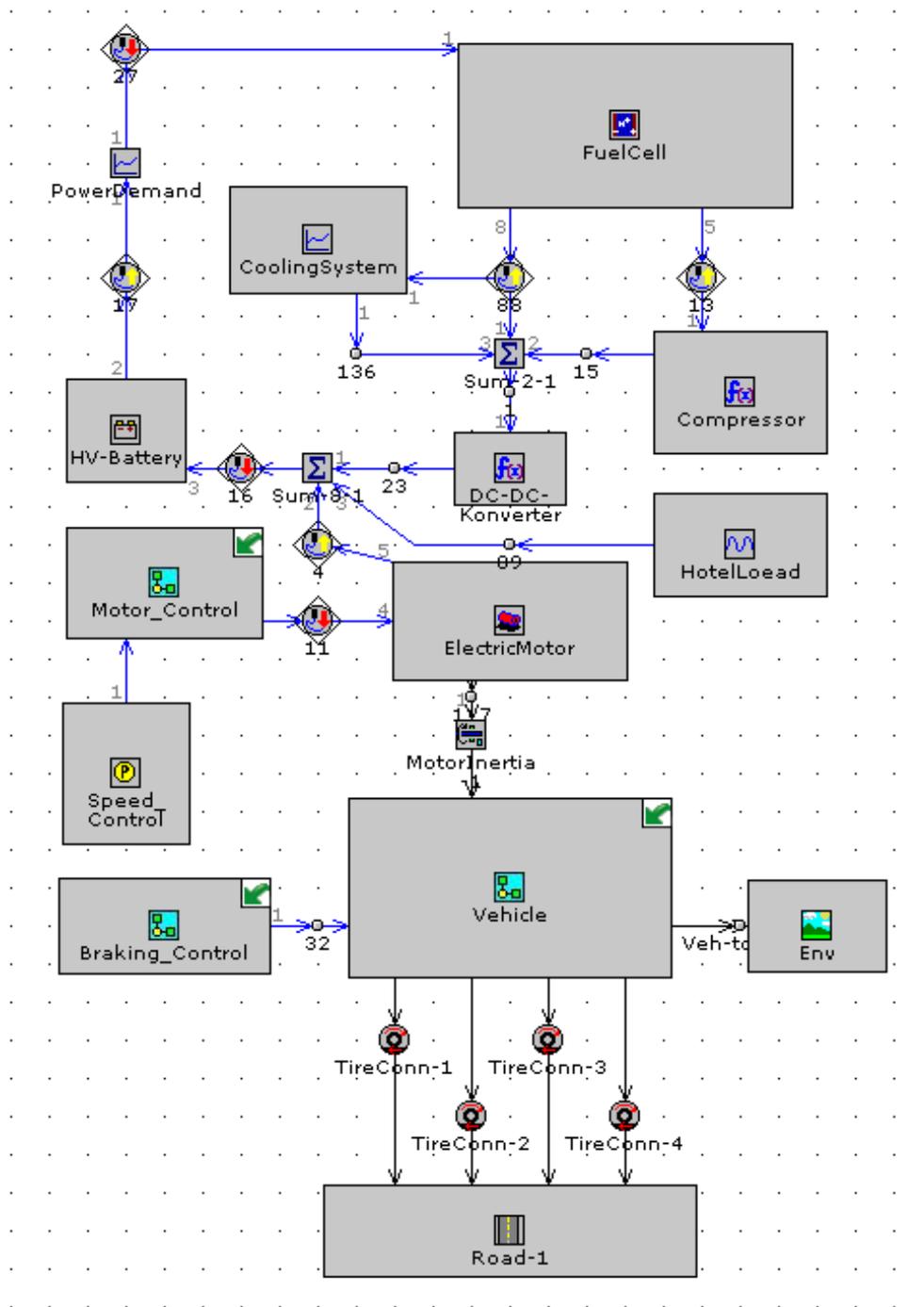


Abbildung 5.2: Fahrzeugmodell in GT-SUITE.

5.2 Fahrzeug

Die in [Tabelle 5.1](#) angegebenen Fahrzeugparameter wurden angenommen, da diese einem durchschnittlichen Mittelklassewagen entsprechen und auch in [9] und [7] für eine Brennstoffzellenfahrzeugsimulation verwendet wurden.

Tabelle 5.1: Verwendete Fahrzeugparameter für die Mittelklassewagen-Simulation

Fahrzeugparameter Mittelklasse	Wert	Einheit
Fahrzeug		
Fahrzeugmasse	1500	kg
Frontalfläche	2.2	m ²
Luftwiderstandsbeiwert	0.3	-
Rollwiderstandsbeiwert	0.01	-
Elektromotor max. Leistung	65.5	kW
Verbrauch sonstige Komponenten	280	W
Brennstoffzellensystem		
Brennstoffzellenanzahl	440	-
Brennstoffzellenfläche	205	cm ²
Brennstoffzelle max. Leistung	50	kW
Kompressor max. Leistung	11	kW
Batterie		
Kapazität	9	Ah
Spezifische Energie	3.2	kWh

5.3 Elektrische Komponenten

5.3.1 Elektromotor

Der Wirkungsgrad des Elektromotors wird in Abhängigkeit der Drehzahl und des Drehmomentes berechnet. Das zur Berechnung verwendete Motorkennfeld ist aus der Literatur entnommen [10], wobei zusätzlich ein Inverterwirkungsgrad von 92 % berücksichtigt wurde. Das Drehmoment wurde von 200 Nm auf 250 Nm erhöht, um eine höhere Maxi-

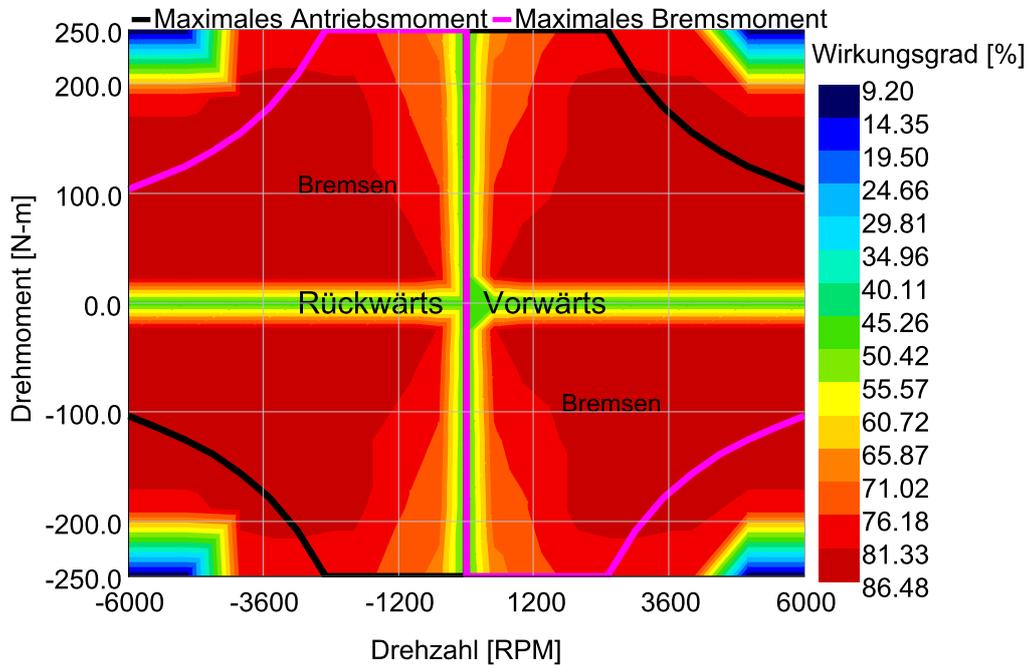


Abbildung 5.3: Wirkungsgradkennfeld des Elektromotors inklusive Inverterverluste (92 %) mit eingezeichnetem maximalen und minimalen Drehmoment.

malleistung zu erhalten. Weiters wurde in Abhängigkeit der Drehzahl das maximale bzw. minimale Drehmoment angegeben, in [Abbildung 5.3](#) ist das Motorkennfeld inklusive der maximalen und minimalen Momente grafisch dargestellt. In [Abbildung 5.4](#) ist die maximale Leistung des Elektromotors über der Drehzahl dargestellt. Aufgrund des schon bei Stillstand verfügbaren maximalen Drehmomentes steigt die Leistung linear mit der Drehzahl an bis die maximale Leistung erreicht ist. Bei weiterer Erhöhung der Drehzahl bleibt die Leistung konstant und das verfügbare Drehmoment sinkt. In dieser Arbeit wurde ohne Überlastbereich gearbeitet. Die maximal möglichen Leistungen und Momente entsprechen der Dauerleistung und dem Dauermoment.

Differential

Ein Differential mit einem Übersetzungsverhältnis von 4.5 und einem Wirkungsgrad von 98 % wurde im Modell berücksichtigt.

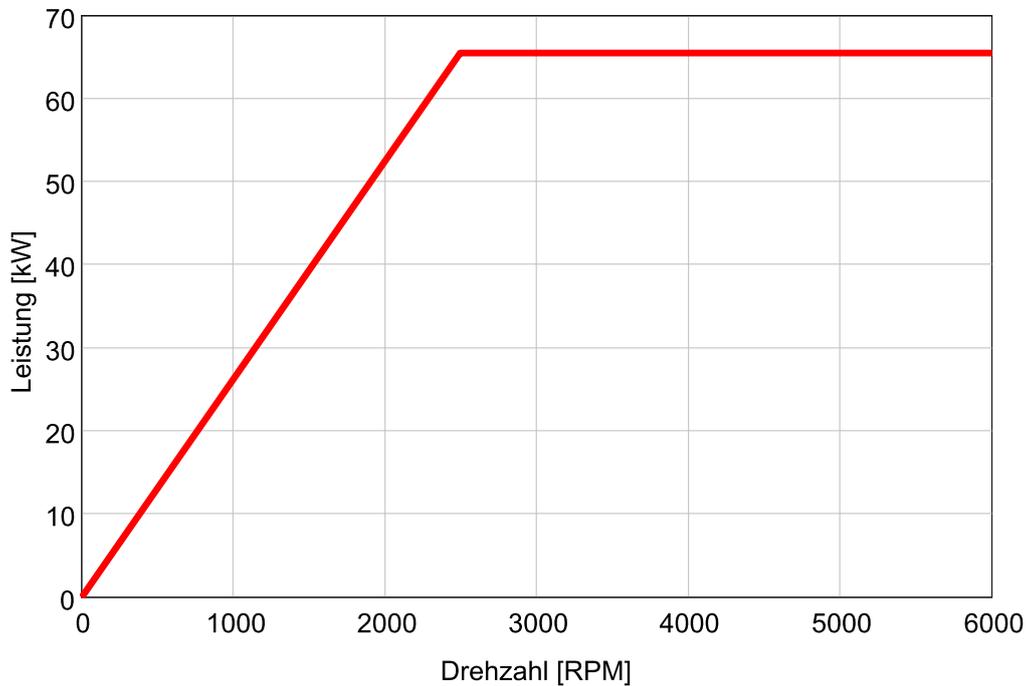


Abbildung 5.4: Maximale Leistung des Elektromotors in Abhängigkeit der Drehzahl.

5.3.2 Batterie

Dem Batteriemodell liegt, wie in [Gleichung 5.1](#) ersichtlich, die Energiebilanz von eintretender und austretender Energie zugrunde,

$$IV_{OC} - I^2R_{int} - \eta_{coulomb}P = 0 \quad (5.1)$$

wobei I der Strom, V_{OC} die Leerlaufspannung, R_{int} der Innenwiderstand, $\eta_{coulomb}$ der coulombsche Lade- oder Entladewirkungsgrad und P die abgegebene elektrische Leistung (positiv) oder die in die Batterie eingespeiste elektrische Leistung (negativ) ist. Der SOC (State Of Charge, Ladezustand) ergibt sich durch Integration des aus der Leistungsbilanz errechneten Stromes. Für das Batteriemodell wurden die vom Ladungszustand abhängigen Werte der Leerlaufspannung und des Innenwiderstandes aus der Literatur entnommen [\[11\]](#) und der Innenwiderstand entsprechend der geringeren Kapazität erhöht. [Abbildung 5.5](#) zeigt die verwendeten Werte. Die Begrenzung des Ladezustandes ergibt sich dadurch, dass die Batterie nur innerhalb des Bereichs verwendet wird. Der

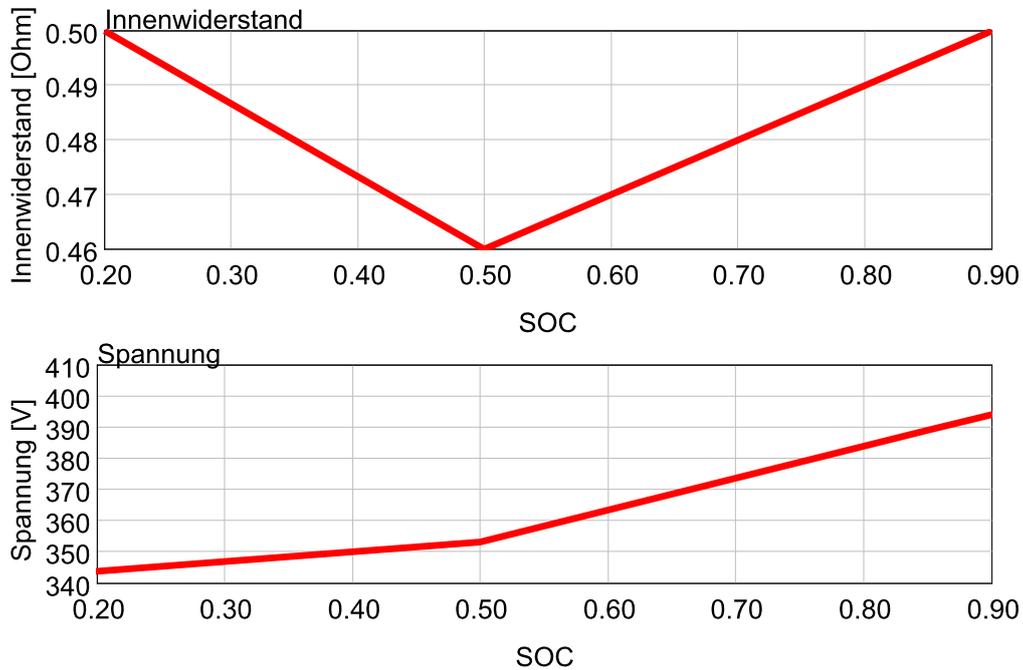


Abbildung 5.5: Leerlaufspannung und Innenwiderstand der Batterie.

coulombsche Lade- und Entladewirkungsgrad wurde für eine Lithium-Ionen Batterie mit 99 % und die Kapazität mit 9 Ah angenommen.

5.3.3 DC-DC Konverter

Zwischen Brennstoffzelle und Batterie wurde ein DC-DC Konverter berücksichtigt, der mit einem Wirkungsgrad von 93 % in die Modellrechnung eingeht.

5.4 Komponenten des Brennstoffzellensystems

Abbildung 5.6 zeigt die schematische Darstellung des Brennstoffzellensystems. Der im Hochdrucktank bei typischerweise 350 bar oder 700 bar gespeicherte Wasserstoff [16], wird nach der Druckregulierung auf etwa 3 bar der Anode zugeführt. Von der Anode wird idealerweise kein Abgas produziert, da die Wasserstoffionen und Elektronen vollständig über den Elektrolyten bzw. die elektrische Last geleitet werden. In der Realität auftre-

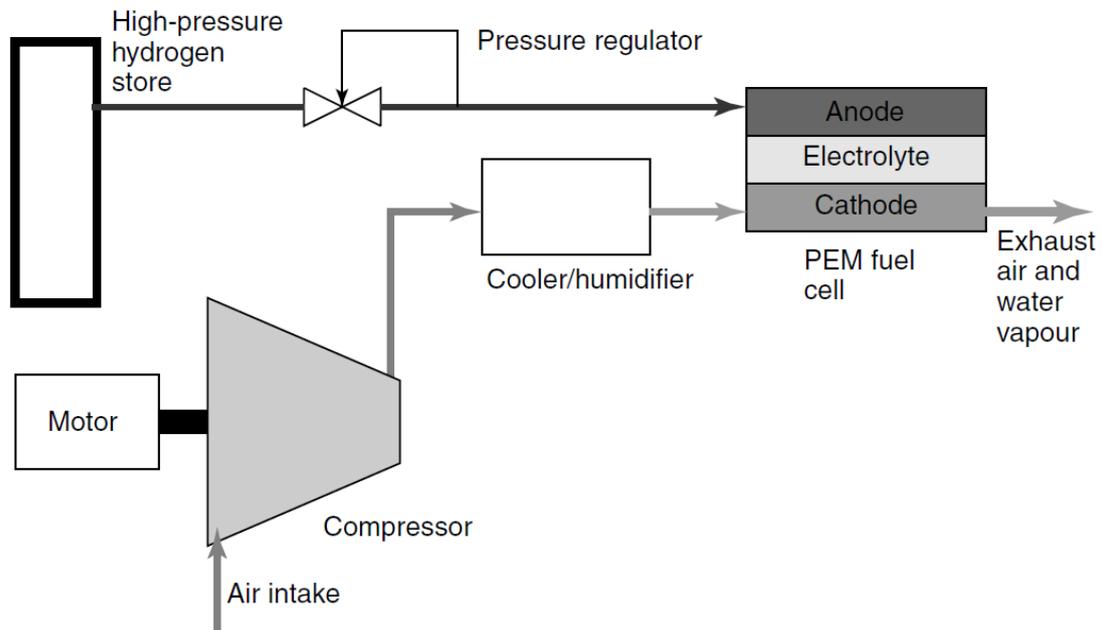


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung des Brennstoffzellensystems [1].

tende Unreinheiten des Wasserstoffs sowie zu hohe Feuchtigkeit und Stickstoffmoleküle machen aber das sogenannte *purgen* notwendig. Dabei wird Wasserstoff mit etwas höherem Druck kurze Zeit über die Anode gespült, um den gewünschten reinen Zustand zu erreichen. Durch Rezirkulierung des dafür verwendeten Wasserstoffs kann der damit verbundene Kraftstoffverlust (ca. 5 %) in Grenzen gehalten werden. Der für die Brennstoffzellenreaktion benötigte Sauerstoff wird aus der Luft gewonnen. Um einen hinreichend hohen Luftdruck an der Kathode zu gewährleisten wird ein Kompressor verwendet. Dieser wurde im Modell berücksichtigt, um den dadurch verursachten Energieverbrauch zu berechnen. Die Leistungsaufnahme des Kompressors kann mehr als 20 % der elektrischen Brennstoffzellenleistung betragen [1]. Dabei wurde folgende aus der Literatur [12] bekannte Gleichung 5.2 verwendet,

$$\dot{W}_{compr} = \frac{\dot{m} c_{pLuft} T_1}{\eta \eta_m} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \quad (5.2)$$

um die benötigte elektrische Leistung zur Verdichtung von Luft von Zustand 1 auf Zustand 2 zu ermitteln. Zustand 1 ist der Zustand der Umgebungsluft und Zustand 2 der Zustand der Luft an der Kathode. Der Druck p_2 beträgt 3 bar, einem für PEM-Brennstoffzellenfahrzeuge typischen Wert. Die spezifische Wärmekapazität von Luft weist

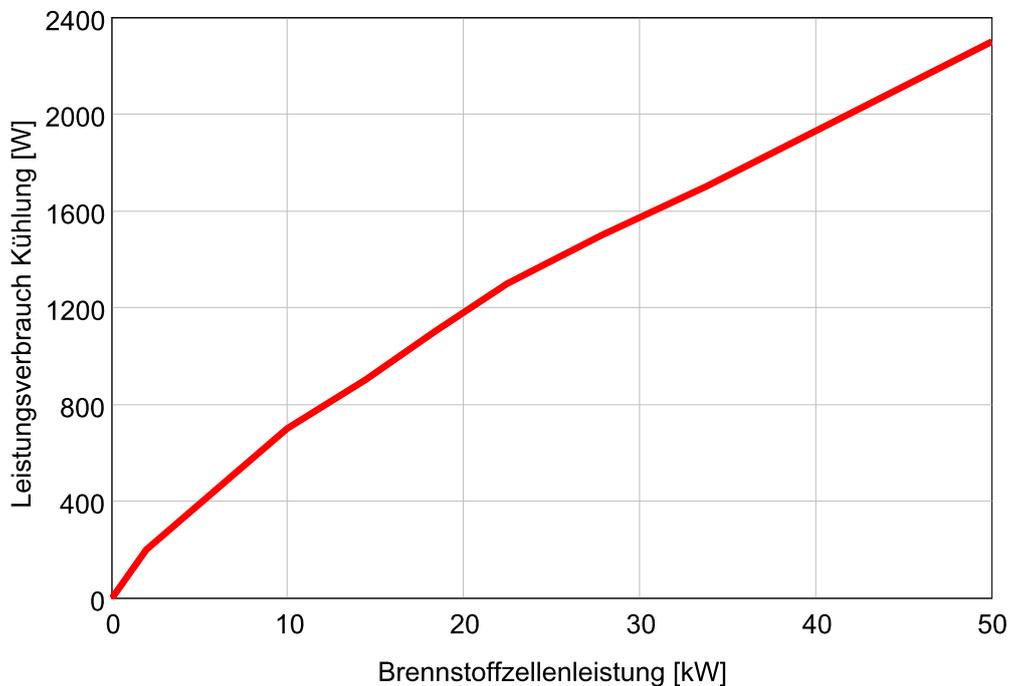


Abbildung 5.7: Leistungsverbrauch des Kühlsystems in Abhängigkeit der Brennstoffzellenleistung, [9].

einen Wert von $c_{p_{Luft}} = 1.005 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ auf und der Isentropenexponent beläuft sich auf $\kappa = 1.4$. Der Luftmassenstrom \dot{m} beträgt 5 Mol Luft pro Mol Wasserstoff und der isentrope Kompressorwirkungsgrad $\eta = 0.6$ (typische isentrope Kompressorwirkungsgrade liegen zwischen 49 % und 71 %) [12]. Der Wirkungsgrad des Elektromotors inklusive Inverter η_m wurde mit 0.8 angenommen. Mit der Molmasse von Wasserstoff (2.02 g/mol) und dem Massenstrom Wasserstoff aus dem bestehenden Modell lässt sich mit der Molmasse von trockener Luft (29 g/mol) der benötigte Luftmassenstrom von 67.5 kg Luft/kg Wasserstoff berechnen. Der Befeuchter/Kühler ist notwendig, um die druck- und temperaturabhängige relative Feuchte der Luft zu kontrollieren. Diese ist ein wichtiger Faktor, da der Elektrolyt nicht zu trocken und auch nicht zu nass sein darf, um die Wasserstoffionen optimal zu leiten. Der Kompressor wird immer mit mindestens 500 W betrieben, um an der Kathode einen Mindestluftmassenstrom zu gewährleisten, der die optimale Feuchtigkeit und Temperatur der Elektrolytmembran sicherstellt (bei zusätzlicher Verwendung eines Membranbefeuchters). Die Leistung zusätzlich zu dem

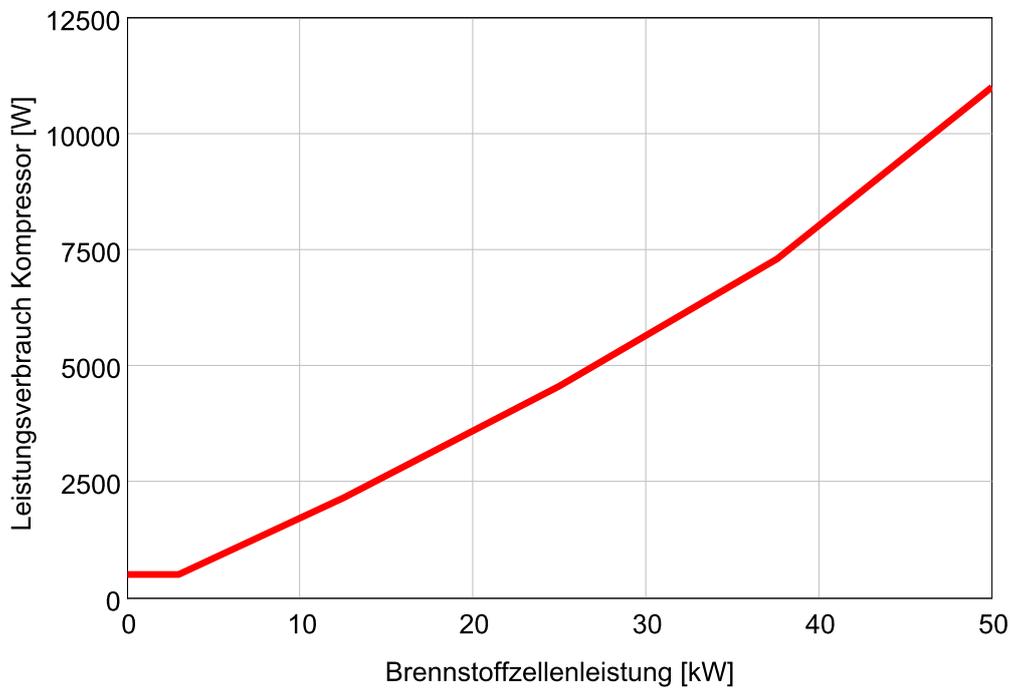


Abbildung 5.8: Leistungsverbrauch des Kompressors in Abhängigkeit der Brennstoffzellenleistung.

Brennstoffzellensystem gehörender Verbraucher wie ein Kühlventilator und eine Kühlwasserpumpe wurden durch Messungen nach [9] in Abhängigkeit der Brennstoffzellenleistung berücksichtigt, siehe [Abbildung 5.7](#). In [Abbildung 5.8](#) ist die Kompressorleistung in Abhängigkeit der Brennstoffzellenleistung dargestellt. Weiters wurden sonstige Komponenten mit einer konstanten Leistung von 300 W modelliert.

5.5 Betriebsstrategie der Brennstoffzelle

In dieser Arbeit wurden drei Betriebsstrategien der Brennstoffzelle untersucht, welche vorgeben, wann welche Leistung von der Brennstoffzelle bereitgestellt wird. Diese drei Strategien werden im Folgenden erläutert.

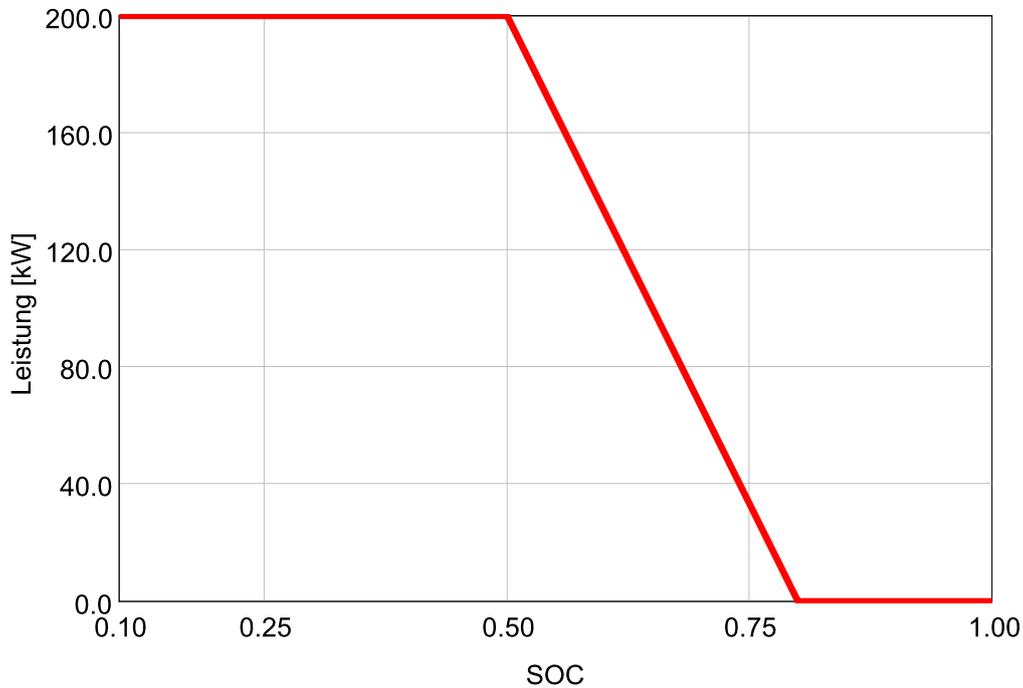


Abbildung 5.9: Leistungsnachfrage der Brennstoffzelle in Abhängigkeit des Batterieladestandes.

SOC-abhängige Betriebsstrategie

Die angeforderte Leistung der Brennstoffzelle bei der SOC-abhängigen Betriebsstrategie ist vom Ladezustand der Batterie abhängig, siehe [Abbildung 5.9](#). Die Steigung wurde nicht zu flach gewählt, sodass die Batterie während der Fahrzyklen nicht zu stark entladen wird und nach den Zyklen nicht wieder zu lange Zeit aufgeladen werden muss, um auf den gleichen Ladezustand wie zu Beginn zu kommen. Außerdem wurde die Steigung nicht zu steil gewählt, um dynamische Belastungen der Brennstoffzelle zu verringern. Zusätzlich wird die momentane kinetische Energie des Fahrzeuges berücksichtigt, um beim Rekuperieren nicht über den gewünschten Ladezustand der Batterie aufzuladen. Dies wurde mithilfe des SOC-Demand-Blockes bewerkstelligt, welcher über die kinetische Energie des Fahrzeugs und Daten der Batterie in etwa den SOC nach dem Rekuperieren berechnet. Je niedriger der SOC ist, desto mehr Leistung wird von der Brennstoffzelle nachgefragt, um die Batterie wieder aufzuladen bzw. den Elektromotor zu versorgen. Über einem SOC von 0.8 wird keine Leistung mehr angefordert. Die angeforderte Leistung

entspricht der abgegebenen Leistung der Brennstoffzelle, außer die angeforderte Leistung übersteigt die maximale Leistung, dann kann nur die maximale Leistung geliefert werden. Die Brennstoffzelle stellt die nachgefragte Leistung instantan bereit.

Leistungsgemittelte Betriebsstrategie

Als alternative Variante zur SOC-abhängigen Betriebsstrategie der Brennstoffzelle wurde die benötigte elektrische Leistung des Elektromotors, des Kompressors, der sonstigen Komponenten, des Kühlsystems und die dissipierte Energie der Batterie über einen bestimmten Zeitraum gemittelt und diese durch den Brennstoffzellenstack bereitgestellt. Der Ladezustand der Batterie kann durch Anpassen des Mittelungszeitraumes nach dem Durchfahren eines bestimmten Geschwindigkeitsprofils auf das selbe Level wie zu Beginn gebracht werden. Positive und negative Lastspitzen werden durch die Batterie ausgeglichen. Dadurch fällt die Belastung der Brennstoffzelle weniger dynamisch aus. Hohe Lastspitzen bei geringem Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstacks und geringe Wirkungsgrade des Brennstoffzellensystems bei geringen Lasten können dadurch vermieden werden. In den folgenden Kapiteln wurden die Berechnungen mit dem SOC-abhängigen Betriebsstrategie durchgeführt, es sei denn, es wurde extra auf die Verwendung der leistungsgemittelten Strategie hingewiesen.

On-Off Betriebsstrategie

Weiters wurde als dritte Betriebsstrategie das Brennstoffzellensystem entweder bei höchstem Systemwirkungsgrad betrieben (Stackleistung 8 kW) oder gar nicht betrieben, d.h. die Energie wird nur aus der Batterie entnommen. Die Brennstoffzelle stellt die Leistung bereit, sobald der SOC unter einen gewissen Wert gefallen ist und liefert konstant 8 kW bis der SOC wieder 0.8 beträgt. Dadurch kann der Wasserstoff vom Brennstoffzellensystem am effizientesten gewandelt werden und es werden ineffiziente hohe und niedrige Lasten vermieden. Die Batterie wird folglich während des rein elektrischen Fahrens stärker beansprucht. Der Nachteil ist der geringe Leistungsoutput des Brennstoffzellensystem, wodurch diese Strategie bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten nicht verwendet werden kann. In der Realität wäre diese Strategie nicht ohne Weiteres möglich, da sich bei Kompressorstillstand an der Kathode ein geringerer Druck als an der Anode ergibt und zu hohe Druckdifferenzen zwischen Anode und Kathode Schäden an der Elektrolytmembran verursachen bzw. die Lebensdauer senken können.

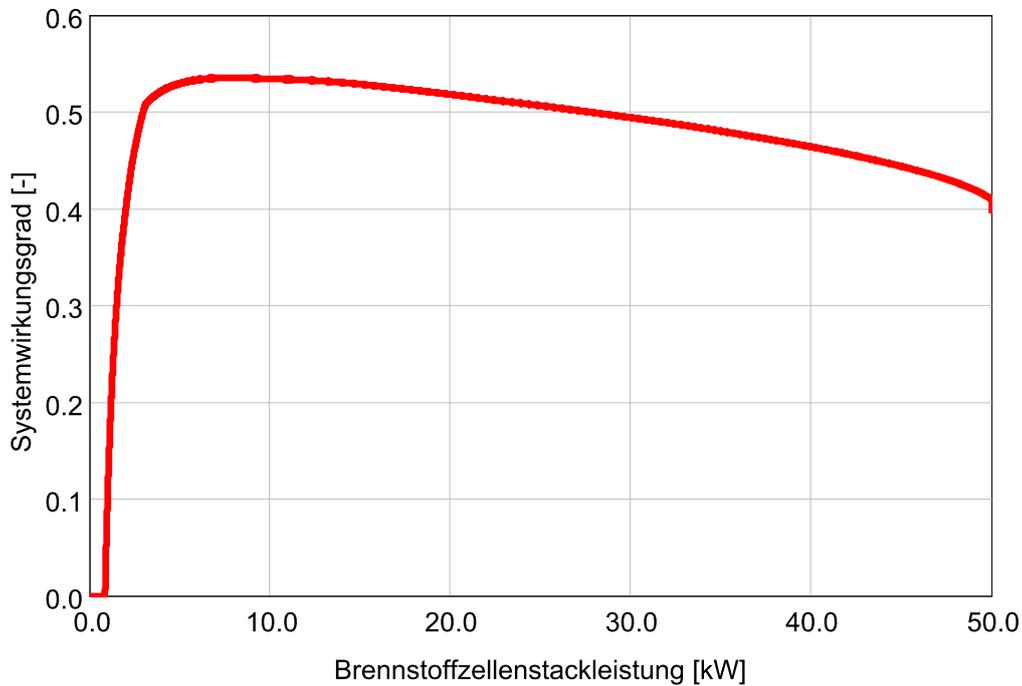


Abbildung 5.10: Systemwirkungsgrad des Brennstoffzellensystems. Berücksichtigt wurden der Brennstoffzellenstack, der Kompressor, die sonstigen Komponenten, das Kühlsystem und der DC-DC-Konverter.

5.6 Wirkungsgrad des gesamten Brennstoffzellensystems

Da der Brennstoffzellenstack für die ordnungsgemäße Funktion die Komponenten wie den Kompressor und das Kühlsystem benötigt, ist es sinnvoll, den Wirkungsgrad des gesamten Brennstoffzellensystems anzugeben. Dieser ist insbesondere bei niedrigen Stromdichten geringer als der des Stacks alleine, [Abbildung 5.10](#). Aufgrund der Kompressorleistung von mindestens 500 Watt um den Mindestluftstrom zu gewährleisten und der konstanten Leistung von 280 Watt der sonstigen Komponenten, ist der Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystem Null solange der Brennstoffzellenstack nicht mehr Energie liefert als der Kompressor, das Kühlsystem und die sonstigen Komponenten benötigen.

5.7 Einfluss des Druckes auf das Brennstoffzellensystem

Grundsätzlich benötigt der Brennstoffzellenstack einen gewissen Luftmassenstrom, um den an der Kathode gewandelten Sauerstoff bereitzustellen. Erhöht man zusätzlich den Luftdruck, erhöht sich ebenfalls die Spannung der Brennstoffzelle und somit die maximal abgebbare Leistung und somit die Leistungsdichte. Um den Luftdruck zu erhöhen, benötigt der Luftkompressor eine gewisse elektrische Leistung. Nun stellt sich die Frage, ob der Kompressor mehr Leistung benötigt als die durch ihn verursachte Druckerhöhung dem Brennstoffzellenstack bringt. In [Gleichung 3.8](#) ist die Druckabhängigkeit der Zellenspannung angegeben. Die Partialdrücke werden aus dem Systemdruck P und den Molenbrüchen der jeweiligen Komponenten α_i berechnet, siehe [Gleichung 5.3](#).

$$P_i = \alpha_i P \quad (5.3)$$

Hebt man nun den Systemdruck aus dem Logarithmus aus [Gleichung 3.8](#) heraus, ergibt sich die Zellenspannung in Abhängigkeit des Systemdrucks P , siehe [Gleichung 5.4](#) [1].

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\alpha_{H_2} \cdot \alpha_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{\alpha_{H_2O}} \right) + \frac{RT}{4F} \ln(P) \quad (5.4)$$

Wenn sich nun der Systemdruck von P_1 auf P_2 erhöht, ergibt dies eine in [Gleichung 5.5](#) angegebene Spannungserhöhung ΔV der Brennstoffzelle.

$$\Delta V = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (5.5)$$

Der Term $\frac{RT}{4F} = C$ wird als konstant angenommen und hängt von der Temperatur, der Gaskonstanten R , der Faradaykonstanten F und der Druckabhängigkeit der Austauschstromdichte i_0 ab, also ist je nach Brennstoffzelle unterschiedlich. In der Literatur findet man Werte von $C = 0.03$ bis $C = 0.1$ [1]. Mit dem Strom I und der Zellenanzahl n ergibt sich nach [Gleichung 5.6](#) die Leistungserhöhung ΔP der Brennstoffzelle in Abhängigkeit von der Druckerhöhung.

$$\Delta P = C \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) I n \quad (5.6)$$

Die aufgenommene Leistung des Kompressors wird nach [Gleichung 5.2](#) berechnet und der darin benötigte Luftmassenstrom ergibt sich nach Umformen und den entsprechenden Molmassen und Molanteilen aus [Gleichung 3.23](#). Daher wird die vom Kompressor benötigte elektrische Leistung mit der spezifischen Wärmekapazität von Luft von $c_{pLuft} = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ nach [Gleichung 5.7](#) in der Einheit Watt berechnet.

$$\dot{W}_{compr} = 0.000358 \frac{T_1}{\eta\eta_m} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \lambda I n \text{ W} \quad (5.7)$$

Dividiert man die durch die Druckerhöhung gewonnene Leistung der Brennstoffzelle ΔP und die vom Kompressor aufgenommene Leistung \dot{W}_{compr} durch den Strom I und die Zellenanzahl n , erhält man die entsprechende Spannungserhöhung der Brennstoffzelle ΔV_{gain} , siehe [Gleichung 5.8](#),

$$\Delta V_{gain} = C \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (5.8)$$

und Spannungssenkung bedingt durch den Kompressor ΔV_{compr} , siehe [Gleichung 5.9](#).

$$\Delta V_{compr} = 0.000358 \frac{T_1}{\eta\eta_m} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \lambda \quad (5.9)$$

Bildet man die Differenz der beiden Spannungen, erhält man die durch die Systemdruckerhöhung gewonnene Nettospannung ΔV_{netto} , siehe [Gleichung 5.10](#).

$$\Delta V_{netto} = \Delta V_{gain} - \Delta V_{compr} \quad (5.10)$$

Ist die Nettospannung ΔV_{netto} positiv, bringt die Systemdruckerhöhung eine höhere Leistungsdichte, ist sie negativ verbraucht der Kompressor mehr Leistung als zusätzlich aus der Brennstoffzelle gewonnen wird. In [Abbildung 5.11](#) ist die Nettospannung für zwei unterschiedliche Parametersets in Abhängigkeit des Druckverhältnisses dargestellt. Für die optimistischen Parameter ergibt sich eine positive Nettospannung mit dem höchsten Wert bei einem Druckverhältnis von etwa 3. Bei den realistischen Parametern ergibt sich jedenfalls eine negative Nettospannung. Die verwendeten Parameter sind in [Tabelle 5.2](#) angeführt. Die quantitative Untersuchung der Nettospannung mithilfe der einfachen Gleichungen des Kompressors und der Druckabhängigkeit der Brennstoffzelle gibt einen ersten Überblick über das recht komplexe Thema des Kompressors und

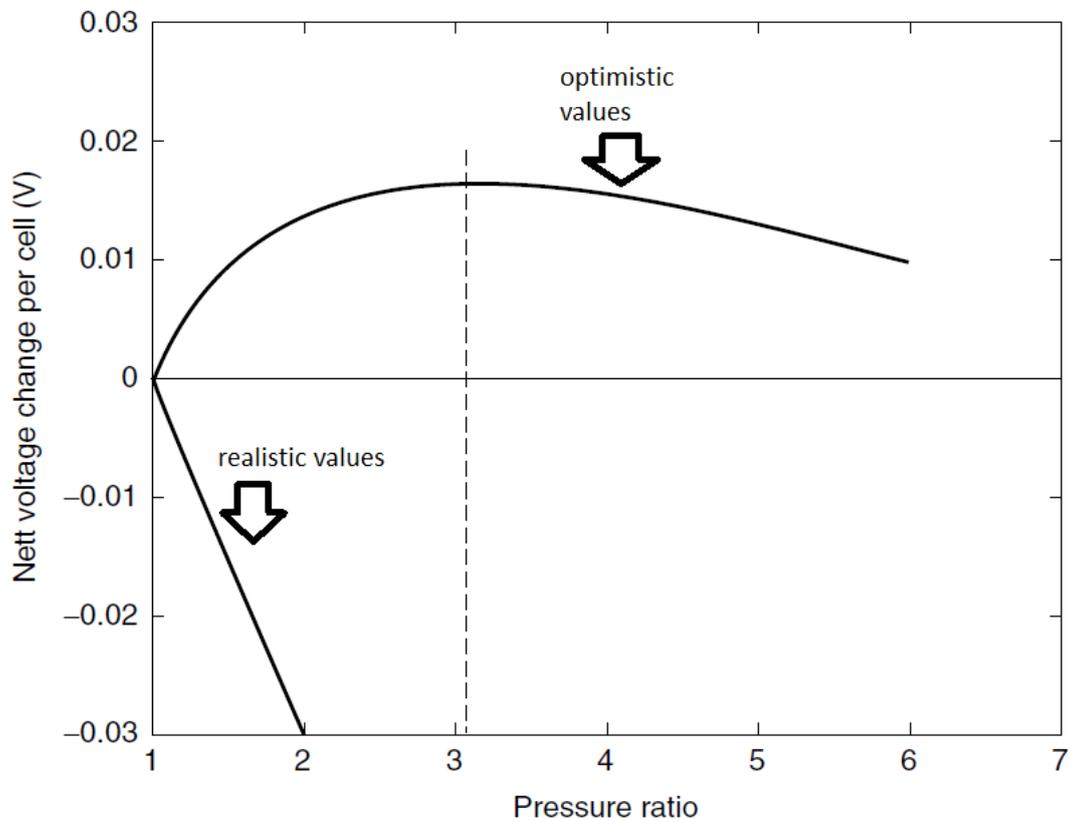


Abbildung 5.11: Nettospannungsänderung aus Brennstoffzellenstack und Kompressor in Abhängigkeit des Druckverhältnisses [1].

Tabelle 5.2: Optimistisches und realistisches Parameterset zur Ermittlung der Nettospannung.

Parameter	realistisch	optimistisch
C	0.06 V	0.1 V
η_m	0.9	0.95
η	0.7	0.75
λ	1.75	2
T_1	288 K	288 K

des Brennstoffzellensystemdruckes. Es könnte ein Grund dafür erläutert werden, warum der Systemdruck typischerweise mit 3 bar gewählt wird. Ein weiterer Grund ist vor allem die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit der Luft an der Kathode. Da die Umgebungsluft oft zu trocken für die Elektrolytmembran ist, muss die Luft vor der Ka-

thode befeuchtet werden. Weiters liegt die Umgebungstemperatur unter der für PEM-Brennstoffzellen typischen Betriebstemperatur von 353 K. Durch den Verdichter lässt sich die Temperatur der Luft erhöhen. Die Wärmeenergie kann zur einfacheren Befeuchtung verwendet werden. Da der Sättigungsdampfdruck exponentiell mit der Temperatur steigt, wäre die Luft ohne Befeuchtung bei hohen Temperaturen viel zu trocken. Der höhere Systemdruck erleichtert ebenfalls die Befeuchtung der Luft, da durch den höheren Luftdruck auch der Partialdruck des Wasserdampfes steigt und damit steigt auch die relative Feuchte [1].

In dem bestehendem Brennstoffzellenmodell ist der Wert und die Berechnung des Parameters C nicht angegeben. Durch Druckvariation und Rückrechnen ließ sich bei einer Temperatur von 353 K ein Wert von $C = 0.022$ ermitteln. Dieser liegt etwas unter den Werten die in der Literatur angegeben werden. Aufgrund des niedrigen Wertes von C und durch pessimistischere Annahmen der Kompressorwirkungsgrade aus Gründen der Übereinstimmung mit Messergebnissen aus [9] ergibt sich mit dem in dieser Arbeit verwendeten Modell jedenfalls eine negative Nettospannung ΔV_{netto} . Zur näheren Untersuchung des Themas empfiehlt sich ein detaillierteres Brennstoffzellenmodell, insbesondere mit unterschiedlichen Einflüssen der Partialdrücke von Sauerstoff und Wasserdampf bei unterschiedlichen Stromdichten. Weiters wäre ein detaillierteres Kompressormodell mit Druck- und Luftmassenstromabhängigen Wirkungsgradkennfeld hilfreich.

5.8 Rekuperation

Um die kinetische Energie des Fahrzeuges zu nutzen, wird diese beim Bremsvorgang wieder in die Batterie zurückgespeist. Falls der Generator nicht genügend Bremsleistung aufbringen kann, wird mithilfe von konventionellen Bremsen zusätzliche Bremsleistung zur Verfügung gestellt. Für Geschwindigkeiten unter 5 km/h wird nicht mehr rekuperiert. Bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h und einer Fahrzeugmasse von 1500 kg beträgt die kinetische Energie 833.3 kJ, siehe [Gleichung 5.11](#).

$$\frac{1500 \text{ kg}}{2} \left(1000 \frac{120 \text{ km/h}}{3600} \right)^2 = 833.3 \text{ kJ} \quad (5.11)$$

Aus der Simulation ergibt sich, dass beim Rekuperieren von 120 km/h bis 0 km/h in 34 s (letzte absteigende Rampe des NEFZ) in die Batterie 498 kJ zurückgespeist werden. Dies entspricht 60 % der kinetischen Energie des Fahrzeugs. Die übrigen 40

% der Energie gehen durch die Fahrwiderstände (Luftwiderstand, Rollwiderstand), den Wirkungsgrad des Elektromotors und den Ladewirkungsgrad der Batterie verloren. Bei neuerlicher Nutzung dieser Energie aus der Batterie wäre diese durch den coulombschen Wirkungsgrad und die Verluste bedingt durch den Innenwiderstand der Batterie etwas geringer.

5.9 Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs

Die theoretische Höchstgeschwindigkeit v_{max} aus den Übersetzungen errechnet, ergibt nach [Gleichung 5.12](#) mit einem Reifenradius $R_{Rad} = 300$ mm, der maximalen Drehzahl des Elektromotors $\omega = 628$ rad s⁻¹ und der Übersetzung des Differentials $u = 4.5$ eine Höchstgeschwindigkeit von 150.7 km/h.

$$v_{max} = \frac{\omega R_{Rad}}{u} \quad (5.12)$$

Dies entspricht ebenso der praktischen Höchstgeschwindigkeit, da der Elektromotor mit maximaler Drehzahl rotiert, aber noch ein höheres Moment liefern könnte. In [Abbildung 5.12](#) ist der Betriebspunkt des Elektromotors bei Höchstgeschwindigkeit eingezeichnet. Würde man das Differential mit einer geringeren Übersetzung wählen, wären noch größere Geschwindigkeiten möglich. Bei einer Differentialübersetzung von 3.2 ergibt sich eine Höchstgeschwindigkeit von 189 km/h. Bei einer Differentialübersetzung von 4.5 und einer Geschwindigkeit von 150 km/h benötigt der Motor eine elektrische Leistung von 40 kW. Da der Brennstoffzellenstack eine maximale Leistung von 50 kW aufweist (bei 44 % Systemwirkungsgrad, in [Abbildung 5.10](#) entspricht dies dem Betriebspunkt bei der höchsten Stromdichte) und noch die Systemkomponenten (in Summe 16 kW) versorgen muss, liefert das Brennstoffzellensystem eine maximale Nettoleistung von 34 kW. Die Batterie muss daher die zusätzlichen 6 kW bereitstellen. Ihr Ladezustand sinkt also kontinuierlich bei dieser Geschwindigkeit. Maximal kann das Brennstoffzellensystem also 34 kW elektrische Leistung bereitstellen. Dies entspricht der elektrischen Leistungsanforderung des Elektromotors bei 140 km/h. Das Fahrzeug kann folglich konstant 140 km/h fahren, ohne die Batterie zu entladen.

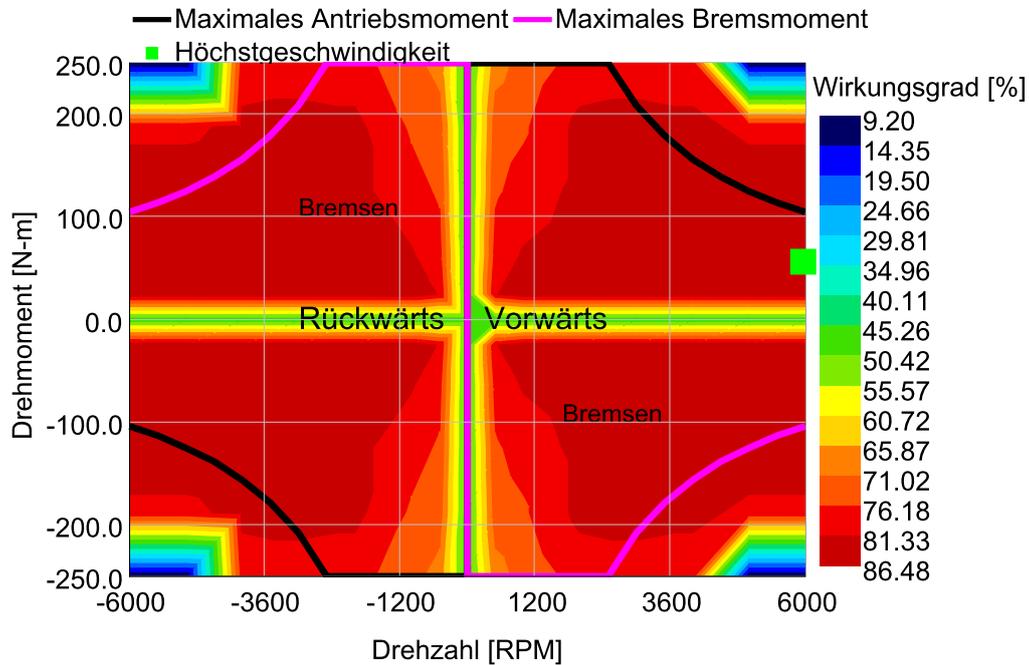


Abbildung 5.12: Betriebspunkt des Elektromotors im Wirkungsgrad-Kennfeld bei der Höchstgeschwindigkeit von 150,7 km/h.

5.10 Maximale Beschleunigung

Abbildung 5.13 zeigt den SOC der Batterie und die Geschwindigkeit des Fahrzeuges bei maximaler Beschleunigung auf 140 km/h und anschließendem Bremsen ohne mechanische Bremsen (nur Rekuperieren mit dem Elektromotor). Beim Beschleunigen sinkt der SOC der Batterie, da der Elektromotor bei der entsprechenden Drehzahl mit maximalem Drehmoment die Geschwindigkeit des Fahrzeugs erhöht. Mit sinkendem SOC steigt die Leistung der Brennstoffzelle an, siehe [Abbildung 5.14](#). Bei 140 km/h bleibt der SOC nahezu konstant, da das Fahrzeug bei dieser Geschwindigkeit die gesamte maximale Leistung der Brennstoffzelle benötigt. Die dadurch bedingte Verlustleistung erhöht die Temperatur der Brennstoffzelle und somit auch ein wenig die maximale Leistung, die dazu verwendet wird, um die Batterie zu laden (der SOC steigt bei 140 km/h leicht an). Der SOC sinkt beim Beschleunigen auf etwas unter 0,7 ab. Um den SOC nicht unter 0,5 fallen zu lassen (aus Gründen der Lebensdauererhöhung der Batterie) reicht eine Batteriekapazität von 3 Ah aus. Weitere Beschleunigungen auf höhere Geschwindigkeiten

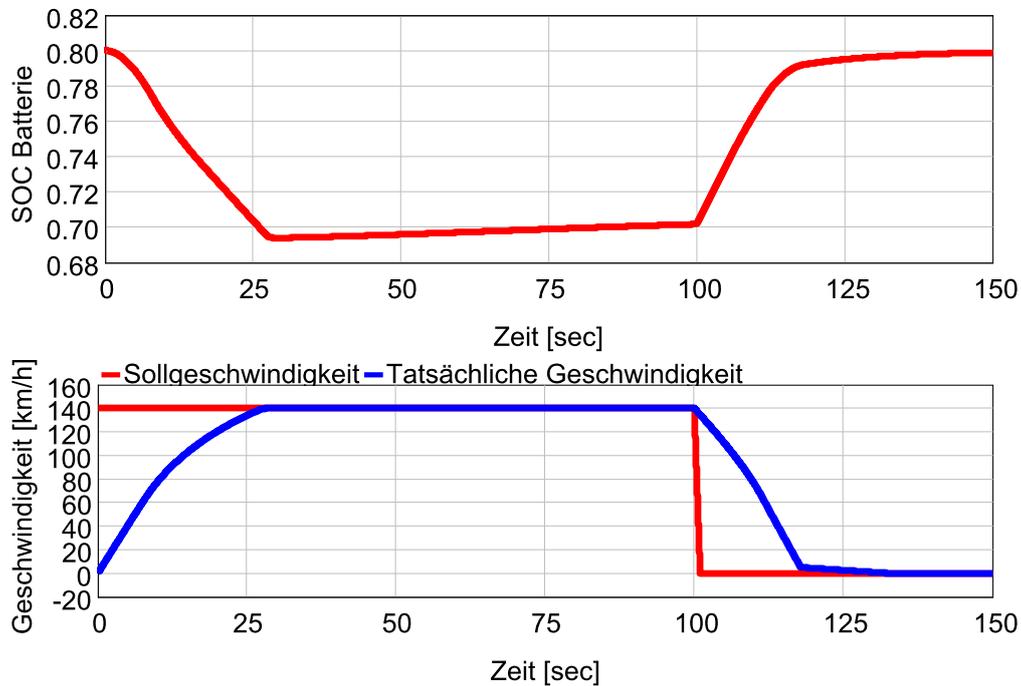


Abbildung 5.13: Geschwindigkeit und SOC-Verlauf bei maximaler Beschleunigung auf 140 km/h und Bremsen auf 0 km/h ohne mechanische Bremsen (nur Rekuperieren mit dem Elektromotor).

würden den SOC noch weiter senken.

Bei diesem Modell stellt die Brennstoffzelle die Leistung instantan bereit, es sind keine transienten Effekte modelliert. In der Realität ist dies aber nicht möglich, denn die elektrische Leistungsabgabe der Brennstoffzelle hängt vom verfügbaren Luftmassenstrom an der Kathode und vom Wasserstoffstrom an der Anode ab. Da der Wasserstoff z.B. in einem 700 bar Drucktank gespeichert ist, lässt sich der Wasserstoffstrom durch ein Drosselventil schnell erhöhen. Der Luftmassenstrom an der Kathode hängt vom Kompressor ab. Dieser kann innerhalb von 2.5 Sekunden den maximalen Luftdurchsatz liefern (neuere Kompressoren weisen noch niedrigere Werte auf) [9]. Somit kann das Brennstoffzellensystem innerhalb von 2.5 Sekunden seine Leistung von Null auf das Maximum von 34 kW erhöhen. Der Elektromotor benötigt bei der maximalen Beschleunigung aus dem Stillstand (annähernd linearer Leistungsanstieg) nach 2.5 Sekunden erst 29 kW. Somit könnte diese Beschleunigung bei entsprechender Dimensionierung der Brennstoffzelle

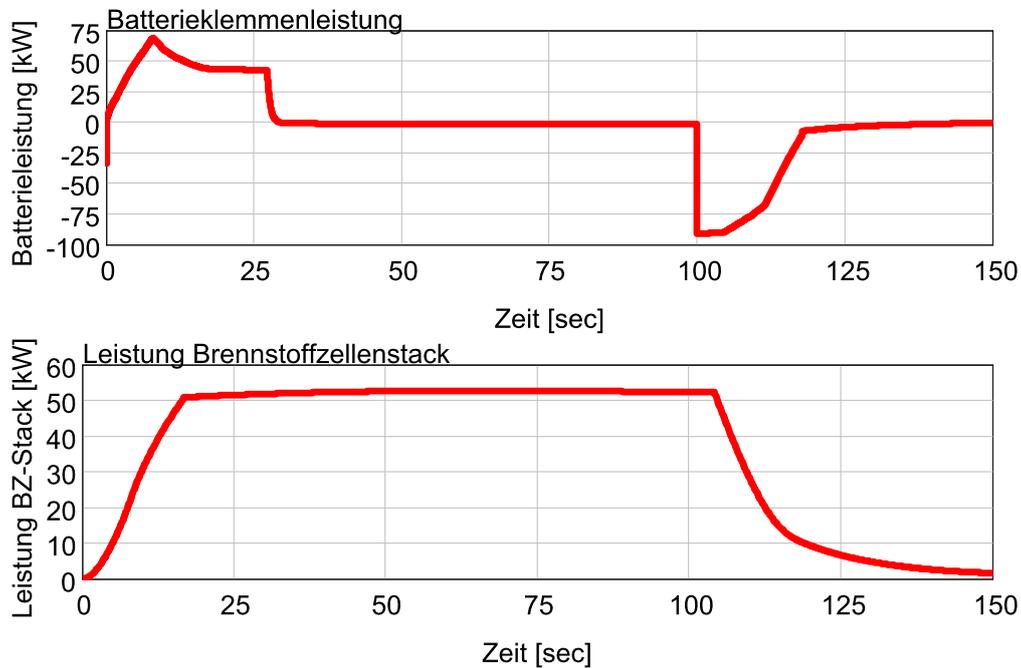


Abbildung 5.14: Brennstoffzellenstackleistung und Batterieklemmenleistung bei maximaler Beschleunigung und Bremsen (ohne mechanische Bremsen, nur Rekuperieren).

auch ohne Batterie durchgeführt werden, da sich die Leistung des Brennstoffzellensystems schneller erhöhen lässt, als der Motor die Leistung benötigt. Die Batterie bringt aber den Vorteil, dass dadurch entstehende dynamische Lasten der Brennstoffzelle reduziert werden können und dass die Energierückgewinnung beim Bremsen ermöglicht wird. Eine höhere Batteriekapazität bewirkt geringere Batterie-SOC Schwankungen. Ebenso treten bei SOC-abhängiger Leistungsbereitstellung geringere dynamische Belastungen an der Brennstoffzelle während des Fahrens auf, da sich der SOC langsamer ändert als bei geringeren Kapazitäten. Weiters muss die Batterie in der Lage sein, die durch das Rekuperieren gewonnene Energie zu speichern. [Abbildung 5.13](#) und [5.14](#) zeigen das Verhalten beim Rekuperieren ab Sekunde 100 ohne mechanische Bremsen von 140 km/h bis 0 km/h. Nach etwa 20 Sekunden ist die Geschwindigkeit auf 5 km/h gesunken, wobei ab dieser Geschwindigkeit nicht mehr rekuperiert und auch nicht mechanisch gebremst wird. Beim Bremsen ab Sekunde 100 erhöht sich der SOC der Batterie, einerseits durch die Bremsenergie des Elektromotors im Generatorbetrieb, andererseits durch die Energie

der Brennstoffzelle. Diese liefert solange der SOC noch unter 0.8 liegt entsprechende elektrische Leistungen. Die Batterieklemmenleistung ist beim Laden negativ. Zwischen Sekunde 100 und Sekunde 103 wird die Batterie mit 35 kW aus der Brennstoffzelle und 55 kW vom Elektromotor aufgeladen. Danach wird mit immer geringeren Leistungen geladen, da der SOC zunimmt und dadurch die Brennstoffzellenleistung abnimmt und auch der Elektromotor unter 2500 U/min über eine linear abnehmende Bremsleistung verfügt. Bei zusätzlicher Verwendung der mechanischen Bremsen wäre die Bremszeit sowie die rekuperierte Energie geringer.

5.11 Wirkungsgradkette

In [Tabelle 5.3](#) sind einige Betriebspunkte und die Wirkungsgradkette des Brennstoffzellenfahrzeugs dargestellt. Dabei wurden jeweils in einer Spalte für bestimmte Geschwindigkeiten die Leistungen der Komponenten vom Wasserstofftank bis zum Rad sowie der Gesamtwirkungsgrad angeführt. Hierbei handelt es sich um konstant gefahrene Geschwindigkeiten, sodass keine Nettoleistung aus oder in die Batterie gespeist wird und das Fahrzeug nicht beschleunigt. [Abbildung 5.15](#) zeigt die Anteile der Komponenten an der Gesamtleistung aus dem Tank für zwei ausgewählte Geschwindigkeiten.

Tabelle 5.3: Wirkungsgradkette des Brennstoffzellenfahrzeugs bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Die Leistungen in einer Spalte entsprechen einer konstant gefahrenen Geschwindigkeit. Die Leistung verringert sich von der obersten Zeile (Leistung des Wasserstoffstroms) bis zur letzten Zeile (Leistung am Rad) durch die Verluste der einzelnen Komponenten.

Konst. Geschw. [km/h]	10	30	50	100	130
Gesamtwirkungsgrad [%]	18	32	35	42	38
zugeführt H ₂ [kW]	2.2	4.7	8.9	30.5	64
nach purgen [kW]	2.1	4.5	8.5	29	61
BZ-Stack [kW]	1.8	3.7	6.9	21.5	40.6
nach Kompressor [kW]	1.3	3.1	5.8	17.6	32.5
nach Kühlung [kW]	1.1	2.9	5.2	16.4	30.6
DC-DC-Konv. Ausgang [kW]	1	2.6	4.8	15.3	28.3
Motor elektrisch [kW]	0.7	2.3	4.5	15	28
Rad [kW]	0.4	1.5	3.1	12.7	24.1

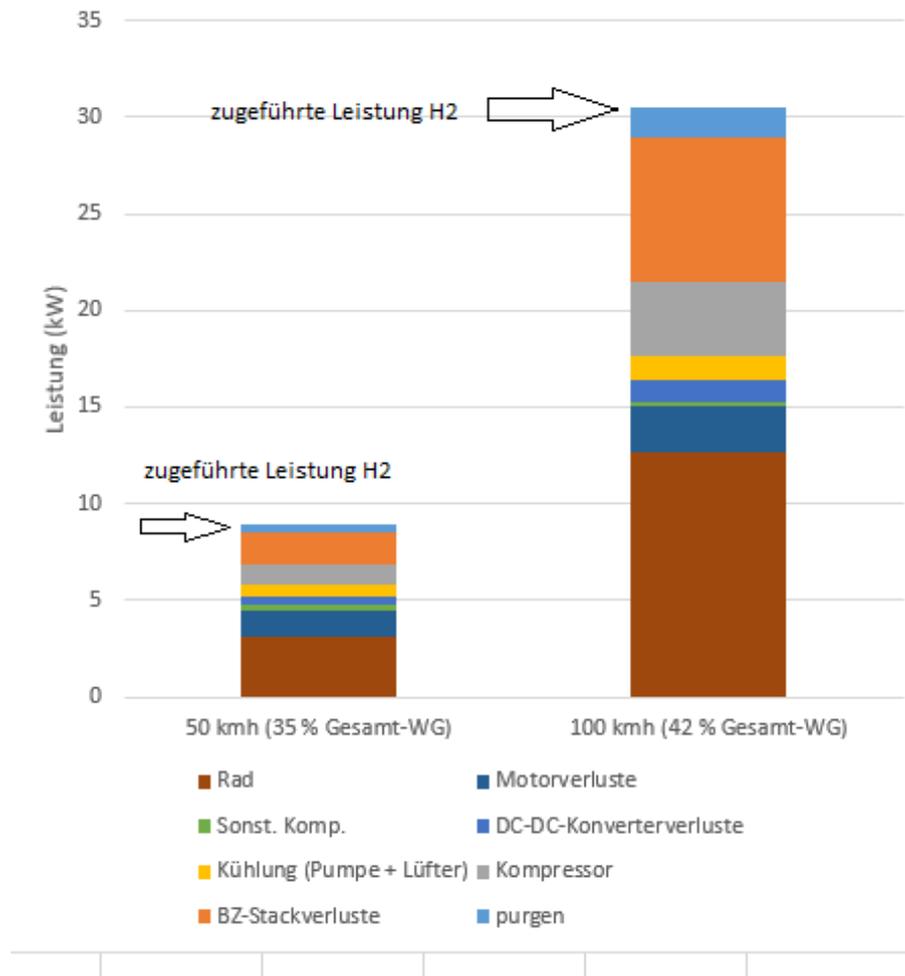


Abbildung 5.15: Gesamte Leistung aus dem Tank (zugeführte Energie aus H₂) und Anteile der Leistungen der einzelnen Komponenten des Fahrzeuges.

Kapitel 6

Fahrzyklenanalyse

Ausgehend von den in [Kapitel 5](#) angeführten Fahrzeugkomponenten und dem daraus aufgebauten gesamten Fahrzeugmodell, wurde dieses verwendet, um das Verhalten des Brennstoffzellensystems während bestimmter Fahrzyklen zu untersuchen. Dadurch können Aussagen über die Energieverluste und unterschiedliche Betriebsstrategien des Brennstoffzellensystems getroffen werden. Weiters können Grenzen hinsichtlich der Komponentendimensionierung aufgezeigt werden. Zur Untersuchung wurden der Neue Europäische Fahrzyklus (New European Driving Cycle, NEDC) und der US06 (Supplemental Federal Test Procedure SFTP) herangezogen, siehe [Abbildung 6.1](#).

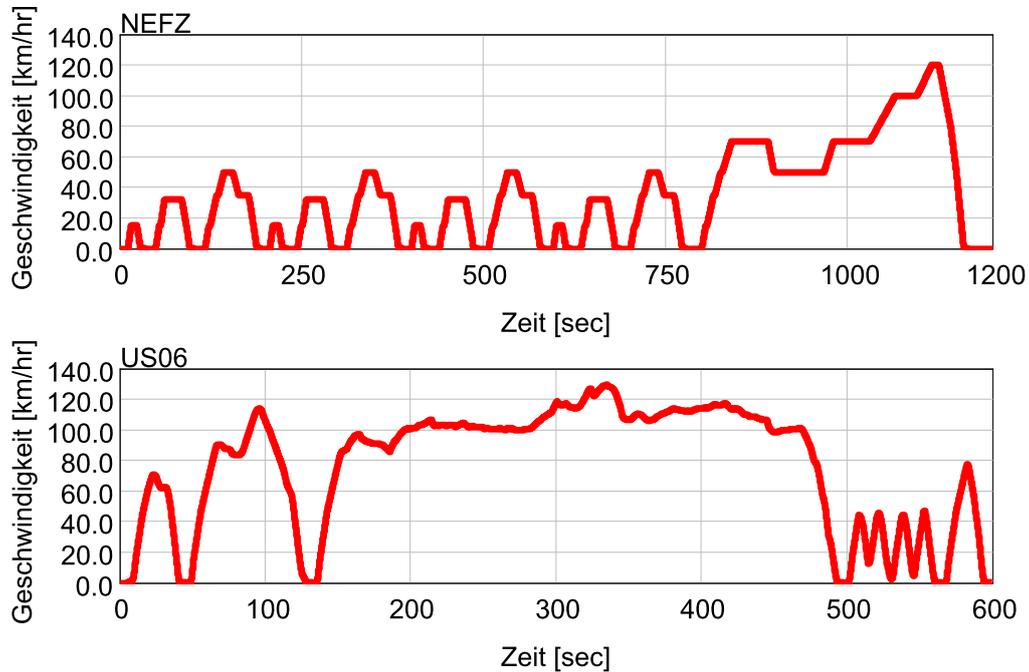


Abbildung 6.1: Geschwindigkeiten im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) [17] und im US06 (Supplemental Federal Test Procedure SFTP) [18].

Diese Zyklen wurden ausgewählt, da sie zwei möglichst unterschiedliche Geschwindigkeitsverläufe aufweisen und sich dadurch andersartige Verhalten der Fahrzeugkomponenten ergeben. Beim NEFZ werden insgesamt 11.007 km bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 33.6 km/h zurückgelegt. Beim US06 sind es 12.8 km und 77.9 km/h. Dadurch wird beim NEFZ gegenüber dem US06 etwa die doppelte Zeit benötigt, um weniger Kilometer zurückzulegen. Weiters sind die Beschleunigungen im US06 (maximale Beschleunigung 3.8 m/s^2) größer als im NEFZ (maximale Beschleunigung 1.04 m/s^2). Aus diesen Gründen werden im US06 größere Leistungen benötigt, was in weiterer Folge auch den Kraftstoffverbrauch erhöht.

6.1 Verhalten der Brennstoffzelle während des NEFZ und US06

In [Abbildung 6.2](#) ist der SOC der Batterie und die Leistung des Brennstoffzellenstacks während des NEFZ dargestellt. Erkennbar ist der Zusammenhang zwischen SOC der Batterie und der davon abhängenden Leistung der Brennstoffzelle. Reicht die Leistung der Brennstoffzelle nicht aus, um die angeforderte Leistung des Elektromotors bereitzustellen, wird die übrige Leistung von der Batterie geliefert und der Ladezustand verringert sich. Ist die Leistung der Brennstoffzelle größer als die angeforderte Leistung des Elektromotors, wird die überschüssige Energie in die Batterie geladen und der Ladezustand erhöht sich. Weiters wird die Batterie zusätzlich vom Elektromotor im Generatorbetrieb während der Bremsvorgänge geladen. Die SOC-abhängige Leistungsbereitstellung der Brennstoffzelle wurde so gewählt, dass sich am Ende des Zyklus der gleiche SOC der Batterie wie zu Beginn einstellt.

Analog zum NEFZ ergibt sich im US06 ebenfalls ein direkter Zusammenhang von Stackleistung und SOC, welcher hier nicht extra dargestellt ist. Ebenso wird bei den nächsten Abbildungen aus Redundanzgründen auf die Darstellung des entsprechenden Sachverhaltes im US06 verzichtet, falls dieser analog zum NEFZ ist und somit anhand dessen erläutert werden kann. Um im US06 den SOC vor und nach dem Zyklus auf das selbe Level zu bringen, wurde der Brennstoffzelle nach dem Zyklus 20 Sekunden lang Zeit gegeben, um den SOC auszugleichen. Der SOC sinkt im Fahrzyklus bei der Batteriekapazität von 9 Ah bis auf 0.72 ab. In diesem Punkt liefert auch die Brennstoffzelle die höchste Leistung von 45 kW, was 90 % der maximalen Leistung von 50 kW entspricht. Im NEFZ beträgt die maximale Stackleistung 37 kW, dies entspricht 74 % der maximal möglichen Stackleistung. Die durchschnittliche Stackleistung beträgt im US06 21 kW, was über der durchschnittlichen Stackleistung des NEFZ von 6.3 kW liegt. Der Leistungs-, Spannungs- und Stromverlauf weist im US06 größere Schwankungen als im NEFZ auf, da die Geschwindigkeit öfter von großen auf kleine Werte und umgekehrt geändert wird und auch höhere Beschleunigungen auftreten.

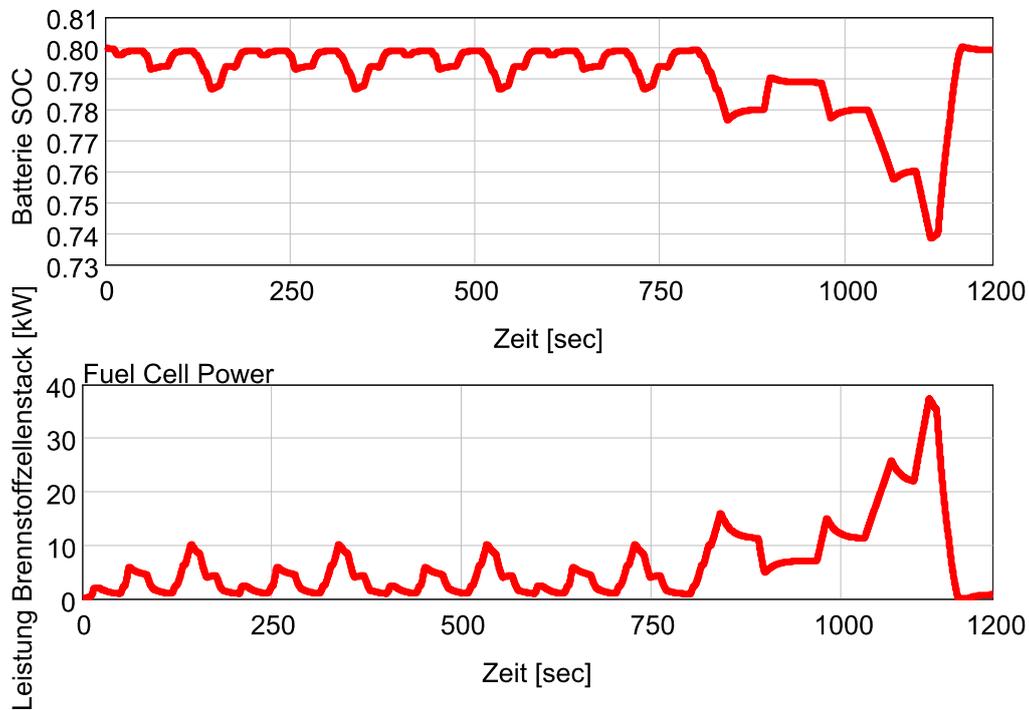


Abbildung 6.2: SOC der Batterie und abgegebene Leistung des Brennstoffzellenstacks während des NEFZ

In [Abbildung 6.3](#) sind Strom und Spannung der Brennstoffzelle im NEFZ dargestellt. Wie aus den Kennlinien der Brennstoffzelle bekannt, sinkt die Spannung mit zunehmendem Strom aufgrund der von der Stromdichte abhängigen Spannungsverluste. Im US06 ergibt sich ein analoger Verlauf, welcher aus weiter oben genannten Gründen nicht noch einmal dargestellt ist.

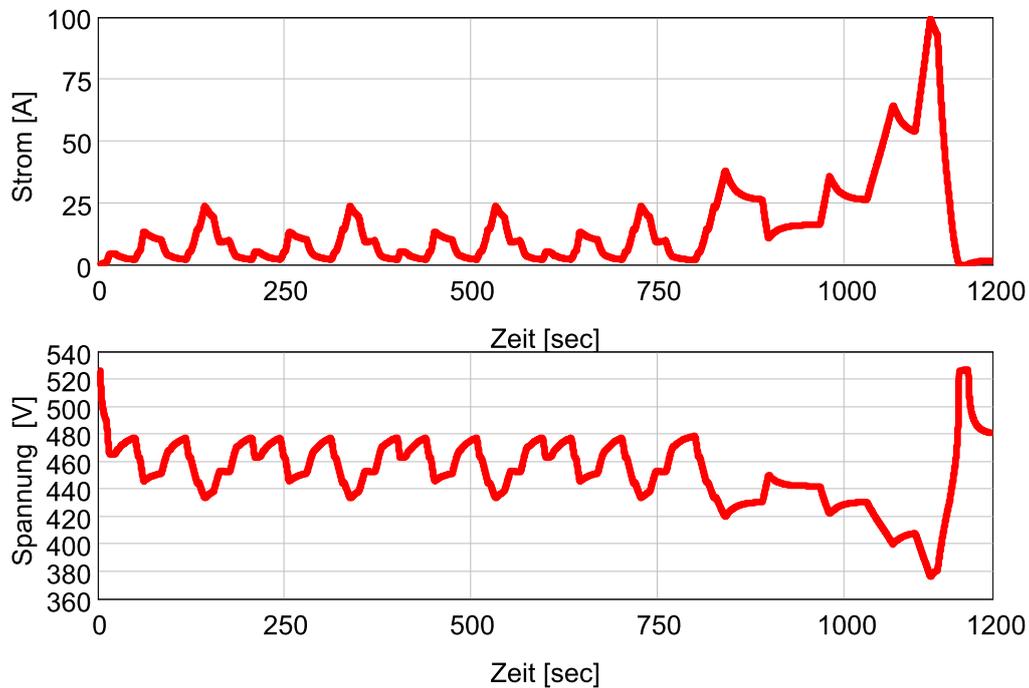


Abbildung 6.3: Spannung und Strom der Brennstoffzelle während des NEFZ.

In [Abbildung 6.4](#) sind die Betriebspunkte des Elektromotors bei den konstanten Geschwindigkeiten des NEFZ dargestellt. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die Drehzahl des Motors, da eine fixe Übersetzung der Motordrehzahl bis zu den Rädern besteht. Zusätzlich steigt auch das Drehmoment, da für höhere Geschwindigkeiten zur Überwindung der Fahrwiderstände auch ein höheres Drehmoment benötigt wird.

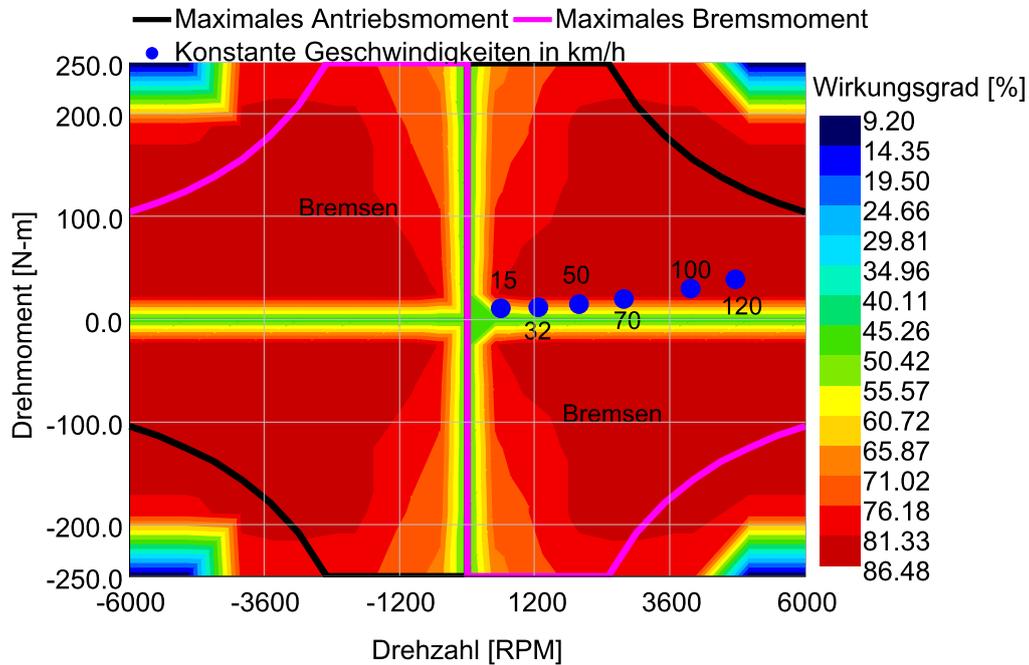


Abbildung 6.4: Betriebspunkte des Elektromotors im Wirkungsgrad-Kennfeld bei den Geschwindigkeitsplateaus des NEFZ.

In [Abbildung 6.5](#) sind die Leistungsbedarfe der Komponenten des Brennstoffzellensystems während des NEFZ dargestellt. Der Kompressor weist den größten Leistungsbedarf der Systemkomponenten auf. Im NEFZ beträgt die maximale Leistung des Brennstoffzellenstacks 37 kW, davon benötigt der Kompressor 7 kW und somit 19 % der Stackleistung und das Kühlsystem 1,8 kW und daher 5 % der Stackleistung. Die höchste Kompressorleistung im US06 beträgt 9,5 kW bei einer Stackleistung von 45 kW. Der Leistungsbedarf des Kühlsystems beträgt in diesem Punkt etwa 2 kW. Der Kompressor benötigt daher 21 % und das Kühlsystem 4 % der Stackleistung. Da die Kompressorleistung vom Wasserstoffstrom abhängt, steigt diese aufgrund des sinkenden Wirkungsgrades des Brennstoffzellenstacks prozentuell bei höheren elektrischen Lasten an, da ein größerer Teil der Energie des Wasserstoffes in Wärme umgewandelt wird. Ebenso weist der Kompressor eine Mindestleistung von 500 W auf, sodass zu geringe Lasten des Brennstoffzellensystems ebenfalls ineffizient sind. Aufgrund des nichtlinearen Verlaufes des Leistungsbedarfes des Kühlsystems benötigt dieses bei höheren Leistungen prozentu-

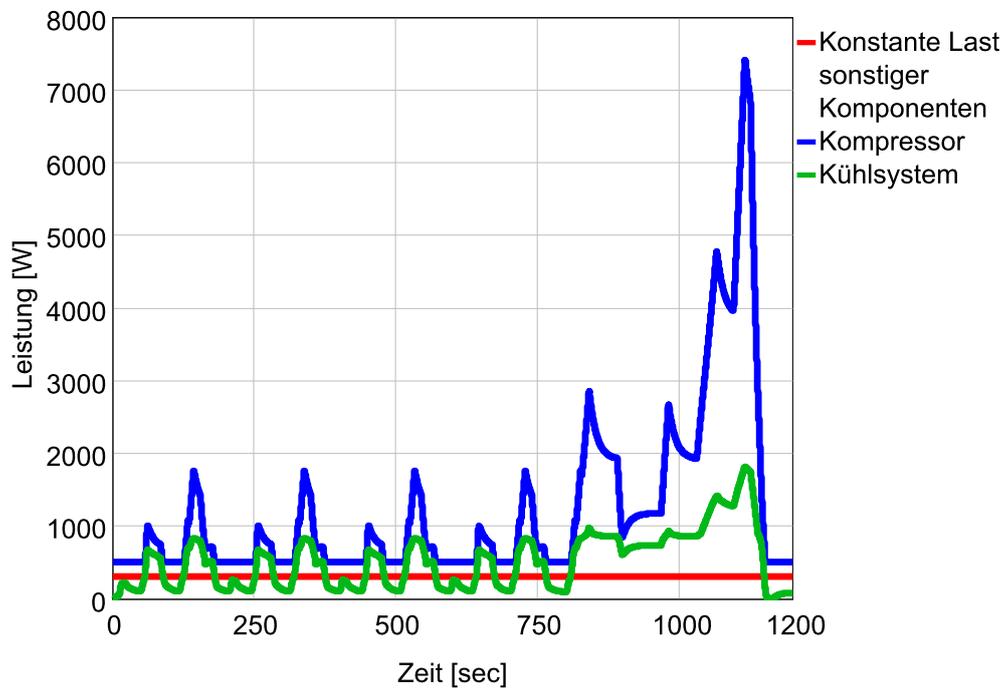


Abbildung 6.5: Leistungsbedarf der Brennstoffzellensystemkomponenten während des NEFZ.

ell weniger Leistung des Brennstoffzellenstacks. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Brennstoffzellensystem im Idealfall konstant mit mittlerer Last bei höchstem Wirkungsgrad betrieben werden soll, jedoch die wechselnde Leistungsanforderung des Elektromotors durch die Batterie ausgeglichen werden muss und damit höhere Batterieverluste einhergehen. [Abbildung 6.6](#) zeigt die Leistungen an verschiedenen Punkten der Wirkungsgradkette (Wasserstoffstrom in die Brennstoffzelle, abgegebene Leistung des Stacks und abgegebene Leistung des gesamten Brennstoffzellensystems) des Fahrzeugs im NEFZ. Bei der höchsten Leistung (Sekunde 1115) beträgt der Wirkungsgrad (Brennstoffzellensystem/Wasserstoffstrom) rund 47 %. Im US06 beträgt der Wirkungsgrad bei der höchsten Systemleistung von 31 kW rund 44 %.

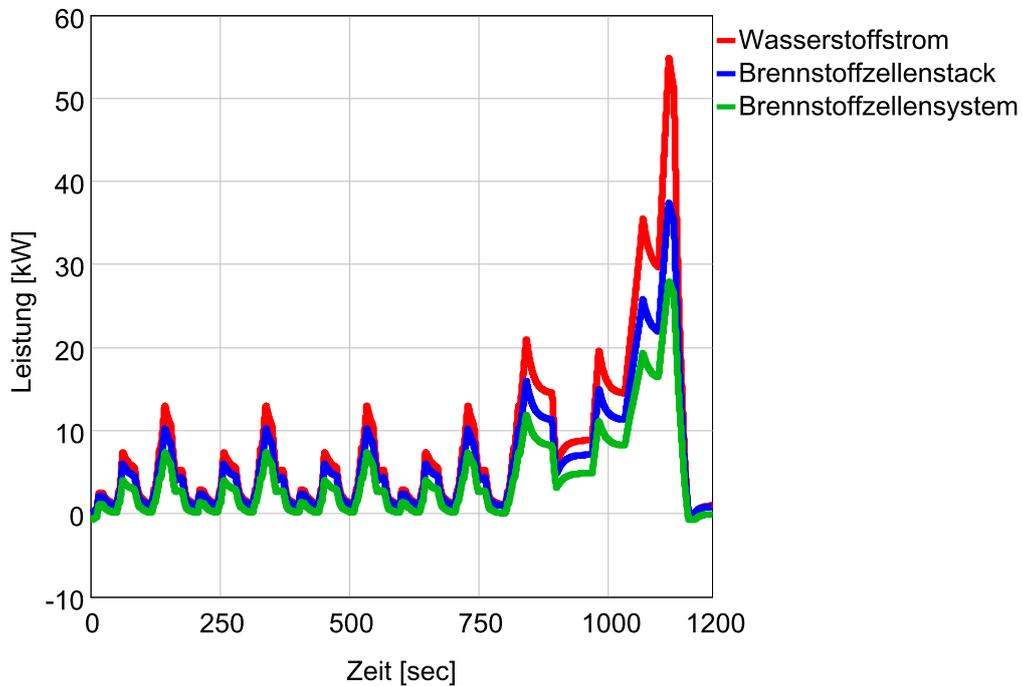


Abbildung 6.6: Leistungen an verschiedenen Punkten der Wirkungskette des Fahrzeugs während des NEFZ.

In [Abbildung 6.7](#) ist der zeitliche Verlauf des Wirkungsgrades und der Leistung des Brennstoffzellensystems während des NEFZ dargestellt. Die teilweise geringen Wirkungsgrade von 10 % und darunter sind durch einen SOC von annähernd 0.8 bedingt. Dieser tritt dann auf, nachdem das Fahrzeug längere Zeit eine Geschwindigkeit von Null aufweist und die Batterie aufgeladen werden kann. Dadurch liefert der Brennstoffzellenstack nur geringe Leistungen, aber die Brennstoffzellensystemkomponenten benötigen konstante Leistungen, wodurch der Wirkungsgrad deutlich sinkt. Somit ist der Wirkungsgrad dann gering, wenn auch die Brennstoffzellenleistung gering ist, wie auch in [Abbildung 5.10](#) ersichtlich ist. Die kinetische Energie des Fahrzeuges wird zwar bei der Leistungsanforderung der Brennstoffzelle berücksichtigt, jedoch wird die Batterie bei konstant gefahrener Geschwindigkeit solange be- bzw. entladen, bis der SOC der Batterie und die dadurch gelieferte Leistung der Brennstoffzelle im Gleichgewicht sind. Dadurch ergibt sich ein SOC von 0.8 nur wenn das Fahrzeug steht und ansonsten, je höher die geforderte Leistung des Motors ist, ein geringerer SOC. Für Leistungen des Brennstoffzellenstacks zwischen

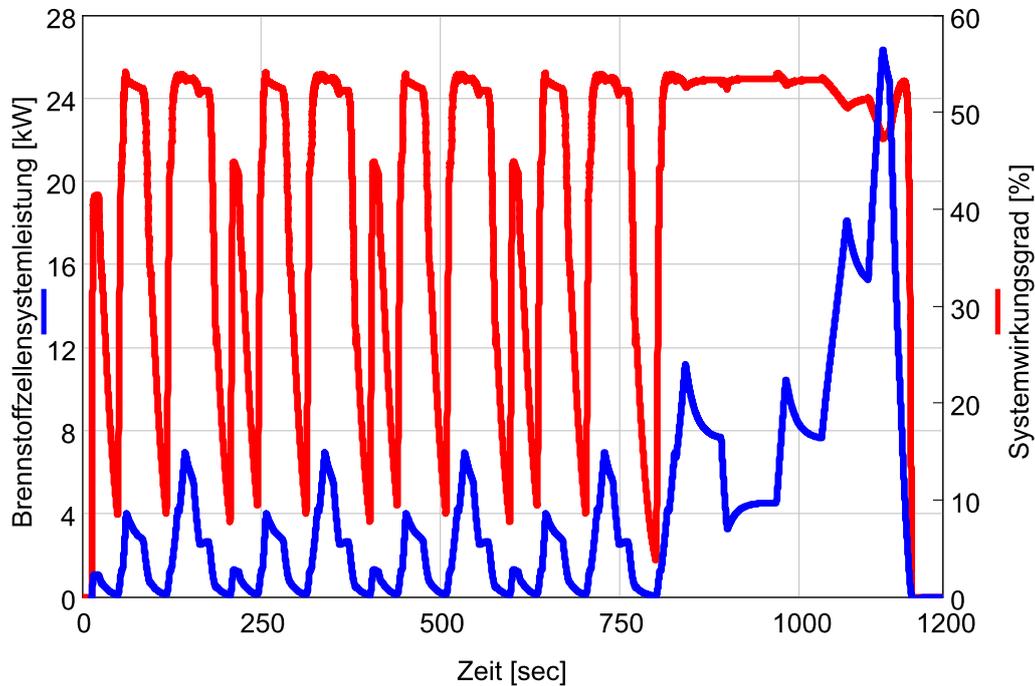


Abbildung 6.7: Wirkungsgrad und Leistung des Brennstoffzellensystems während des NEFZ.

3 kW und 27 kW ist der Systemwirkungsgrad höher als 50 %. Während des NEFZ liefert der Brennstoffzellenstack maximal 37 kW, daher liegt der Systemwirkungsgrad nur bei geringen Leistungen unter 50 %.

Für die Simulation wurde die Anfangstemperatur der Brennstoffzelle mit der typischen Betriebstemperatur von 353 K gewählt. Diese bleibt während des Fahrzyklus durch die Temperaturregelung nahezu konstant. Der Wärmeübertragungskoeffizient von Brennstoffzelle zur Umgebung beträgt mindestens 1 W/K/m^2 , um etwaige Wärmeverluste zu berücksichtigen. Die Temperatur sowie der Wärmeübertragungskoeffizient steigen bei hohen Brennstoffzellenlasten an, da die Verlustleistung höher und der Wirkungsgrad niedriger ist und dadurch auch die Wärmeentwicklung größer ist. Im NEFZ und US06 steigt die maximale Temperaturdifferenz nicht über 4 K hinaus. Hier sei angemerkt, dass die Regelung des Wärmeübertragungskoeffizienten und die damit abgeführte Energie nur indirekt im Zusammenhang mit dem Leistungsbedarf des Kühlsystems steht. Der Wär-

meübertragungskoeffizient wird aufgrund der Temperatur geregelt, der Leistungsbedarf des Kühlsystems hängt von der Leistung des Brennstoffzellenstacks ab.

6.2 Verluste und Fahrwiderstände im NEFZ und US06

Die aus dem Tank entnommene Energie ist aufgeteilt auf die Komponenten und Fahrwiderstände für den NEFZ und für den US06 in Abbildung 6.8 angegeben. Insgesamt wurde noch ein Aufschlag von 5 % für das *purgen* dazugerechnet, (siehe Kapitel 5.4). Der SOC der Batterie weist vor und nach den Zyklen etwa das selbe Level auf, um keine Nettoenergie zu entnehmen oder einzuspeichern. Die sonstigen Komponenten, welche

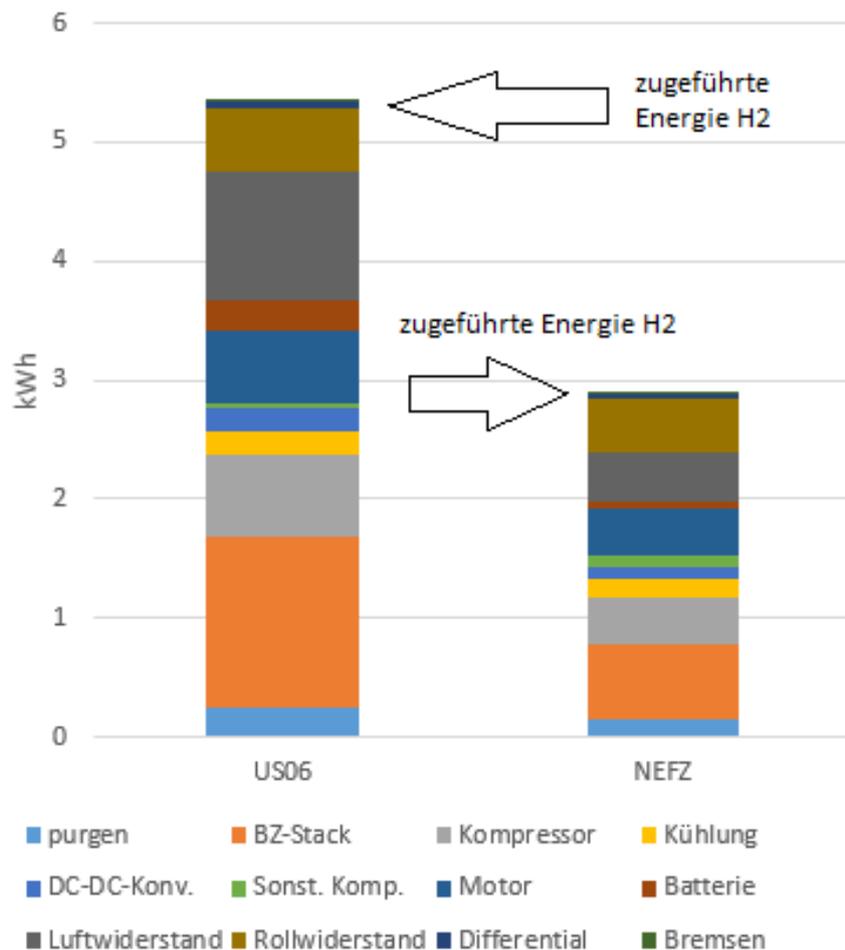


Abbildung 6.8: Energie aus dem Tank aufgeteilt auf den einzelnen Komponenten und Fahrwiderstände des Fahrzeugs.

Tabelle 6.1: Energie- und Kraftstoffverbrauch der Simulation und der Referenzuntersuchung

Simulation	US06	NEFZ
Energieverbrauch mit Rekuperation [kWh/100 km]	41.5	26.2
Energieverbrauch ohne Rekuperation [kWh/100 km]	49.1	31.3
Wasserstoffverbrauch mit Rekuperation [kg/ 100 km]	1.24	0.79
Wasserstoffverbrauch ohne Rekuperation [kg/ 100 km]	1.47	0.94

Referenzuntersuchung (ohne Rekuperation)	US06	NEFZ
Energieverbrauch [kWh/100 km]	-	30.7
Wasserstoffverbrauch [kg/ 100 km]	-	0.92

durch eine konstante Leistung berücksichtigt wurden, benötigen im NEFZ insgesamt mehr Energie als im US06, da der NEFZ zeitlich gesehen etwa doppelte so lange dauert wie der US06. Um die Simulationsergebnisse zu verifizieren bzw. auf Plausibilität zu prüfen wurden sie mit einer Referenzuntersuchung aus der Dissertation [9] verglichen. Darin wurden Messungen an einem Brennstoffzellensystem zur Untersuchung der Energieverbräuche der Komponenten durchgeführt, um anschließend den Kraftstoffverbrauch eines PKW zu berechnen, wobei keine Batterie zur Rekuperation verwendet wurde. Dadurch ist bei der Simulation in dieser Arbeit der Verbrauch pro 100 km aufgrund der Energierückgewinnung beim Bremsen etwas geringer. [Tabelle 6.1](#) zeigt den Energie- und Kraftstoffverbrauch für den NEFZ und US06. Schaltet man in der Simulation die Rekuperation ab und bremst nur mit den konventionellen Bremsen, ergibt sich eine gute Übereinstimmung (Abweichung von ca. 2 %) des Verbrauchs im NEFZ mit der Referenzuntersuchung.

Im NEFZ ergibt sich pro 100 km ein geringerer Energiebedarf als im US06, da eine wesentlich geringere Durchschnittsgeschwindigkeit und geringere Beschleunigung gefordert ist. In beiden Zyklen sind die Verluste des Brennstoffzellenstacks am höchsten, gefolgt von den Kompressor- und Motorverlusten, siehe [Abbildung 6.8](#). Im NEFZ werden am Rad insgesamt 0.92 kWh Energie benötigt. Dividiert man diese Energie durch die vom Wasserstoff gelieferte Energie von 2.89 ergibt kWh sich ein Wirkungsgrad vom Wasserstofftank zu den Rädern im NEFZ von 32 %. Im US06 ergibt sich mit der benötigten Energie am Rad von 1.7 kWh und der vom Wasserstoff gelieferten Energie von 5.33 kWh

ein Wirkungsgrad vom Tank zum Rad von ebenfalls 32 %.

Rekuperation

Durch die Energierückgewinnung beim Bremsen mit dem Elektromotor im Generatorbetrieb werden im NEFZ 0.32 kWh (11 % des gesamten Energieverbrauchs im Zyklus) und im US06 0.53 kWh (10 % des gesamten Energieverbrauchs im Zyklus) in die Batterie gespeichert. Dadurch ergibt sich ohne Rekuperation der Kraftstoffverbrauch wie in [Tabelle 6.1](#) angegeben. Daher lässt sich durch das Rekuperieren der Kraftstoffverbrauch im NEFZ auf 83 % und im US06 auf 85 % senken.

6.3 Analyse der Verluste durch Parametervariation

Um den Einfluss verschiedener Parameter auf die Verluste zu untersuchen, wurden diese variiert und das Verhalten des Fahrzeugs simuliert. Dadurch können Tendenzen zu geringeren Verlusten der Komponenten aufgezeigt werden.

Variation der Brennstoffzellenfläche

In [Abbildung 6.9](#) sind die Verluste von Brennstoffzellenstack, Kompressor und Kühlsystem für den US06 und in [Abbildung 6.10](#) für den NEFZ in Abhängigkeit der Brennstoffzellenfläche und damit auch unterschiedlichen Brennstoffzellenleistungen dargestellt (die maximale Leistung des Stacks ändert sich linear mit der Zellenfläche, [Gleichung 4.1](#)). Die geringste Zellenfläche beträgt 100 cm^2 , da bei kleineren Flächen die Leistung der Brennstoffzelle nicht für einen ausgeglichenen SOC der Batterie ausreicht. Die mit zunehmender Fläche sinkende Verluste ergeben sich durch die geringere Auslastung des

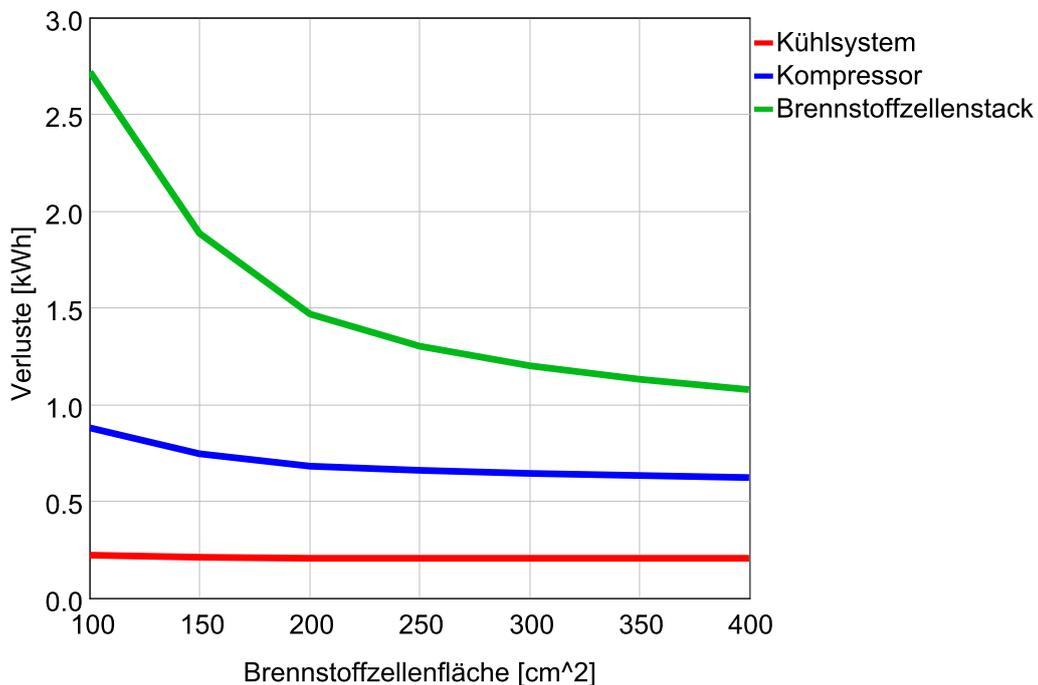


Abbildung 6.9: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Zellenflächen im US06.

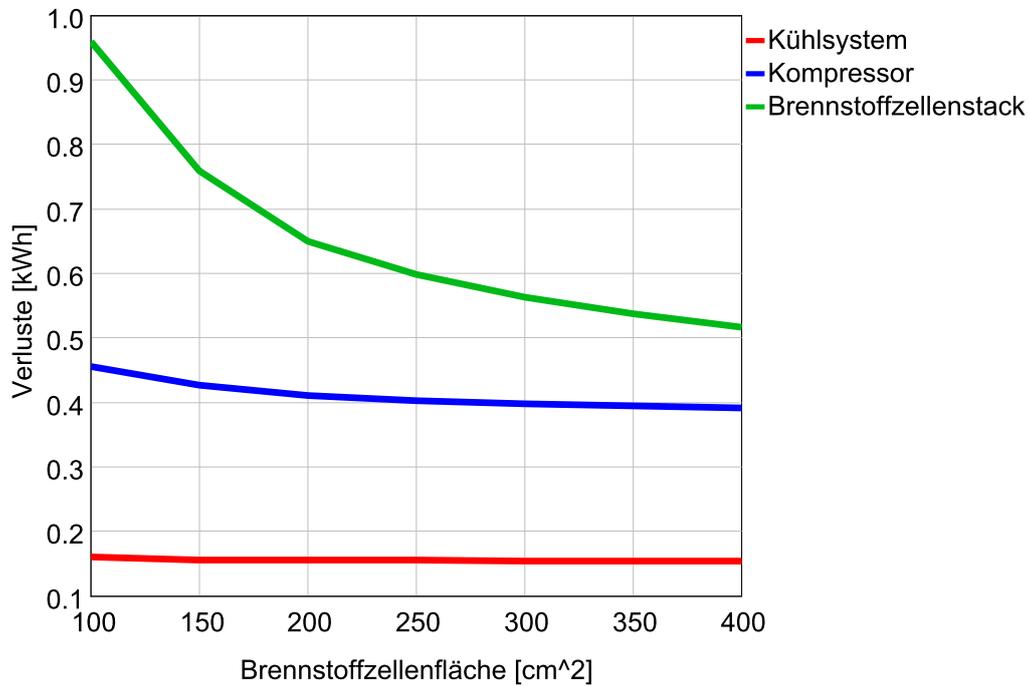


Abbildung 6.10: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Zellenflächen im NEFZ.

Brennstoffzellenstacks und damit höheren Wirkungsgrad. Außer im Fall mit 100 cm² ist die abgegebene Leistung des Brennstoffzellenstack für die unterschiedlichen Flächen nahezu gleich. Dadurch bleiben die Verluste des Kühlsystems ebenso nahezu unverändert, da die Verlustleistung der Kühlung direkt von der Leistung des Brennstoffzellenstacks abhängt. Jedoch unterscheidet sich durch die unterschiedliche Flächenanzahl die maximale Leistung des Stacks und dadurch auch der Wirkungsgrad bei gleicher abgegebener Stackleistung.

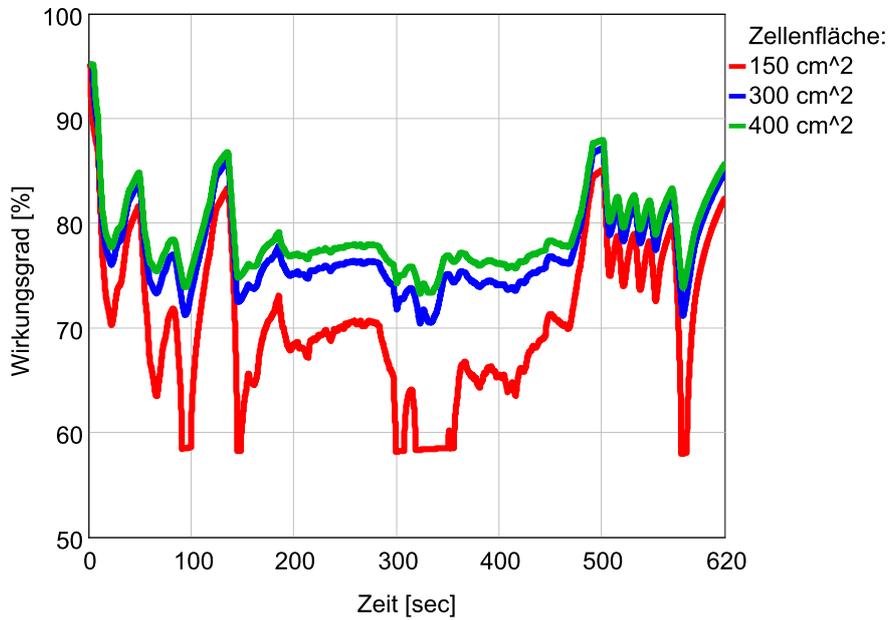


Abbildung 6.11: Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstacks bei unterschiedlichen Zellenflächen im US06.

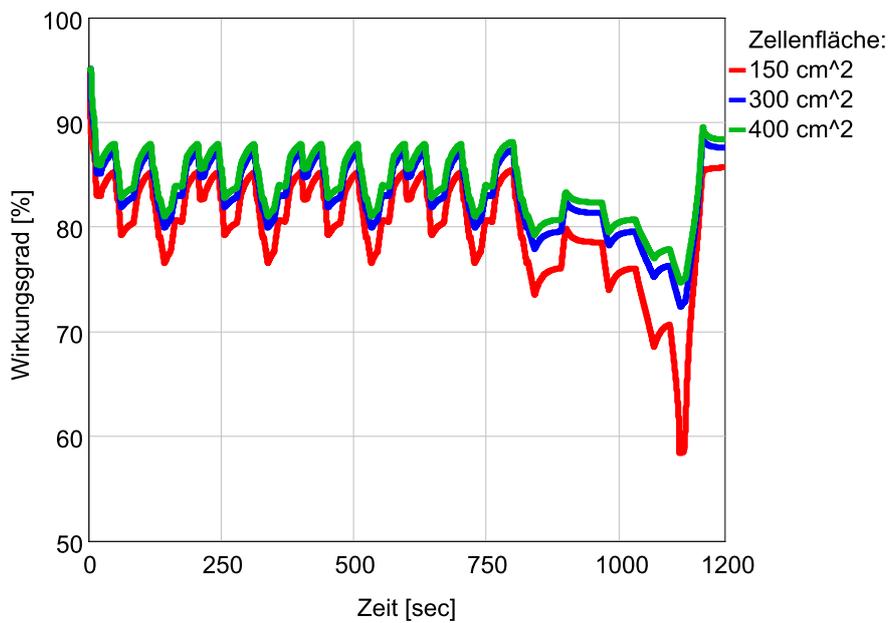


Abbildung 6.12: Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstacks bei unterschiedlichen Zellenflächen im NEFZ.

Abbildung 6.11 zeigt den Wirkungsgrad im US06 und [Abbildung 6.12](#) im NEFZ bei unterschiedlichen Flächen. Je kleiner die Zellenfläche ist, desto geringer ist der Wirkungsgrad. Dadurch fallen bei kleineren Flächen auch mehr Verluste des Brennstoffzellenstacks an. In weiterer Folge muss auch mehr Wasserstoff in der Brennstoffzelle gewandelt werden. Dies führt zu höheren Kompressorleistungen, da der Luftmassenstrom durch den Kompressor von dem von der Brennstoffzelle verbrauchten Wasserstoffstrom abhängt. Bei größeren Zellenflächen ist der Wirkungsgradunterschied des Stacks geringer und damit auch die Verluste des Kompressors. Zu beachten ist bei der Variation der Fläche, dass mit größerer Fläche in der Realität auch längere Luft- und Kühlleitungen einhergehen und damit auch größere Druckverluste, was auch zu größeren Verlustleistungen der Brennstoffzellensystemkomponenten (Kompressor und Kühlsystem) führen würde. Diese blieben aber hier unverändert.

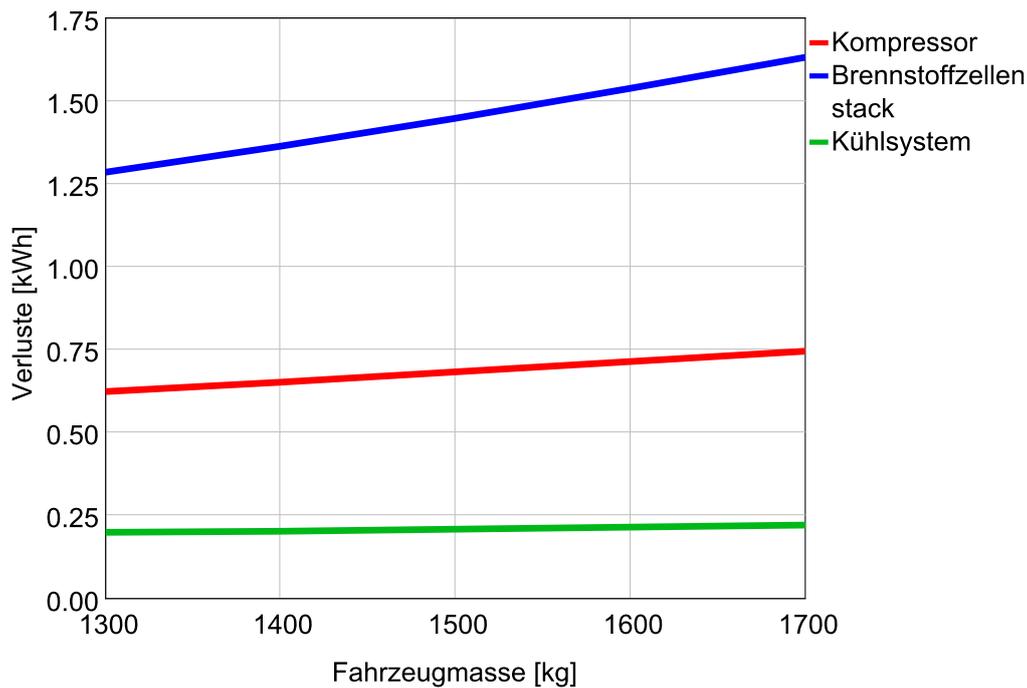


Abbildung 6.13: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Fahrzeugmassen im US06.

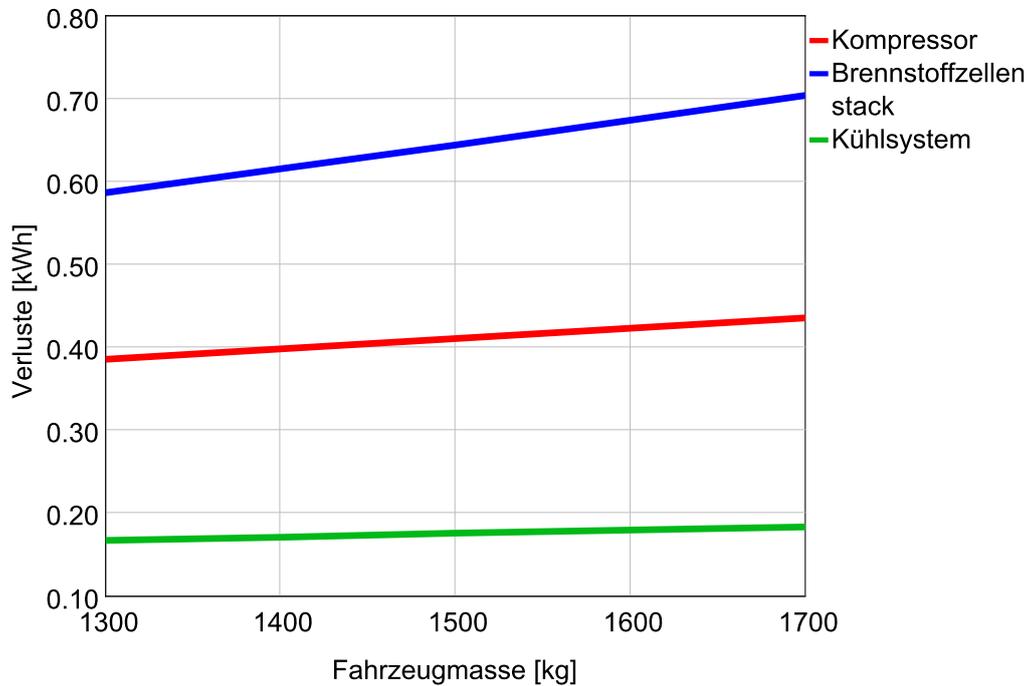


Abbildung 6.14: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Fahrzeugmassen im NEFZ.

Variation der Fahrzeugmasse

Weiters zeigt [Abbildung 6.13](#) den Energieverbrauch im US06 und [Abbildung 6.14](#) den Energieverbrauch im NEFZ bei unterschiedlichen Fahrzeugmassen. Die Verluste steigen linear mit der Fahrzeugmasse an. Durch die größere Masse ist der Rollwiderstand höher. Ebenso wird beim Beschleunigen des Fahrzeugs mehr Leistung benötigt und auch beim Rekuperieren wird mit höherer Leistung in die Batterie Energie zurückgespeichert. Insgesamt muss durch die Brennstoffzelle höhere Leistung und mehr Energie zur Verfügung gestellt werden, was den Wirkungsgrad senkt und auch den Kraftstoffverbrauch erhöht. Ebenso steigt dadurch die Leistungsaufnahme des Kompressors und des Kühlsystems, bei letzterem fällt die Steigung relativ gering aus.

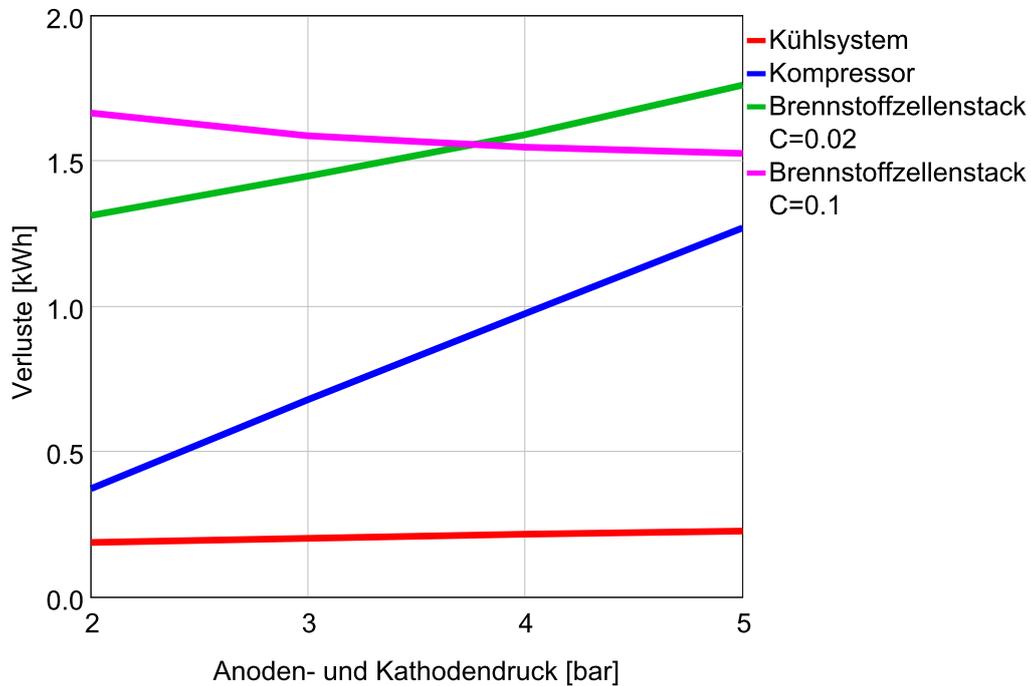


Abbildung 6.15: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Anoden- und Kathodendrücken im US06.

Variation des Brennstoffzellendruckes

In [Abbildung 6.15](#) ist der Energieverbrauch im US06 und in [Abbildung 6.16](#) der Energieverbrauch im NEFZ bei unterschiedlichen Anoden- Kathodendrücken der Brennstoffzelle dargestellt. Mit zunehmendem Druck benötigt der Kompressor mehr Leistung zum Verdichten der Luft. Dadurch steigen die Kompressorverluste. Die Kompressorleistung muss vom Brennstoffzellenstack bereitgestellt werden. Folglich fallen mit einem Wert des Parameters $C = 0.02$ aus [Gleichung 5.6](#), der die Abhängigkeit des Systemdruckes zur Brennstoffzellenspannung angibt, auch mehr Brennstoffzellenstackverluste an. Die Druckerhöhung erhöht zwar ebenfalls die Spannung der Brennstoffzelle und damit auch den Wirkungsgrad, jedoch sind die durch die höhere Kompressorleistung verursachten Energieverluste des Stacks größer als die Energieeinsparungen durch den höheren Wirkungsgrad. Zur weiteren Analyse der Druckabhängigkeit der Brennstoffzelle wurde das eigens aufgebaute Modell verwendet, da alle Parameter individuell angepasst werden können. Dazu wurde der Faktor C auf den in der Literatur angeführten Wert von 0.1 erhöht.

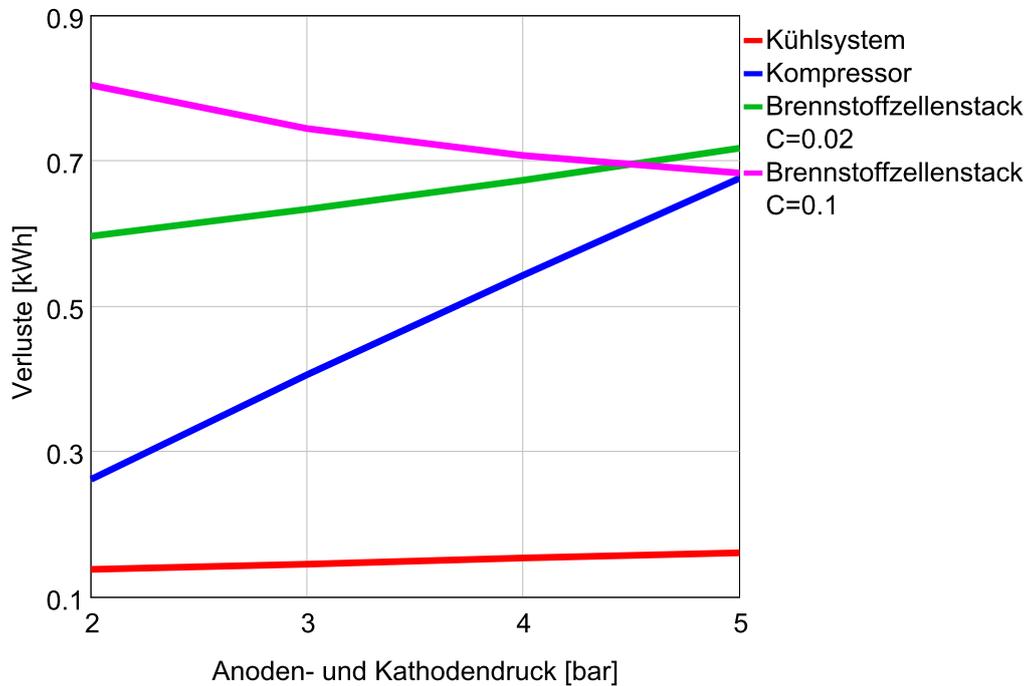


Abbildung 6.16: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Anoden- und Kathodendrücken im NEFZ.

Dadurch kann eine höhere Steigerung der Brennstoffzellenspannung durch Druckerhöhung erreicht werden. In [Abbildung 6.15](#) sind ebenfalls die Stackverluste für den US06 und in [Abbildung 6.16](#) für den NEFZ mit dem Faktor $C = 0.1$ dargestellt. Darin ist zu entnehmen, dass die Stackverluste geringer werden obwohl der Stack die zusätzliche Leistung des Kompressors bereitstellen muss. Dies ist durch den höheren Wirkungsgrad bedingt, der die Verlustleistung verringert obwohl die abgegebene Stackleistung steigt. Bei weiterer Erhöhung des Wertes für den Parameter C und gleichzeitiger Erhöhung des Wirkungsgrades des Kompressors, kann der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle so weit gesteigert werden, dass die Energieeinsparungen größer sind als die Kompressorverluste. Dadurch ergibt sich mit höherem Druck ein geringerer Kraftstoffverbrauch in den Fahrzyklen. Jedoch müssten die Parameter so weit abgeändert werden, dass diese für dieses Modell als nicht mehr realistisch angesehen werden können. Das Fazit lautet also, dass sich ein geringerer Druck günstiger auf die Verluste auswirkt. Es kann jedoch mit diesem Modell kein unteres Limit angegeben werden, da in diesem Modell ein Systemdruck von 1

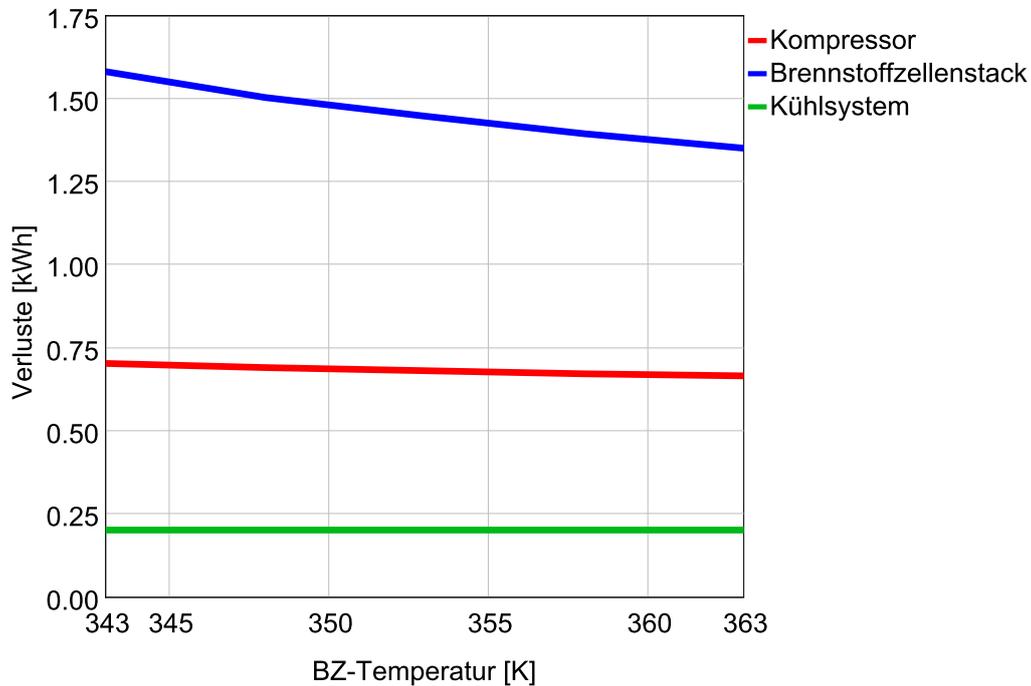


Abbildung 6.17: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Temperaturen im US06.

bar zwar möglich ist und die geringsten Verluste liefert, dies allerdings aufgrund der benötigten Druckdifferenz zur Luftmassenstromförderung nicht mehr realistisch ist. Zur weiteren Untersuchung des Themas empfiehlt sich ein empirisches Brennstoffzellenmodell, welches sehr sensitiv auf Druckänderungen bei geringen Drücken und unterschiedlichen Stromdichten reagiert. Ebenso wäre es hilfreich, den Sauerstoff- und Stickstoffmassenstrom sowie deren Partialdrücke vor und nach dem Kompressor, sowie in und nach der Brennstoffzelle dynamisch zu modellieren.

Variation der Temperatur

Wie in [Kapitel 4.1](#) erläutert wurde, steigt die maximale Leistung der Brennstoffzelle mit der Temperatur aufgrund der temperaturabhängigen Parameter (Austauschstromdichte, ohmscher Widerstand und limitierende Stromdichte) der Brennstoffzelle an. Ebenso steigt mit der Temperatur bei konstanter Stromdichte die Spannung an. Dadurch steigt bei konstanter abgegebener elektrischer Leistung der Brennstoffzelle mit zunehmender

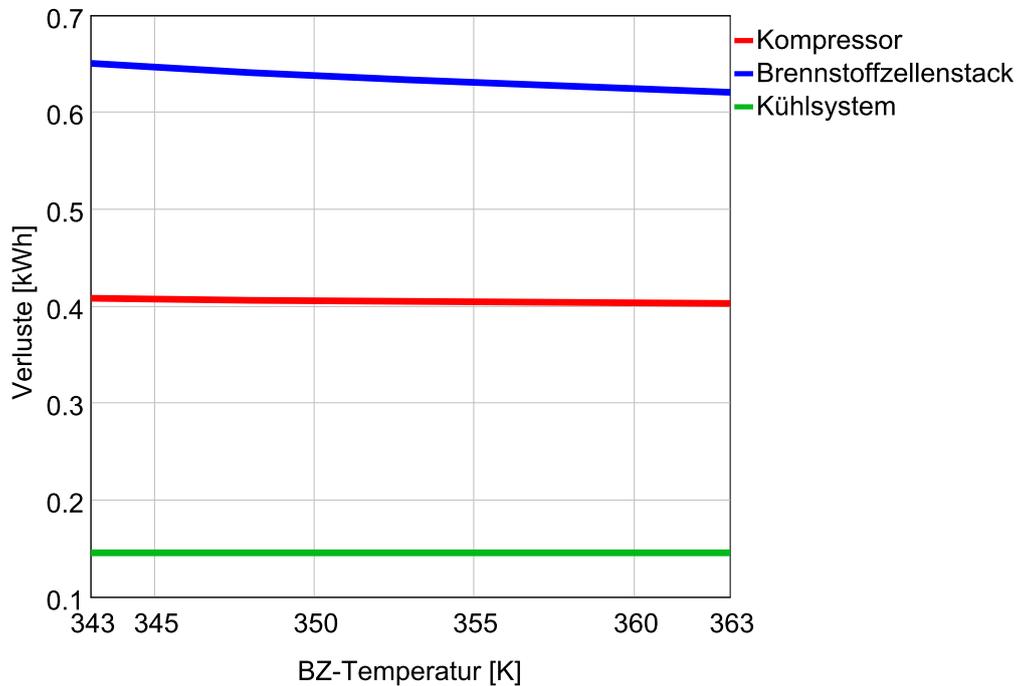


Abbildung 6.18: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Temperaturen im NEFZ.

Temperatur auch der Wirkungsgrad an. [Abbildung 6.17](#) zeigt die Verluste im US06 und [Abbildung 6.18](#) die Verluste im NEFZ bei unterschiedlichen Brennstoffzellentemperaturen. Durch den höheren Wirkungsgrad bei höherer Temperatur sinken die Stackverluste und dadurch in weiterer Folge die Kompressor- und Kühlsystemverluste. Jedoch sinken die Verluste vor allem im NEFZ nur geringfügig. Hier sei angemerkt, dass die Erhöhung der Brennstoffzellentemperatur aufgrund des Feuchtigkeitszustandes der Elektrolytmembran in der Realität nicht ohne weiteres möglich ist.

Fazit der Parametervariation

Durch Variation der Brennstoffzellenfläche und damit auch der maximalen Brennstoffzellenleistung konnte gezeigt werden, dass größere Flächen, bedingt durch die geringere Auslastung des Stacks, höhere Wirkungsgrade und damit geringere Verluste verursachen. Die Kompressor- und Kühlsystemverluste sinken dadurch ebenfalls, jedoch fällt die Energieeinsparung prozentuell geringer aus. Somit ist zur Senkung der Brennstoff-

zellensystemverluste eine hohe maximale Leistung der Brennstoffzelle anzustreben. Zu Minimierung der Verluste ist ebenso die Fahrzeugmasse gering zu halten. Mit dem in dieser Arbeit verwendeten Modell wurde veranschaulicht, dass aus Sicht der Brennstoffzellensystemverlustminimierung ein möglichst geringer Druck von Vorteil ist. Es lassen sich zwar durch Änderung des Parameters des Druckeinflusses auf die Stackspannung die Stackverluste mit höherem Druck reduzieren, jedoch überwiegen insgesamt die dadurch zusätzlich auftretenden Verluste des Kompressors. Weiters wäre eine möglichst hohe Temperatur des Stacks vorteilhaft.

6.4 Minimale Brennstoffzellengröße und Batteriekapazität

Um zu untersuchen, wie gering die Brennstoffzellengröße und Batteriekapazität gewählt werden kann, um den NEFZ und US06 zu durchfahren, wurden die Brennstoffzellen-

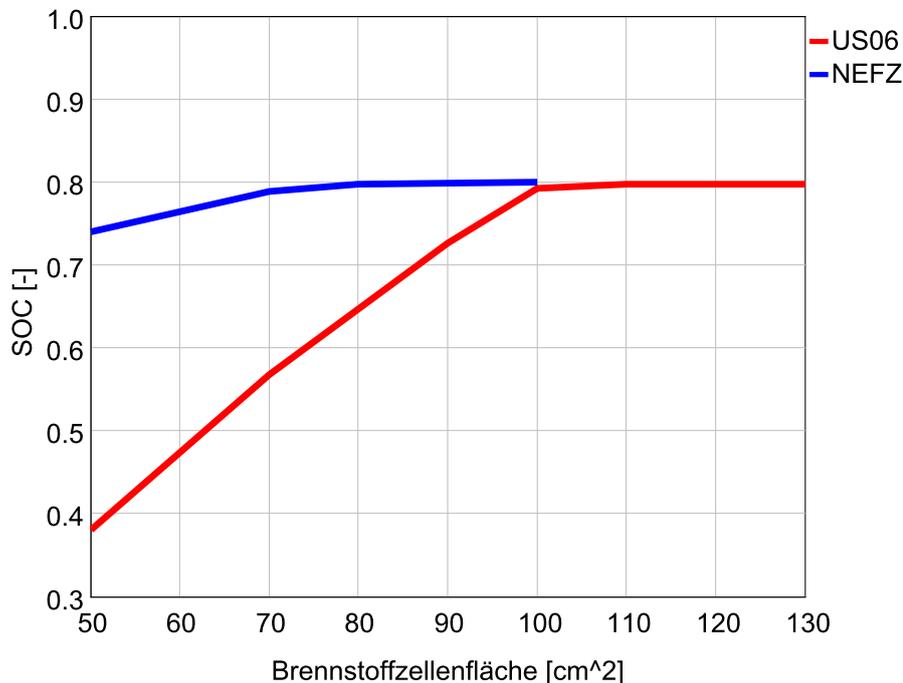


Abbildung 6.19: SOC der Batterie am Ende des Fahrzyklus bei einer Batteriekapazität von 9 Ah.

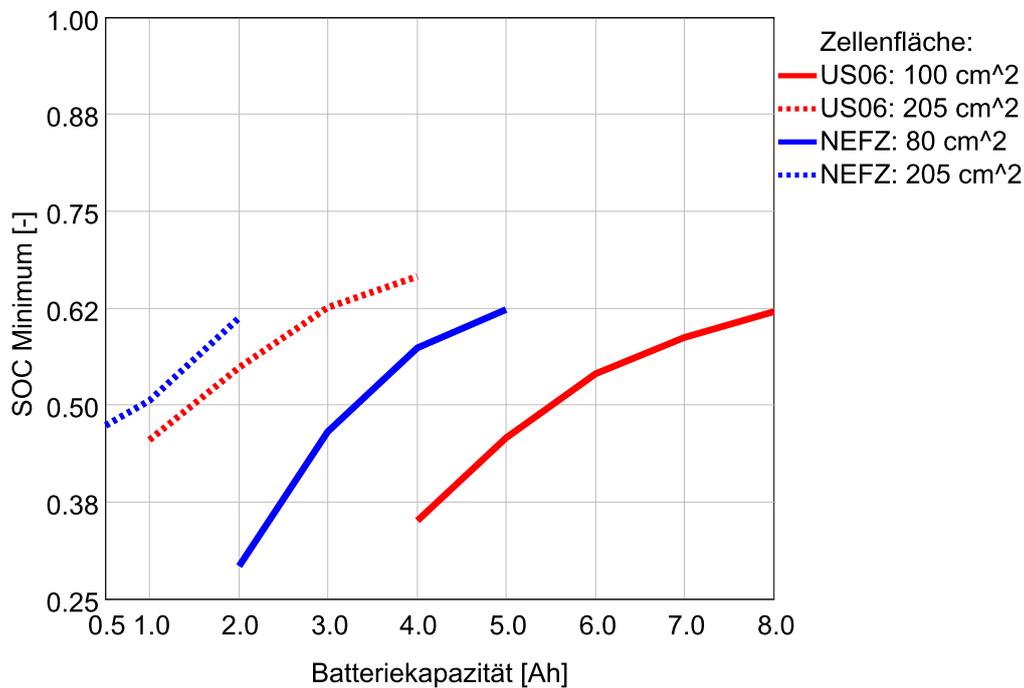


Abbildung 6.20: Minimaler SOC der Batterie während des Fahrzyklus bei unterschiedlichen Brennstoffzellenflächen und Batteriekapazitäten.

fläche und Batteriekapazität variiert und das Verhalten während der Zyklen analysiert. [Abbildung 6.19](#) zeigt den SOC der Batterie mit einer Kapazität von 9 Ah am Ende des Fahrzyklus. Der gewünschte SOC beträgt 0.8. Reicht die Leistung der Brennstoffzelle nicht aus, um den SOC nach dem Entladen im Zyklus wieder auf das gewünschte Level zu bringen, liegt er am Ende des Zyklus unter 0.8. Beim US06 und NEFZ wurde jeweils nach dem Zyklus bei Stillstand des Fahrzeuges noch 20 s lang die Batterie geladen. Wie aus [Abbildung 6.19](#) ersichtlich, muss die Brennstoffzellenfläche im US06 mindestens 100 cm² betragen, um nach dem Fahrzyklus (inkl. 20 s Laden) den Ladezustand der Batterie wieder auf das gewünschte Level zu bringen. Dies entspricht einer maximalen Leistung der Brennstoffzelle von 24 kW. Im NEFZ muss die Fläche mindestens 80 cm² betragen. Dies entspricht einer maximalen Leistung der Brennstoffzelle von 20 kW.

Die abgegebene Leistung der Brennstoffzelle hängt vom SOC ab und liefert daher nicht über den ganzen Zyklus die maximale Leistung. Um die minimale Batteriekapazität zu er-

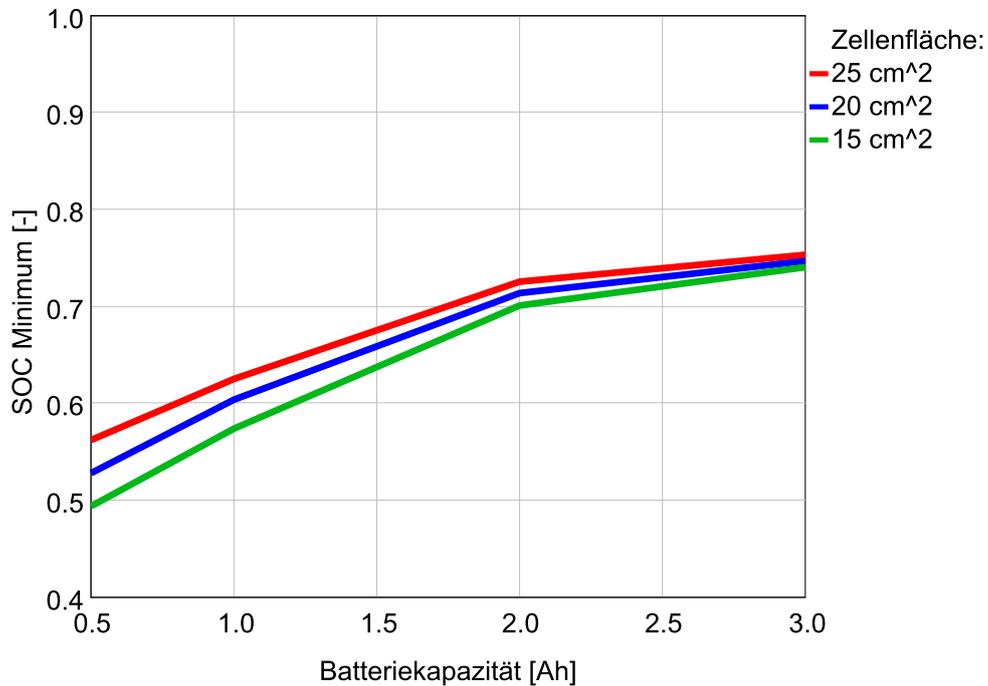


Abbildung 6.21: Minimaler SOC der Batterie während des innerstädtische Teil des NEFZ bei unterschiedlichen Brennstoffzellenflächen und Batteriekapazitäten.

mitteln, wurde gefordert, dass der SOC der Batterie während des Fahrzyklus nicht unter 0.5 sinkt. Der SOC zu Beginn des Zyklus beträgt 0.8. [Abbildung 6.20](#) zeigt den minimalen SOC während des Zyklus in Abhängigkeit der Batteriekapazität. Je geringer die Kapazität gewählt wird, desto geringer ist das Minimum des SOC während der Zyklen. Weiters wird der Innenwiderstand der Batterie mit sinkender Kapazität größer. Dadurch fallen höhere Verluste an und der SOC nach dem Zyklus liegt bei der Brennstoffzellenfläche von 80 cm² etwas unter 0.8 und bei einer Fläche von 100 cm² im US06 etwas über 0.7. Bei einer Fläche von 205 cm² liefert die Brennstoffzelle genügend Leistung, um die Batterie bis zum Ende des jeweiligen Zyklus wieder auf einen SOC von 0.8 aufzuladen. Zum Vergleich: der Mercedes-Benz B-FCe (2016) besitzt bei 80 kW Brennstoffzellenleistung und 100 kW Motorleistung eine Batterie mit 1,4 kWh Speicherkapazität [19], dies würde bei 370 Volt 3.8 Ah entsprechen.

Batteriekapazität im innerstädtischen Teil des NEFZ

Da das Minimum des SOC der Batterie während des NEFZ im Überlandteil des Fahrzyklus auftritt und auch im US06 größtenteils Geschwindigkeiten größer als 50 km/h auftreten, wurde der innerstädtische Teil des NEFZ herangezogen, um die minimale Batteriegröße auch für geringere Geschwindigkeiten zu ermitteln. Dazu wurden die ersten 200 Sekunden des NEFZ herangezogen, da dieser Geschwindigkeitsverlauf in den ersten 800 Sekunden viermal auftritt. Die maximale Geschwindigkeit beträgt darin 50 km/h. Die Brennstoffzellenfläche wurde mit 25 cm² (6 kW), 20 cm² (4.8 kW) und 15 cm² (3.6 kW) sehr klein gewählt, da die benötigten Leistungen des Motors ebenfalls gering sind. Die geringste Kapazität der Batterie in der Simulation beträgt 0.5 Ah. In [Abbildung 6.21](#) ist das Minimum des SOC während des innerstädtische Teil des NEFZ dargestellt. Bei kleinen Kapazitäten entlädt sich die Batterie schneller und der minimale SOC sinkt. Kleine Brennstoffzellenleistungen senken den minimalen SOC ebenfalls, da die Batterie langsamer aufgeladen wird.

Fazit der Variation von Brennstoffzellen- und Batteriedimension

Um im US06 bzw. NEFZ einen ausgeglichenen SOC nach den Zyklen zu erreichen, ist mindestens eine maximale Stackleistung von 24 kW bzw. 20 kW notwendig. Weiters muss die Batteriekapazität bei 370 Volt im US06 bzw. NEFZ mindestens 5.5 Ah bzw. 3.5 Ah betragen, um den SOC während der Fahrzyklen nicht unter 0.5 sinken zu lassen. Im innerstädtischen Teil des NEFZ reicht aufgrund der geringeren Leistungen bei 6 kW Stackleistung eine Batteriekapazität von 1 Ah aus, um den SOC nicht unter 0.6 sinken zu lassen und damit die Lebensdauer der Batterie positiv zu beeinflussen.

6.5 Vergleich unterschiedlicher Betriebsstrategien der Brennstoffzelle

Die SOC-abhängige und die leistungsgemittelte Betriebsstrategie der Brennstoffzelle, welche in Kapitel 5.5 angeführt sind, wurden anhand des US06 und NEFZ untersucht und verglichen. Dazu wurden die Wirkungsgrade und die Verlustleistungen der relevanten Komponenten des Antriebssystems analysiert und bewertet. Da bei der dritten in Kapitel 5.5 angeführten Betriebsstrategie, der On-Off Betriebsstrategie, nicht genügend Leistung vom Brennstoffzellensystem für das Durchfahren der Fahrzyklen bereitgestellt werden kann, wurde diese Strategie nur anhand des innerstädtischen Teils des NEFZ analysiert, da hierbei die benötigten Leistungen geringer sind.

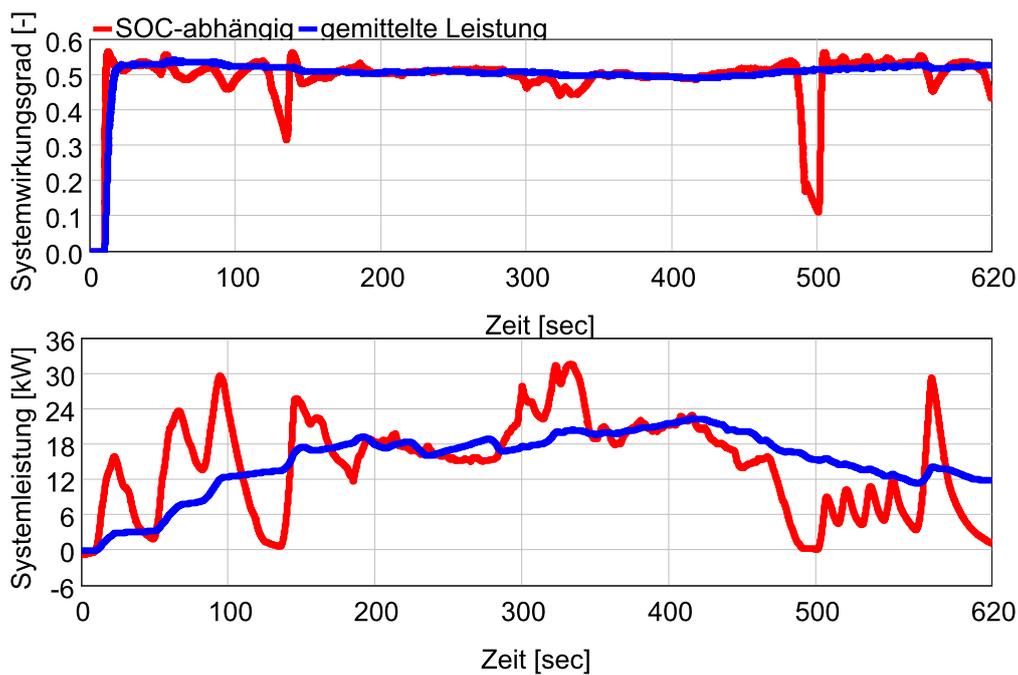


Abbildung 6.22: Systemwirkungsgrad und Leistung des Brennstoffzellensystems bei unterschiedlichen Betriebsstrategien während des US06.

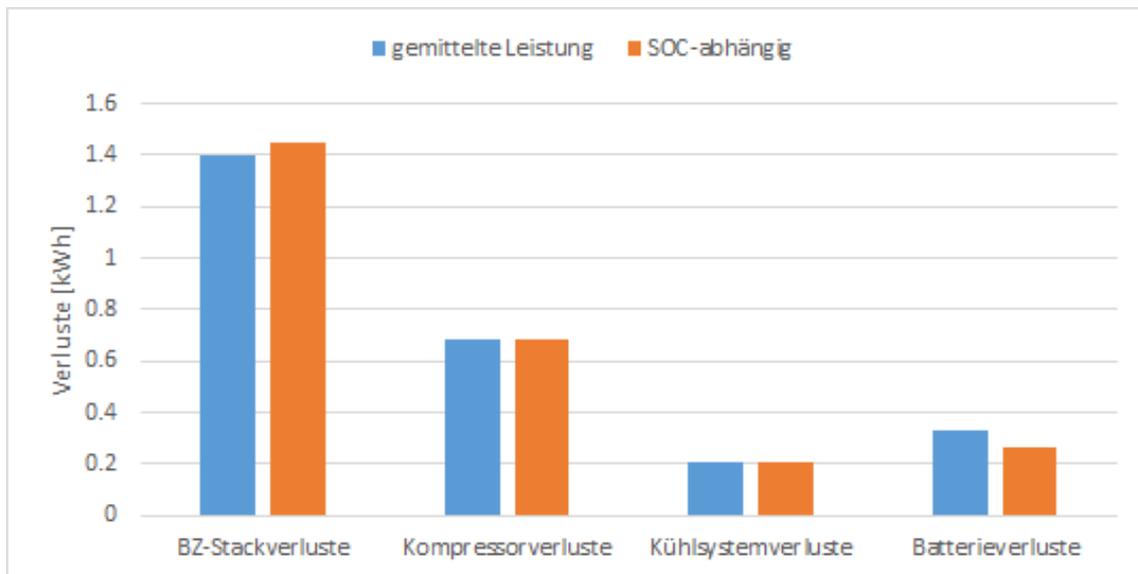


Abbildung 6.23: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Betriebsstrategien im US06.

6.5.1 Betriebsstrategien im US06

Bei der leistungsgemittelten Betriebsstrategie wurden im US06 die Leistungen des Elektromotors, des Kompressors, des Kühlsystems, der sonstigen Komponenten und die dissipierte Leistung der Batterie über 140 s gemittelt und von der Brennstoffzelle geliefert. Durch die Wahl von 140 s konnte der Ladezustand der Batterie vor und nach dem Zyklus auf das selbe Level gebracht werden. [Abbildung 6.22](#) zeigt die Leistung und den Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems im US06 bei der SOC-abhängigen und leistungsgemittelten Betriebsstrategie. Der Wirkungsgrad liegt bei der gemittelten Leistungsbereitstellung außer zu Beginn des Zyklus über 50 %. Die abgegebene Leistung verläuft gleichmäßiger. Bei der SOC-abhängigen Strategie sind mehr Leistungsspitzen und Täler zu erkennen und auch der Wirkungsgrad weist vergleichsweise große Schwankungen auf. Der Wirkungsgrad sowie die Leistung des Brennstoffzellensystems sinken zweimal während des Zyklus (Sekunde 140 und Sekunde 500) deutlich ab, da zu diesen Zeitpunkten im Fahrzyklus von hohen Geschwindigkeiten abgebremst wird und entsprechend viel Energie in die Batterie geladen wird. Dadurch wird von der Brennstoffzelle nur wenig Leistung angefordert. Bei der leistungsgemittelten Betriebsstrategie fällt der Kraftstoffverbrauch im US06 mit 1.26 kg/100 km etwas höher aus als bei der SOC-abhängigen Strategie von 1.24 kg/100 km. Die unterschiedlichen Energieverluste der Komponenten sind in [Abbildung 6.23](#) angeführt. Durch die Vermeidung der hohen

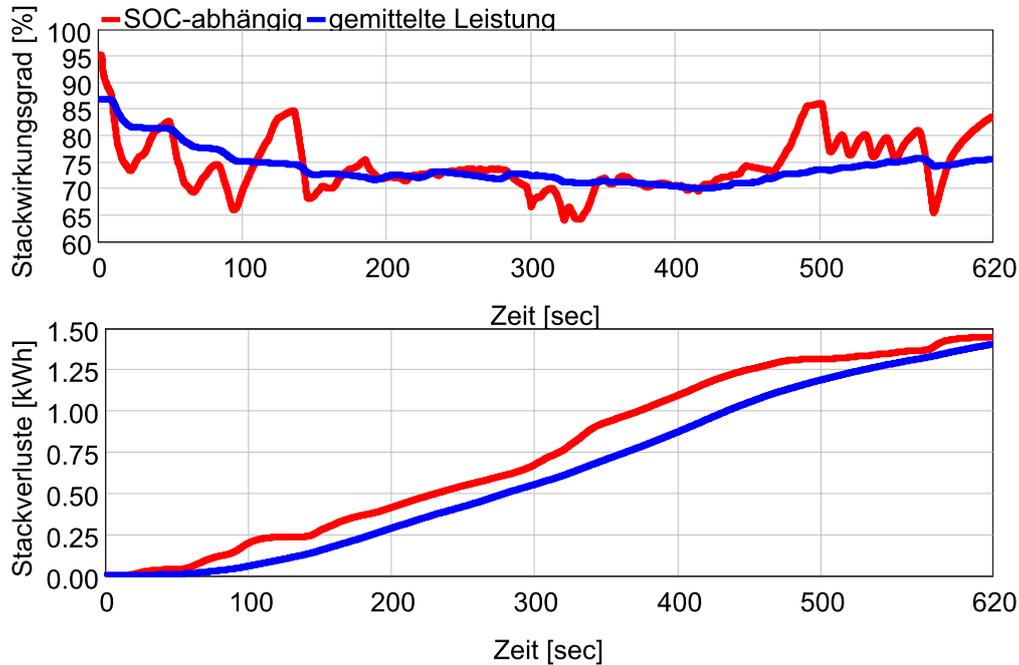


Abbildung 6.24: Stackwirkungsgrad und Stackverluste bei unterschiedlichen Betriebsstrategien im US06.

ineffizienten Lastspitzen des Brennstoffzellenstacks können die Verluste etwas verringert werden. Die Kompressor- und Kühlsystemverluste bleiben nahezu gleich. Da die Brennstoffzelle bei der leistungsgemittelten Betriebsstrategie weniger dynamisch betrieben wird, muss die Batterie die Lastspitzen und Täler ausgleichen. Dadurch fallen auch höhere Batterieverluste an. [Abbildung 6.24](#) zeigt den Wirkungsgrad und die Verluste des Brennstoffzellenstacks. Der Stackwirkungsgrad sinkt wenn die Stackleistung steigt. Dadurch steigt die Stackverlustleistung automatisch an, wenn der Stackwirkungsgrad sinkt. Nimmt man einen Elektromotor zum Vergleich, bedeutet ein niedriger Wirkungsgrad nicht automatisch eine hohe Verlustleistung, da vor allem in Bereichen niedriger Wirkungsgrade die Leistung des Motors gering ist und damit auch die Verlustleistung. Daher wäre es am effizientesten den Brennstoffzellenstack alleine mit möglichst niedriger konstanter Leistung zu betreiben. Aufgrund des Verbrauchs der Komponenten des Brennstoffzellensystem wie z.B. des Kompressors ist dies aber insgesamt nicht effizient. [Abbildung 6.25](#) zeigt die Stackleistung, Kompressor- und Kühlsystemverluste im US06.

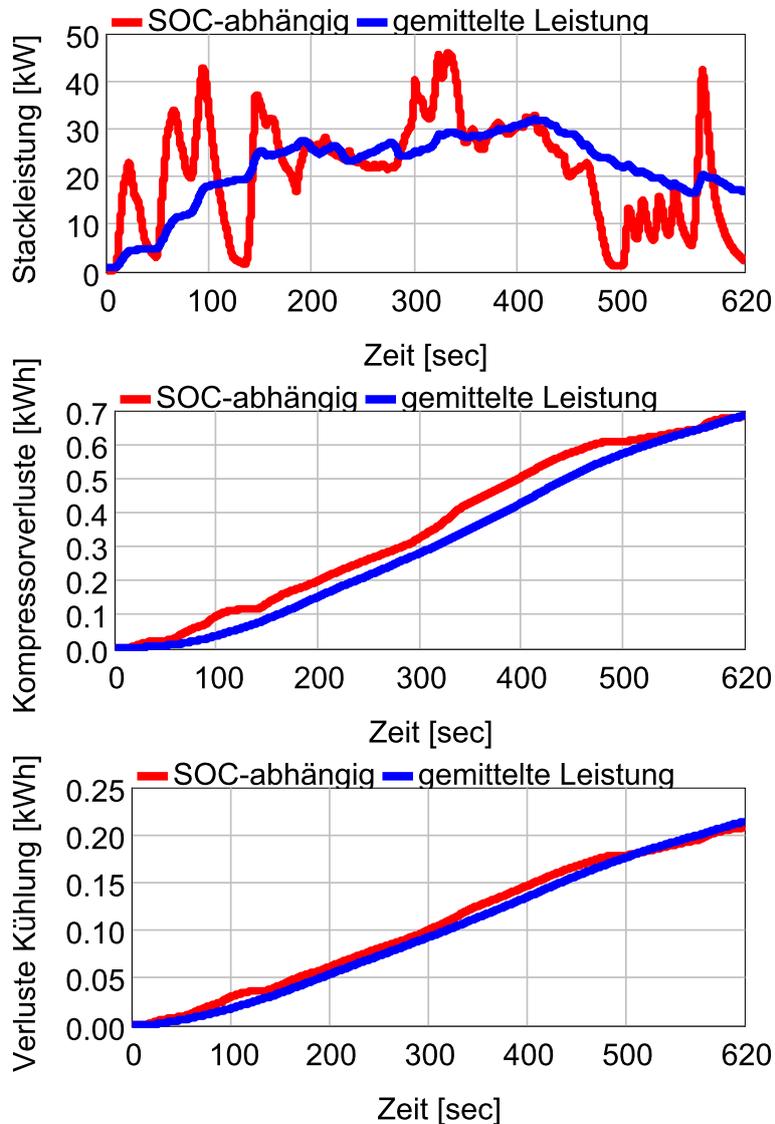


Abbildung 6.25: Stackleistung, Kompressor- und Kühlsystemverluste bei unterschiedlichen Betriebsstrategien im US06.

Die Kompressor- und Kühlsystemverluste sind am Ende des Zyklus nahezu gleich. Die Kompressorverluste steigen bei der SOC-abhängigen Betriebsstrategie zu Beginn des Zyklus im Vergleich zur leistungsgemittelten Betriebsstrategie etwas an. Durch die geringen Stackleistungen der SOC-abhängigen Strategie am Ende des Fahrzyklus (Sekunde 500

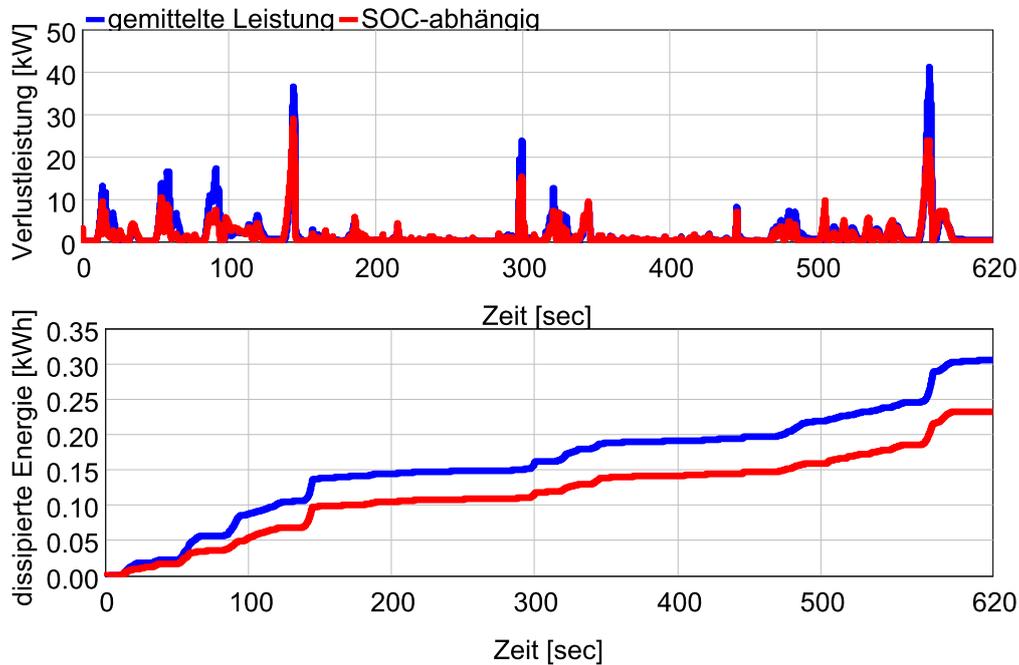


Abbildung 6.26: Dissipierte Wärmeleistung und Energie bei unterschiedlichen Betriebsstrategien im US06.

bis ca. Sekunde 580) sind die Stackverluste am Ende nahezu gleich. Die Verluste des Kühlsystems verhalten sich analog zu den Kompressorverlusten, wobei der Unterschied zwischen den beiden Betriebsstrategien geringer ausfällt. [Abbildung 6.26](#) zeigt die dissipierte Wärmeleistung und Energie der Batterie während des US06. Darin ist zu erkennen, dass bei der SOC-abhängigen Betriebsstrategie durch die dynamischere Betriebsweise der Brennstoffzelle und daraus resultierenden geringeren Spitzenleistungen der Batterie, weniger Energie dissipiert wird als bei der leistungsgemittelten Betriebsstrategie.

Zusätzlich wurde eine Variante berechnet, bei der die Brennstoffzelle über den ganzen Zyklus mit einer konstanten Leistung von 21.6 kW betrieben wird, um den Ladezustand der Batterie vor und nach dem Zyklus auf das selbe Level zu bringen. Dadurch fiel der Kraftstoffverbrauch mit 1.23 kg/100 km nur etwas geringer als bei der SOC-abhängigen Strategie (1.24 kg/100 km) aus.

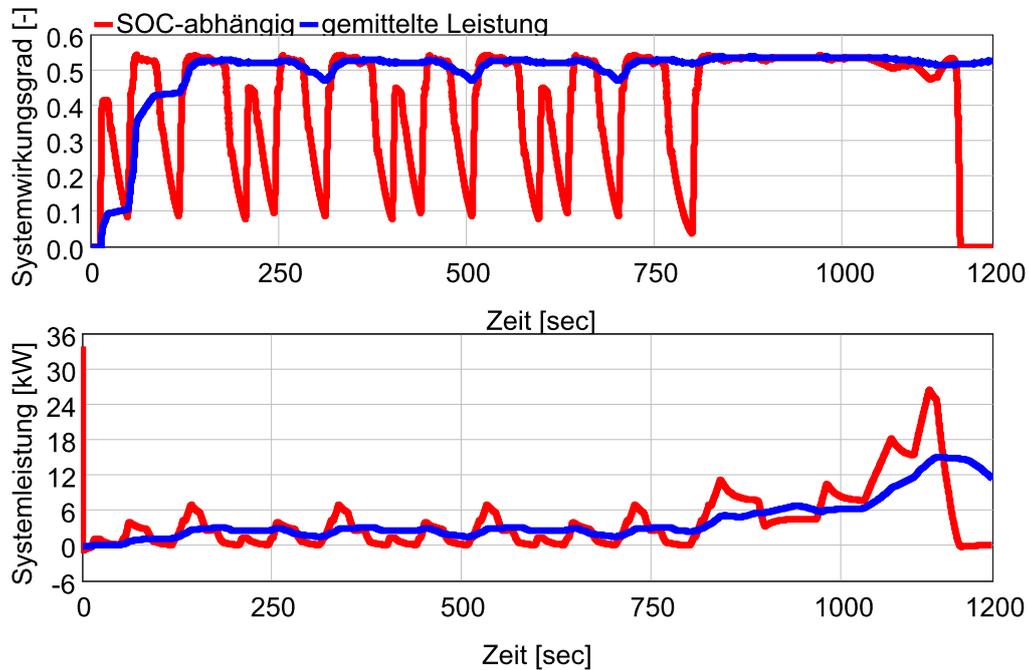


Abbildung 6.27: Systemwirkungsgrad und Leistung des Brennstoffzellensystems bei unterschiedlichen Betriebsstrategien während des NEFZ.

6.5.2 Betriebsstrategien im NEFZ

Bei der leistungsgemittelten Betriebsstrategie wurden im NEFZ die Leistungen des Elektromotors, des Kompressors, des Kühlsystems, der sonstigen Komponenten und die dissipierte Leistung der Batterie über 135 s gemittelt und von der Brennstoffzelle geliefert. Durch die Wahl von 135 s konnte der Ladezustand der Batterie vor und nach dem Zyklus auf das selbe Level gebracht werden. In [Abbildung 6.27](#) ist der Systemwirkungsgrad und die Systemleistung des Brennstoffzellensystems während des NEFZ dargestellt. Bei der SOC-abhängigen Betriebsstrategie fällt der Wirkungsgrad durch die geringen Leistungen während des Fahrzyklus mehrmals auf ca 10 % ab. Bei der leistungsgemittelten Betriebsstrategie liegt der Wirkungsgrad außer zu Beginn des Fahrzyklus über 50 % und die Leistung verläuft gleichmäßiger. Der Kraftstoffverbrauch der SOC-abhängigen Betriebsstrategie fällt etwas höher aus (SOC-abhängig: 0.79 kg/ 100 km, leistungsgemittelte Betriebsstrategie: 0.77 kg/ 100 km). [Abbildung 6.28](#) zeigt die Verluste der Systemkomponenten während des NEFZ. Wie auch beim US06 sind die Verluste des

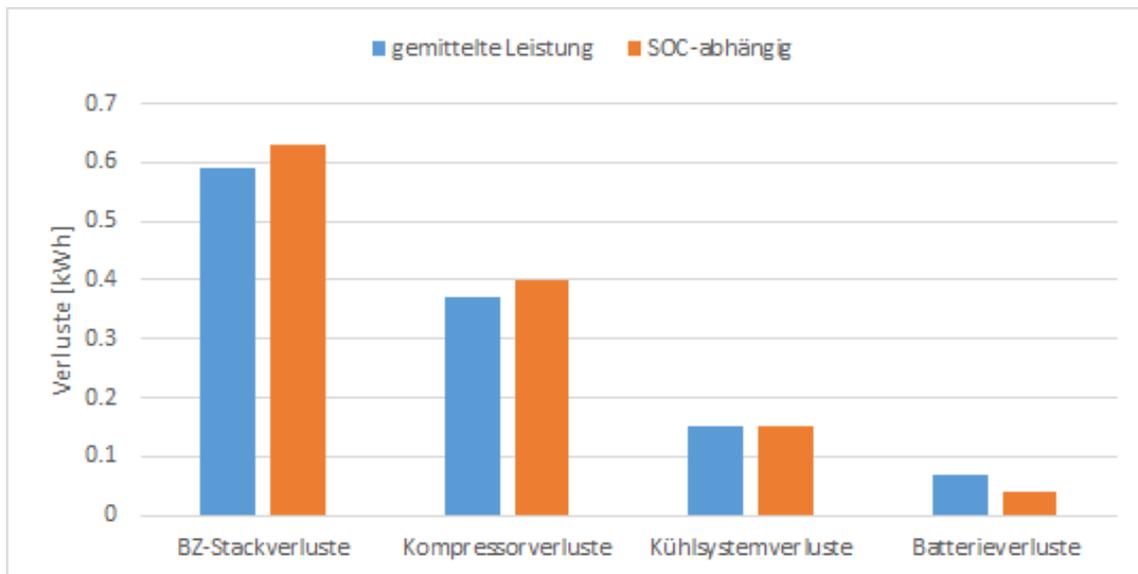


Abbildung 6.28: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Betriebsstrategien im NEFZ.

Brennstoffzellenstacks mit der SOC-abhängigen Betriebsstrategie größer und die Batterieverluste geringer. Im NEFZ ergeben sich bei der SOC-abhängigen Betriebsstrategie etwas größere Verluste beim Kompressor und die Verluste des Kühlsystems sind bei beiden Strategien etwa gleich. [Abbildung 6.29](#) zeigt die Stackleistung und die Verluste des Kompressors und des Kühlsystems während des NEFZ. Die Kompressorverluste fallen bei der SOC-abhängigen Betriebsstrategie etwas größer aus, da die Kompressorleistung aufgrund des Mindestmassenstroms mindestens 500 W beträgt. Die theoretisch errechnete Kompressorleistung aus dem Luftmassenstrom würde nach [Gleichung 5.2](#) bei geringen Stackleistungen, wie sie bei der SOC-abhängigen Strategie im innerstädtischen Teil des NEFZ auftreten, unter 500 W liegen. Bei der leistungsgemittelten Strategie liegt die theoretisch errechnete Kompressorleistung seltener unter 500 W und dadurch wird der Leistungsverbrauch des Kompressors seltener auf 500 W angehoben. Berechnet man die Kompressorleistung ohne Mindestluftmassenstrom, d.h. wenn Kompressorleistungen von unter 500 W möglich sind, ergeben sich bei beiden Strategien etwa die gleichen Kompressorverluste. Die Verlustleistung des Kühlsystems fällt bei beiden Betriebsstrategien etwa gleich hoch aus.

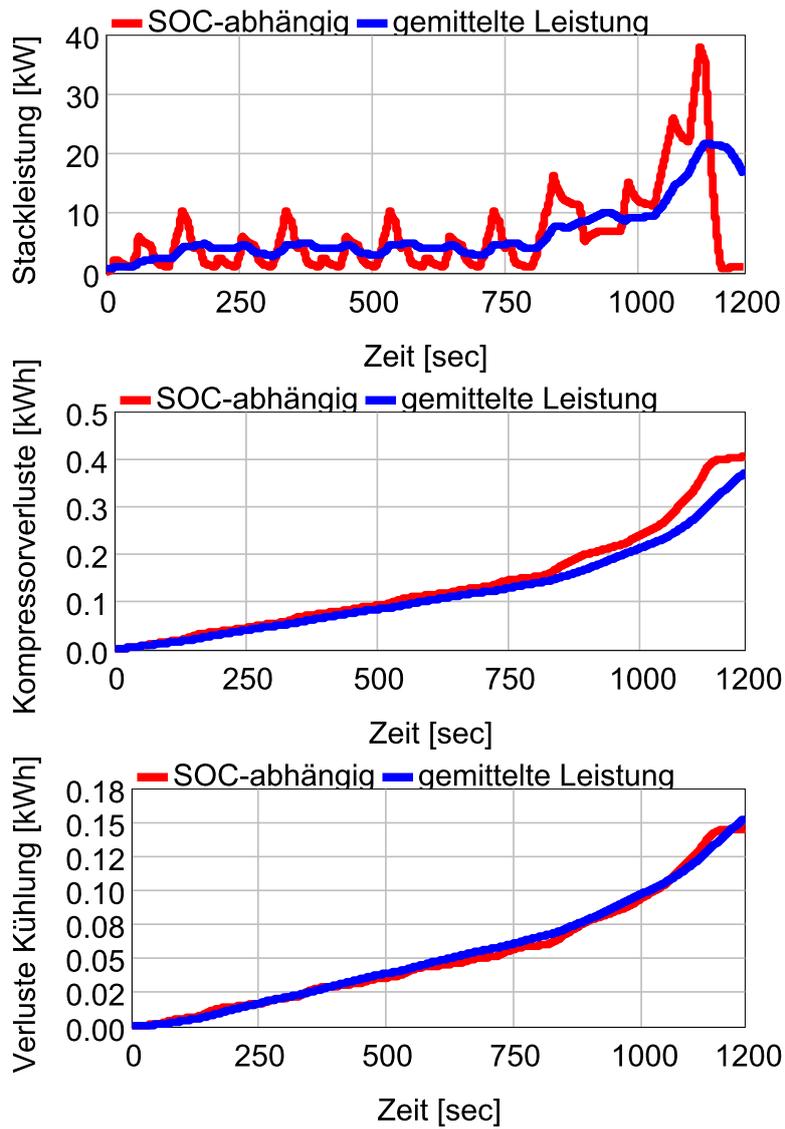


Abbildung 6.29: Stackleistung, Kompressor- und Kühlsystemverluste bei unterschiedlichen Betriebsstrategien im NEFZ.

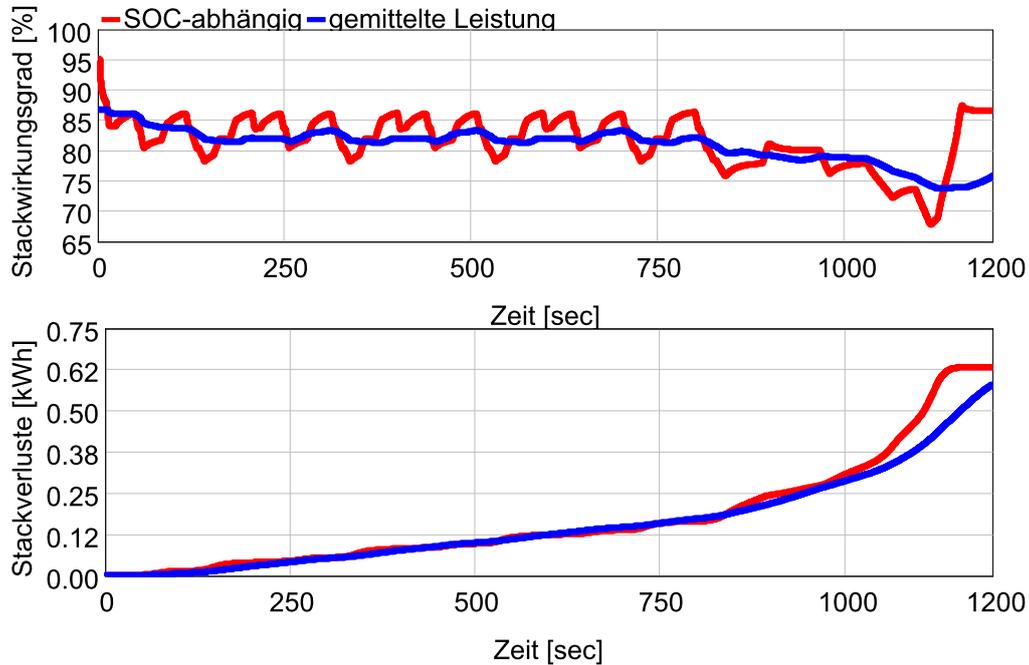


Abbildung 6.30: Stackwirkungsgrad und Stackverluste bei unterschiedlichen Betriebsstrategien im NEFZ.

In [Abbildung 6.30](#) sind die Stackverluste und der Stackwirkungsgrad im NEFZ dargestellt. Die Verluste sind bis zu Sekunde 1000 nahezu gleich. Danach steigen sie durch den geringen Wirkungsgrad beim SOC-abhängigen Betriebsmodus im Vergleich zum alternativen Betriebsmodus stärker an. Dadurch sind die Stackverluste am Ende des Zyklus etwas höher. [Abbildung 6.31](#) zeigt die dissipierte Wärmeleistung und Energie der Batterie während des NEFZ. Wie auch beim US06 wird bei der SOC-abhängigen Betriebsstrategie durch die dynamischere Betriebsweise der Brennstoffzelle von der Batterie weniger Energie dissipiert.

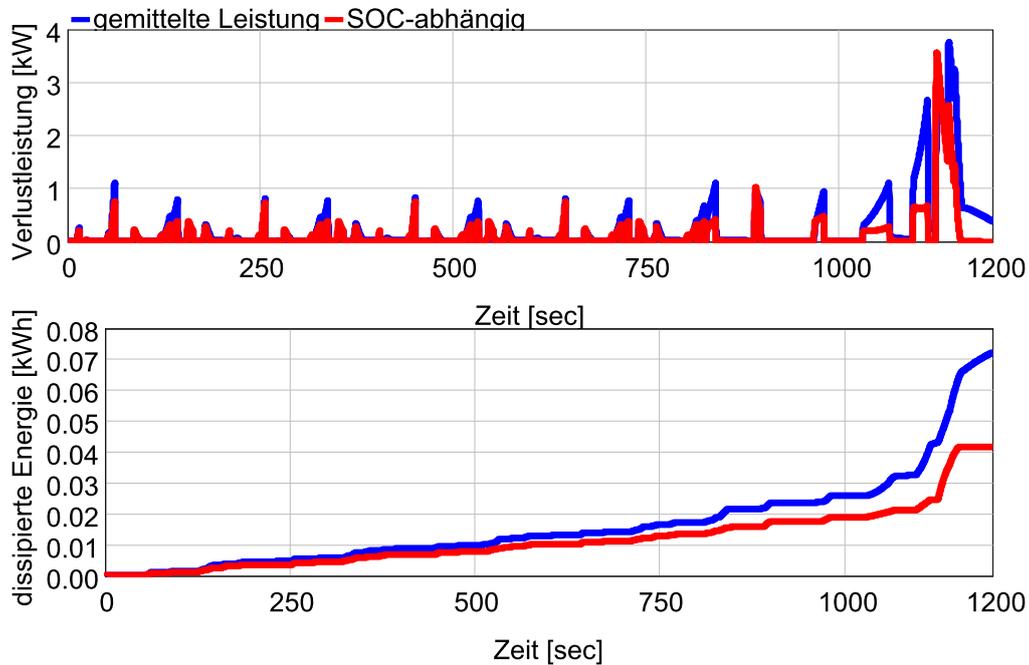


Abbildung 6.31: Dissipierte Wärmeleistung und Energie bei unterschiedlichen Betriebsstrategien im NEFZ.

Auch im NEFZ wurde eine Variante berechnet, bei der die Brennstoffzelle durchgehend mit einer konstanten Leistung betrieben wird. Bei 6.4 kW kontinuierlicher Stackleistung betrug der SOC vor und nach dem Zyklus 0.8. Damit fiel der Kraftstoffverbrauch mit 0.76 kg/100 km nur etwas geringer als bei der leistungsgemittelten Betriebsstrategie (0.77 kg/100 km) aus.

6.5.3 Betriebsstrategien im innerstädtischen Teil des NEFZ

Die On-Off Betriebsstrategie, die dritte Strategie welche in [Kapitel 5.5](#) angeführt ist, wurde anhand der ersten 800 s des NEFZ untersucht (innerstädtischer Teil des NEFZ), da die durch diese Strategie gelieferte Leistung nicht für den ganzen Zyklus ausreicht bzw. zu lange Batterieladezeiten nach dem Zyklus erfordert. Der Brennstoffzellenstack liefert 8 kW sobald der Batterieladezustand 76 % unterschreitet und liefert keine Leistung sobald der Ladezustand wieder 80 % erreicht. [Abbildung 6.32](#) zeigt die Brennstoffzellenstackleistung und den SOC der Batterie im innerstädtischen Teil des NEFZ mit der On-Off Betriebsstrategie. In [Abbildung 6.33](#) sind die Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten für alle drei Strategien für den innerstädtischen Teil des NEFZ dargestellt. Die Motor-, Rollwiderstands- und Luftwiderstandsverluste wurden nicht extra dargestellt, da diese für das gleiche Geschwindigkeitsprofil unverändert bleiben und an dieser Stelle nur die Unterschiede des Brennstoffzellensystems hinsichtlich der Betriebsstrategie erläutert werden sollen. Bei der leistungsgemittelten Betriebsstrategie wurde über 140 s gemittelt und zusätzlich die dadurch ermittelte Leistung mit 0.92 multipliziert, um vor und nach dem Zyklus den SOC auf das selbe Level zu bringen. Die Stackverluste fallen bei der leistungsgemittelten Strategie am niedrigsten aus, da der Stack gleichmäßig geringere Leistung bei höherem Wirkungsgrad liefert als bei den anderen Strategien. Bei der On-Off Strategie fallen die Stackverluste am höchsten aus, da der Stack entweder gar nicht oder bei hohen ineffizienten Lasten betrieben wird. Dafür fallen die Kompressorverluste bei der On-Off Strategie geringer aus, da der Kompressor keine Mindestleistung von 500 W liefern muss. Die Verluste des Kühlsystems fallen aufgrund der des nichtlinearen Leistungsbedarfes in Abhängigkeit der Stackleistung ebenfalls geringer aus. Die Batterieverluste sind bei der SOC-abhängigen Strategie am geringsten, da hierbei die Lastspitzen, welche durch die Batterie ausgeglichen werden, am geringsten sind. Insgesamt ist der Kraftstoffverbrauch in bei den drei Strategien etwa gleich (SOC-abhängig: 0.69 kg/100 km, leistungsgemittelt: 0.67 kg/100 km, On-Off Strategie: 0.68 kg/100 km). Der Kraftstoffverbrauch der On-Off Strategie ist nicht am geringsten, da die Batterie und der DC-DC-Konverter im Vergleich zu den anderen beiden Strategien höhere Verluste aufweisen.

6.5.4 Fazit aus der Analyse unterschiedlicher Betriebsstrategien

Sowohl im NEFZ als auch im US06 können durch die leistungsgemittelte Betriebsstrategie im Vergleich zur SOC-abhängigen Betriebsstrategie die Stackverluste etwas gesenkt

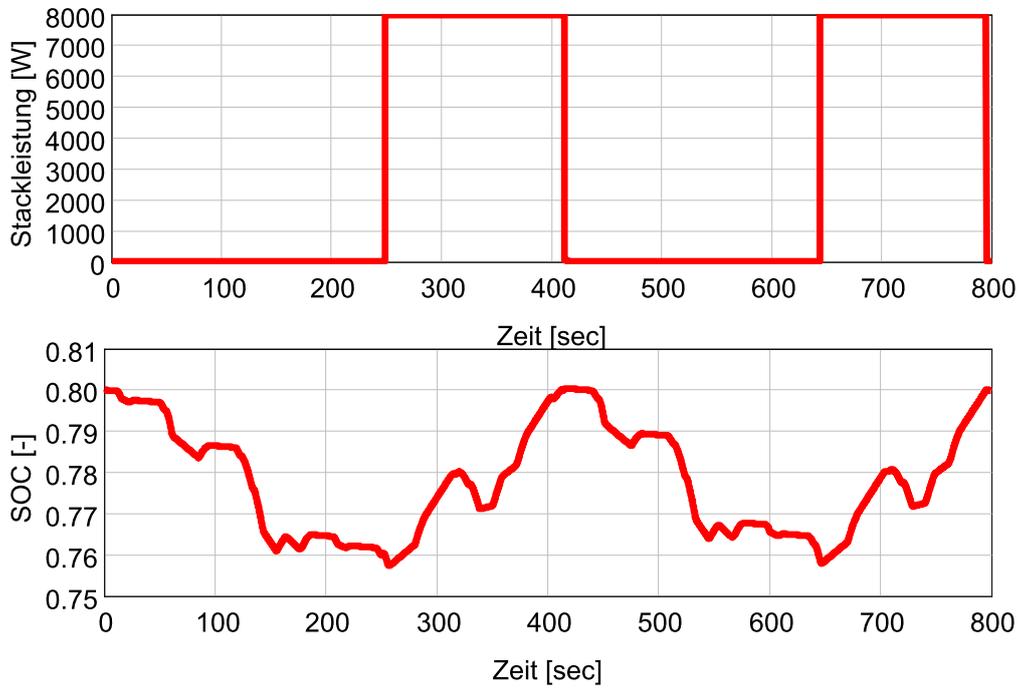


Abbildung 6.32: Brennstoffzellenstackleistung und SOC der Batterie während des innerstädtischen Teil des NEFZ mit der On-Off Betriebsstrategie.

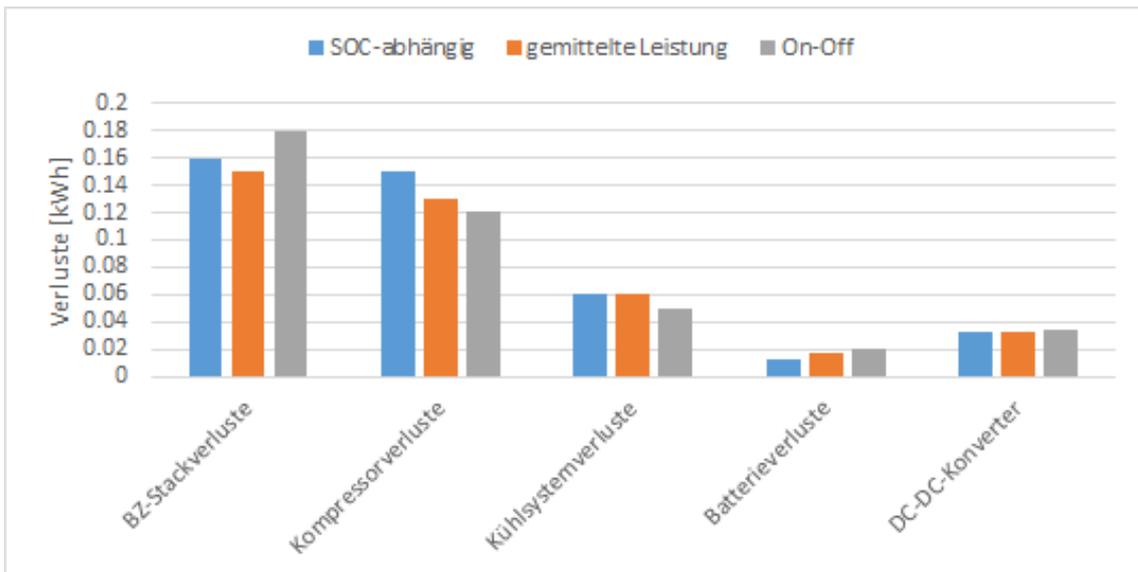


Abbildung 6.33: Verluste der Brennstoffzellensystemkomponenten bei unterschiedlichen Betriebsstrategien im innerstädtischen Teil des NEFZ.

werden. Gleichzeitig ergeben sich dadurch aber höhere Batterieverluste. Im US06 bleiben die Kompressor- und Kühlsystemverluste bei beiden Betriebsstrategien nahezu gleich. Im NEFZ ergeben sich aufgrund des Mindestluftmassenstromes des Kompressors bei der SOC-abhängigen Betriebsstrategie etwas höhere Verluste, die Kühlsystemverluste sind bei beiden Strategien nahezu gleich. Der Kraftstoffverbrauch ist bei der SOC-abhängigen Strategie im US06 etwa 2 % geringer und im NEFZ etwa 2 % höher als bei der leistungsgemittelten Strategie. In beiden Fahrzyklen fiel der Kraftstoffverbrauch um ein weiteres Prozent geringer als bei der effizienteren Strategie aus, falls der Brennstoffzellenstack während des ganzen Zyklus mit konstanter Last betrieben wurde. Im innerstädtischen Teil des NEFZ war zusätzlich der Betrieb einer On-Off Strategie möglich, bei welcher das Brennstoffzellensystem entweder im Punkt mit höchstem Wirkungsgrad oder gar nicht betrieben wurde. Dadurch ergab sich im Vergleich zu den anderen Strategien auch keine Kraftstoffverbrauchsminderung. Das Fazit aus der Analyse unterschiedlicher Betriebsstrategien anhand von zwei möglichst unterschiedlichen Fahrzyklen lautet also, dass im Allgemeinen weder die SOC-abhängige Betriebsstrategie, noch die leistungsgemittelte Strategie oder die On-Off Betriebsstrategie im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch zu bevorzugen ist. Durch den Betrieb der Brennstoffzelle mit konstanter Last sinkt der Kraftstoffverbrauch zwar geringfügig, jedoch ist diese Strategie in der Realität nicht ohne weiteres anwendbar, da man für gewöhnlich den durchschnittlichen Leistungsbedarf nicht kennt. Um dennoch eine Betriebsstrategie zu wählen, welche es erlaubt den Treibstoffverbrauch zu senken, wäre es sinnvoll, ein detaillierteres Brennstoffzellenmodell und die relative Höhe der Batterie- sowie der Brennstoffzellenspannung zu berücksichtigen. Sowohl die Batterie- als auch die Brennstoffzellenverlustleistung steigt nichtlinear mit dem Strom an, und ein geringer Batteriestrom bedeutet einen hohen Brennstoffzellenstrom und umgekehrt. Somit gilt es, diesbezüglich ein Optimum zu finden. Weiters wäre es auch hilfreich einen variablen Systemdruck und die Luftzahl in die Betriebsstrategie zu integrieren.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Durch den Vergleich mit Werten aus der Literatur konnte das in dieser Arbeit verwendete Modell eines Brennstoffzellenfahrzeuges auf Plausibilität überprüft werden. Die Wirkungsgradkette tank-to-wheel wurde erläutert und beträgt je nach Geschwindigkeit zwischen 18 % und 42 %. Zur Fahrzyklenanalyse wurden der NEFZ und der US06 aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe ausgewählt. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine maximale Stackleistung von 50 kW ausreicht, um mit einer SOC-abhängigen Betriebsstrategie den Stack während der Fahrzyklen nicht maximal auszulasten. Weiters wurde dargelegt, dass der Luftkompressor etwa 20 % der Nettoleistung der Brennstoffzelle benötigt und vor allem bei niedrigen Lasten den Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems gegenüber dem Stack deutlich senkt. Der höchste Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems beträgt rund 54 %. Die Verluste der verwendeten Fahrzeugkomponenten wurde anhand der Fahrzyklen bewertet, wobei die Stack-, Kompressor- und Motorverluste die größten Werte aufweisen. Die Energierückgewinnung beim Bremsen (Rekuperation) durch den Elektromotor im Generatorbetrieb wurde beschrieben sowie die dadurch mögliche Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs im NEFZ auf 83 % bzw. US06 auf 85 % aufgezeigt. Weiters wurden unterschiedliche Parameter, wie Brennstoffzellenfläche, Brennstoffzellentemperatur und Systemdruck variiert um den Einfluss auf die dadurch entstehenden Energieverluste abzuschätzen. Fazit dieser Analyse ist, dass möglichst große Brennstoffzellenflächen und damit höhere Wirkungsgrade, bedingt durch geringere Auslastung des Stacks, die Stackverluste vermindern können. Ebenso sinken dadurch die Kompressor- und Kühlsystemverluste. Außerdem ist zur Verlustminimierung mit diesem Modell ein möglichst geringer Systemdruck sowie eine hohe Stacktemperatur anzustreben. In weiterer Folge wurde für den US06 bzw. NEFZ eine maximale Stackleistung von mindestens 24 kW bzw. 20 kW ermittelt, um nach den Zy-

klen einen ausgeglichenen SOC sicherzustellen. Die Batteriekapazität muss im US06 bzw. NEFZ mindestens 5.5 Ah bzw 3.5 Ah betragen, um den SOC nicht unter 0.5 sinken zu lassen und dadurch die Lebensdauer der Batterie positiv zu beeinflussen. Anhand von unterschiedlichen Betriebsstrategien der Brennstoffzelle wurde der Kraftstoffverbrauch ermittelt. Dabei fielen die Verluste der einzelnen Komponenten bei den untersuchten Strategien (SOC-abhängige Strategie, leistungsgemittelte Strategie, On-Off Betriebsstrategie und konstante Stackleistung) unterschiedlich aus, jedoch kann in Hinblick auf den nahezu gleichbleibenden Kraftstoffverbrauch mit dem in dieser Arbeit verwendeten Modell keine Strategie der anderen vorgezogen werden. Um dennoch eine Betriebsstrategie zu wählen, welche den Kraftstoffverbrauch senkt, wäre es hilfreich, die Batterie- sowie die Brennstoffzellenstackspannung als auch den Systemdruck und die Luftzahl in der Strategie zu berücksichtigen und diesbezüglich ein Optimum zu finden.

Kapitel 8

Ausblick

Aufbauend auf dem in dieser Arbeit erstellten Fahrzeugmodell, wäre eine Adaption bzw. Erweiterung des eigens aufgebauten Brennstoffzellenmodells von Interesse. Dabei sind insbesondere empirische Modelle von Vorteil, da diese im Gegensatz zu dem theoretischen Modell, bei welchen eine Brennstoffzellensystemdruckerhöhung eine von der Stromdichte unabhängige konstante Spannungserhöhung ergeben, verschiedene Spannungsänderungen bei unterschiedlichen Stromdichten zulassen. Ebenso wäre die Modellierung der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft und somit eine Analyse des Wassermanagement innerhalb des Brennstoffzellenstacks samt Feuchtigkeitdiffusion der Elektrolytmembran aufschlussreich. Weiters wäre ein dynamisches und kennfeldbasierendes Kompressormodell von Interesse. Dadurch ist eine Untersuchung der Ansprechzeit der Brennstoffzelle möglich und somit auch ein realistischer Betrieb ohne Batterie im Modell analysierbar. Die Modellierung und Simulation der Druckverluste des Stack und in weiterer Folge fortgeschrittenere Betriebsstrategien, welche unter anderem den Systemdruck, die Brennstoffzellenspannung und die Batteriespannung berücksichtigen, würden zum tieferen Verständnis des Brennstoffzellensystem als Fahrzeugantrieb beitragen.

Quellenverzeichnis

Literatur

- [1] James Larminie und Andrew Dicks. *Fuel Cell Systems Explained*. New York: Wiley, 2003. ISBN: 978-0-470-84857-9.
- [2] Gregor Hoogers. *Fuel Cell Technology*. CRC Press, 2002.
- [3] EGandG Technical Services Inc. *Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)*. U.S. Department of Energy, 2004.
- [4] Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir und Steven R. Shaq. „Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits“. In: *IEEE Trans. Energy Conversion* 20.2 (2005), S. 442–451.
- [5] Maher A.R. Sadiq Al-Baghdadi. „Modelling of proton exchange membrane fuel cell performance based on semi-empirical equations“. In: *Renewable Energy* 30.10 (2005), S. 1587–1599.
- [6] M.G. Santarelli, M.F. Torchio und P. Cochis. „Parameters estimation of a PEM fuel cell polarization curve and analysis of their behavior with temperature“. In: *Journal of Power Sources* 159.2 (2006), S. 824–835. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305016642>.
- [7] Hengbing Zhao und Andrew F. Burke. *Optimum Performance of Direct Hydrogen Hybrid Fuel Cell Vehicles*. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, 2009.
- [8] Farouk Odeim et. al. „Power management optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles with experimental validation“. In: *Journal of Power Sources* 252 (2014), S. 333–343. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313019782>.

- [9] Andreas Dildey. *Die PEM-Brennstoffzelle als alternativer PKW-Antrieb*. Dissertation. Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 2005.
- [10] A. Miller et. al. „The GM Voltec 4ET50 Multi-Mode Electric Transaxle“. In: *SAE Int. J. Engines* 4.2 (2011), S. 1102–1114.
- [11] US Department of Energy. *2013 Chevrolet Volt – VIN 3929*. Office of Energy Efficiency und Renewable Energy, 2013.
- [12] Daisie D. Boettner et. al. „Proton Exchange Membrane Fuel Cell System Model for Automotive Vehicle Simulation and Control“. In: *Journal of Energy Resources Technology* 124 (2002).

Online-Quellen

- [13] *Schematische Grafik der Brennstoffzelle, Universität Hannover, Institut für Thermodynamik*. URL: <http://mathechemie.de/brenzel.htm> (besucht am 20. 05. 2014).
- [14] *Wasserstofftechnologie-Initiative Mecklenburg-Vorpommern, WTI e. V., Brennstoffzellen*. URL: <http://www.wti-mv.de/kompetenzen/brennstoffzellen.htm> (besucht am 22. 05. 2014).
- [15] *TÜV SÜD, H2 Mobility: Hydrogen Vehicles*. URL: <http://www.netinform.net/h2/H2Mobility/Default.aspx> (besucht am 26. 05. 2014).
- [16] *Fuel Cells 2000: Fuel Cell Vehicles*. URL: <http://www.fuelcells.org/pdfs/carchart.pdf> (besucht am 23. 06. 2014).
- [17] *EUR-Lex: Richtlinie 91/441/EWG*. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/ALL/?uri=CELEX:31991L0441> (besucht am 01. 09. 2014).
- [18] *United States Environmental Protection Agency: Federal Test Procedure Revisions*. URL: <http://www.epa.gov/otaq/sftp.htm#cycles> (besucht am 01. 09. 2014).
- [19] *TEKES Fuel Cell Programme, Annual Seminar*. URL: <http://www.videonet.fi/tekes/polttokenno/2010/7/Laurikko-2010-09-14.pdf> (besucht am 01. 10. 2014).