



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Jesse Mohrdick

Simulation des dynamischen Verhaltens einer PEM-Brennstoffzelle unter Verwendung des Programmes LabVIEW ®

Jesse Mohrdick

**Simulation des dynamischen Verhaltens
einer PEM-Brennstoffzelle unter
Verwendung des Programmes LabVIEW ®**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Bachelor of Science Maschinenbau – Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Alexander von Stryk

Abgabedatum: 16.05.2022

Zusammenfassung

Jesse Mohrdick

Thema der Bachelorthesis

Simulation des dynamischen Verhaltens einer PEM-Brennstoffzelle unter Verwendung des Programmes LabVIEW®

Stichworte

Brennstoffzellen, Simulation, Überspannungen, Dynamik, LabVIEW, Python

Kurzzusammenfassung

Das Institut für erneuerbare Energien und Energieeffizienz realisiert den Aufbau eines Versuchstandes für Hybridfahrzeuge. In diesem sollen neben einer Last, wie z.B. ein Modellfahrzeug, und einem Batteriespeicher auch eine PEM-Brennstoffzelle zum Einsatz kommen. Ziel dieser Arbeit ist es, ein funktionierendes Simulationsmodell zu erstellen, welches das Verhalten der Brennstoffzelle im Betrieb abbildet. Dabei soll das Modell neben der statischen Spannungsberechnung insbesondere das dynamische Verhalten analysieren und simulieren. Als Voraussetzung dabei ist die Verwendung des Programmes LabVIEW als Simulationsumgebung vorgegeben. Zu Beginn der Arbeit wird auf das Thema der Brennstoffzellentechnik eingegangen. Hier werden speziell der Aufbau und die Funktionsweise von Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen behandelt. Daraufhin erfolgt die Auswahl eines Simulationsansatzes. Dieser wird anhand eines Lastenheftes und Arbeiten aus der Literatur gewählt. Anschließend werden die Grundgleichungen für das Modell aufgestellt und erläutert. Daraufhin können diese in der LabVIEW Umgebung implementiert und das Verhalten des Modells anhand von Lastsprüngen ausgewertet werden. Abschließend erfolgt die Validierung der Ergebnisse anhand von Messungen, die an einem realen Brennstoffzellenstack durchgeführt worden sind.

Jesse Mohrdick

Title of the paper

Simulation of the dynamic behaviour of a PEM-Fuel Cell with the program LabVIEW®

Keywords

Fuel cells, simulation, overvoltage, dynamic, LabVIEW, Python

Abstract

The Institute for Renewable Energies and Energy Efficiency realizes the construction of a test stand for hybrid vehicles. In addition to a load, such as a model vehicle, and a battery storage system, a PEM fuel cell will be included. The aim of this work is to create a functioning simulation model that represents the behaviour of the fuel cell during operation. In addition to the static voltage calculation, the model should analyse and simulate the dynamic behaviour. As a prerequisite for this, the use of the program LabVIEW as a simulation environment is specified. At the beginning of the work the topic of fuel cell technology is dealt with. Here especially the structure and the operation of polymer electrolyte fuel cells are treated. This is followed by the selection of a simulation approach. The approach is selected based on a specification and different articles from the literature. Subsequently, the basic equations for the model are established and explained. These can then be implemented in the LabVIEW environment and the behaviour of the model can be evaluated based on load jumps. Finally, the results are validated with measurements carried out on a real fuel cell stack.



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences

Department Maschinenbau und Produktion

Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

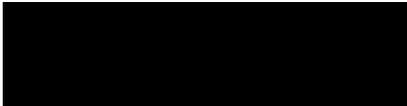
von Herrn Jesse Mohrdick

Matrikel-Nummer: 

Thema: Simulation des dynamischen Verhaltens einer PEM-Brennstoffzelle unter Verwendung des Programmes LabVIEW®

Schwerpunkte: In der Arbeit soll ein geeignetes Simulationsmodell für das dynamische Verhalten einer PEM-Brennstoffzelle ausgewählt und mittels LabVIEW® abgebildet werden. Hierfür ist zuerst eine Hintergrundrecherche erforderlich, die die Grundlagen der PEM-Brennstoffzellen und bereits durchgeführte Arbeiten im Bereich der dynamischen Simulation umfasst. Daraufhin wird ein Lastenheft für das Simulationsmodell erstellt. Wichtigste Punkte sind darin, dass am Ende der Arbeit ein funktionsfähiges Modell entstehen soll, welches in einer LabVIEW® Oberfläche implementiert ist. Dann kann das Simulationsmodell, das die dynamischen Vorgänge, wie z.B. die elektrochemischen Reaktionen, den Massentransport der Gase oder die Membranvorgänge abbildet, programmiert werden. Im Anschluss erfolgt die Verifizierung des Modells durch die Erstellung einer Strom-Spannungs-Kurve und der Ermittlung von Sprungantworten auf verschiedene Lastprofile. Die Validierung soll über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem Verhalten einer realen Zelle erfolgen. Schließlich wird daraus ein Fazit über die Qualität des Modells abgeleitet, ein Ausblick auf Verbesserungsmöglichkeiten gegeben und die Integration des Modells in einen Versuchsstand zur Untersuchung von Hybridantrieben vorbereitet.

Datum



Erstprüfer/in

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungen	IV
Formelzeichen	V
1. Einleitung.....	1
2. Funktionsprinzip und Aufbau von Brennstoffzellen.....	2
2.1 Funktionsprinzip.....	2
2.2 Aufbau der Brennstoffzelle	2
2.3 PEM-Brennstoffzellen	3
2.4 Funktionale Einheiten der Einzelzelle	4
2.4.1 Polymerelektrolytmembran.....	4
2.4.2 Katalytische Schicht.....	5
2.4.3 Gasdiffusionsschicht.....	5
2.4.4 Gasverteiler	6
2.4.5 Membran Elektroden Einheit (MEA).....	7
2.4.6 Kontakt- und Endplatten	7
2.5 Brennstoffzellenstacks	8
3 Auswahl des Simulationsansatzes.....	9
3.1 Mathematische Modellierung von Brennstoffzellen	9
3.2 Modelle aus der Literatur.....	12
3.2.1 statische Modelle	12
3.2.2 dynamische Modelle	12
3.3 Erstellung eines Lastenheftes.....	13
3.4 Der Simulationsansatz.....	14
4. Grundgleichungen für die dynamische Simulation	16
4.1 Thermodynamik der PEMBZ.....	16
4.2 Spannungsverluste	17
4.2.1 Leckageverluste	18
4.2.2 Aktivierungsverluste.....	19
4.2.3 Ohm'sche Verluste	20
4.2.4 Verluste durch Transportlimitierung.....	21
4.2.5 Berechnung der Gesamtspannung.....	23
4.3 Bilanzierung der Brennstoffzelle	24

4.4 Membranmodell	28
4.5 Dynamisches Verhalten der PEM-Brennstoffzelle	32
4.5.1 Luftzufuhr an der Kathode	32
4.5.2 Dynamik der Helmholtz Doppelschicht.....	38
5. Implementierung in LabVIEW/ Python	39
5.1 Generelle Struktur des Modells	39
5.2 Schnittstelle LabVIEW/ Python.....	40
5.4 LabVIEW Modelle	41
5.4.1 statisches Modell.....	41
5.4.2 dynamisches Modell.....	42
5.2 Eingangsgrößen/ Modellparameter	44
6. Simulationsergebnisse	45
6.1 Strom-Spannungs-Kennlinie des statischen Modells	45
6.2 dynamisches Verhalten des Verdichters und Kathodendruck	48
6.3 Sprungantworten auf Lastsprünge des dynamischen Modells	49
7. Modellvalidierung	51
7.1 statisches Modell	51
7.2 dynamisches Modell.....	52
8. Zusammenfassung und Fazit	54
9. Ausblick auf Verbesserungsmöglichkeiten.....	55
Literaturverzeichnis.....	56
Anhang	A
Anhang A: Berechnungsbeispiel Membranmodell.....	A
Anhang B: Stofftabelle aus [21].....	C
Anhang C: Produktdatenblatt Papst Axiallüfter 12V.....	D
Erklärung zur Arbeit	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: verschiedene Brennstoffzellentypen [1].....	2
Abbildung 2: Funktionsprinzip der PEMFC [1]	3
Abbildung 3: Aufbau der PEMFC.....	4
Abbildung 4: Dreiphasengrenze der katalytischen Schicht [10]	5
Abbildung 5: Gasverteiler Varianten [19]	6
Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau eines PEM-Brennstoffzellenstacks [5].....	8
Abbildung 7: generelles Modellschema.....	15
Abbildung 8: typischer Strom-Spannungs-Verlauf von PEMBZ [5]	18
Abbildung 9: generelle Bilanz einer H ₂ -O ₂ -Brennstoffzelle	24
Abbildung 10: Flussbilanz der PEMBZ	25
Abbildung 11: Ortsvariable des Membranmodells	28
Abbildung 12: Massenströme an der Kathode für die Druckberechnung	34
Abbildung 13: Spannung und Leistung über der Drehzahl des Verdichters	36
Abbildung 14: Auszug aus dem Produktdatenblatt des Axiallüfters zum Kapitel Aerodynamik	36
Abbildung 15: Linearer Zusammenhang von Volumenstrom und Drehzahl des Axiallüfters	37
Abbildung 16: Ersatzschaltbild für die Helmholtz Doppelschicht	38
Abbildung 17: Generelle Struktur des Simulationsmodells	39
Abbildung 18: Anwendung der Funktion "Python Node" als Schnittstelle zwischen LabVIEW und Python	40
Abbildung 19: Aufnahme der U-I-Kennlinie mit dem Control & Simulation Loop	41
Abbildung 20: Aufbau des statischen Modells in LabVIEW mit Sub VI's	41
Abbildung 21: Aufbau des dynamischen Modells in LabVIEW.....	42
Abbildung 22: Einteilung des dynamischen Modells in nummerierte Bereiche	43
Abbildung 23: U-I-Kennlinie des statischen Modells	45
Abbildung 24: Leistungskurve des statischen Modells	46
Abbildung 25: korrigierte U-I-Kennlinie des statischen Modells	47
Abbildung 26: korrigierte Leistungskurve des statischen Modells	47
Abbildung 27: Massenstromänderung des Verdichters.....	48
Abbildung 28: Drehzahländerung des Verdichters	48
Abbildung 29: Druckänderung an der Kathode.....	48
Abbildung 30: Positiver Lastsprung von 1 auf 3 Ampere	49
Abbildung 31: Sprungantworten auf verschiedene positive Lastsprünge	50
Abbildung 32: Sprungantworten auf verschiedene negative Lastsprünge	50
Abbildung 33: U-I-Kennlinie des Herstellers Horizon.....	51
Abbildung 34: U-I-Kennlinie des Simulationsmodells	51
Abbildung 35: positive Sprungantworten	52
Abbildung 36: positive Sprungantworten	52
Abbildung 37: negative Sprungantworten des Simulationsmodells.....	53
Abbildung 38: negative Sprungantworten der realen Messreihe.....	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der mathematischen Modelle für die Brennstoffzellensimulation [13]	10
Tabelle 2: Zusammenhang der Nummerierung und der Formelzeichen für die Flussbilanz	26
Tabelle 3: Übersicht aus dem Produktdatenblatt des Axiallüfters von Papst über den	35
Tabelle 4: Modellparameter	44

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
A	Anode
akt	Aktivierung
diff	Diffusion
e^-	Negativ geladenes Elektron
eff	effektiv
elek	elektrisch
ges	Gesamt
GDL	Gasdiffusionsschicht, engl.: gas diffusion layer
H^+	Atomarer Wasserstoff
H_2	Molarer Wasserstoff
H_2O	Wasser
ion	ionisch
irrev	irreversibel
K	Kathode
kon	Konzentration
leck	Leckage
mem	Membran
N_2	Stickstoff
O_2	Sauerstoff
ocv	Leerlaufspannung, engl.: open circuit voltage
ohm	ohmsch
PEMBZ	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
rev	reversibel
SAT	Sättigung, engl.: saturation
St	Stack
tr	trocken

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	cm^2	Fläche
a	–	Aktivität
C	F	Kapazität
c	mol/m^3	Konzentration
c_p	$J/kg K$	Spezifische Wärmekapazität
D	cm^2/s	Diffusionskoeffizient
E^0	V	Elektrodenpotential bei Standardbedingungen
F	C/mol	Faraday Konstante
G^0	kJ/mol	Freie Enthalpie bei Standardbedingungen
I	A	Stromstärke
i	A/cm^2	Stromdichte
i_0	A/cm^2	Austauschstromdichte
i_{lim}	A/cm^2	Limitierende Stromdichte
J	$mol/s cm^2$	Stoffmengenfluss
J_V	$kg m^2$	Massenträgheitsmoment von Verdichtermotor + Verdichter
l	cm	Länge
M	kg/mol	Molare Masse
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
N	–	Anzahl der Zellen
n	$1/s$	Drehzahl
P	W	Leistung
p	Pa	Druck
R	Ω	Widerstand
R_M	$J/mol K$	Universelle Gaskonstante
S^0	$J/mol K$	Entropie bei Standardbedingungen
T	K	Temperatur
t	s	Zeit
U	V	Spannung
V	m^3	Volumen
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
x	–	Stoffmengenanteil
z	–	Valenzelektronenzahl
α	–	Übertragungsfaktor
β	–	Verhältnis zwischen Wasserfluss & Ladungsfluss der Membran
γ	–	Spezifisches Luftverhältnis
Δ	–	Differenz
δ	cm	Dicke der Gasdiffusionschichten
ε	–	Elektrodenporosität
η	–	Wirkungsgrad
ϑ	$^{\circ}C$	Temperatur
λ	–	Feuchtegehalt der Membran
ρ	kg/m^3	Dichte
σ	S/cm	Leitfähigkeit
τ	Nm	Drehmoment
ω	rad/s	Winkelbeschleunigung

1. Einleitung

Das Institut für erneuerbare Energien und Energieeffizienz der HAW Hamburg realisiert den Aufbau eines Versuchstandes zur Untersuchung von Hybridantrieben. Dieser Versuchstand soll folgende drei Komponenten enthalten. Zum einen wird eine Last integriert. Dabei kann zum Beispiel der Einsatz eines Modellfahrzeuges erfolgen, oder weitere Möglichkeiten ausgeschöpft werden. Um die Last mit der benötigten Leistung zu versorgen, soll außerdem ein Speicher, wie zum Beispiel durch ein Batteriesystem, und eine Brennstoffzelle dem Versuchstand hinzugefügt werden. Diese Arbeit konzentriert sich dabei auf letzteren der drei Hauptbestandteile, nämlich der Brennstoffzelle. Für diese soll ein geeignetes Simulationsmodell entwickelt werden, das das dynamische Verhalten der Brennstoffzelle während des Betriebes analysieren und abschätzen kann. So besteht dann im weiteren Verlauf des Projektes zum Versuchstand die Möglichkeit, das Simulationsmodell anstelle des realen Brennstoffzellenstacks zu integrieren.

Das Simulationsmodell soll spezifisch das Verhalten einer Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle abbilden. Diese sind aktuell der Stand der Technik im Bereich der Elektromobilität und werden am meisten für diese Anwendung eingesetzt. Als Vorlage für das Modell wird sich dabei an einer realen PEM-Brennstoffzelle der Firma Horizon orientiert. Diese liefert eine Nennleistung von 100 Watt. Als Simulationstool ist die Verwendung des Programmes LabVIEW vorgegeben. Dieses wird zusammen mit dem Programmierwerkzeug Python eingesetzt, um das Modell zu implementieren und Sprungantworten bei verschiedenen Lastfällen aufzunehmen.

Die Arbeit beginnt mit dem generellen Aufbau und der Funktionsweise von PEM-Brennstoffzellen. Besonders die einzelnen Schichten der Zelle und die ablaufende elektrochemische Reaktion sind hier von Bedeutung. Danach folgt die Auswahl eines geeigneten Simulationsansatzes. Die Auswahl wird dabei auf Basis eines Lastenheftes und auf Basis von bereits durchgeführten Arbeiten aus der Literatur zum Thema der dynamischen Simulation von PEM-Brennstoffzellen getroffen. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die getroffenen Annahmen und die Möglichkeiten zur mathematischen Modellierung gelegt. Daraufhin werden alle für das Modell relevanten Formeln aufgeführt und erklärt. Neben der Behandlung der thermodynamischen Aspekte, der betrieblichen Spannungsverluste und der Bilanzierung der Brennstoffzelle erfolgt hier zusätzlich die Integration eines Membranmodells und die Untersuchung der dynamischen Einflüsse. Mit dem Abschluss der Grundlagen zur Simulation wird dann im weiteren Verlauf der Arbeit das Thema der Implementierung aufgeführt. Der generelle Aufbau des Modells und die Schnittstelle zwischen LabVIEW und Python werden behandelt. Außerdem werden Darstellungen des implementierten Modells in LabVIEW gezeigt. Anschließend werden Sprungantworten auf verschiedene Stromsprünge aufgenommen und ausgewertet. Außerdem wird eine Strom-Spannungs-Kennlinie für das statische Verhalten des Modells erzeugt. Die Ergebnisse der Simulation werden zum Abschluss mittels gemessener Sprungantworten der realen 100W Brennstoffzelle validiert. Schließlich kann daraus ein Fazit über die Qualität des Modells gewonnen und ein Ausblick auf Verbesserungsmöglichkeiten gegeben werden.

2. Funktionsprinzip und Aufbau von Brennstoffzellen

2.1 Funktionsprinzip

Anders als bei einer herkömmlichen Verbrennung, bei der unter Freisetzung von Wärme ein Brennstoff in Energie umgewandelt wird, handelt es sich bei dem Prinzip der Brennstoffzellen um eine direkte Verstromung. Hier wird der Brennstoff direkt und ohne den Umweg über die Wärmeproduktion in Elektrizität umgesetzt. Diesen Vorgang nennt man auch stille oder kalte Verbrennung, da es keine übliche Flammenbildung gibt. Dieses Prinzip der Umwandlung von chemischer in elektrische Energie mittels elektrochemischer Reaktionen wurde um 1840 von den Forschern Schönbein und Grove entdeckt. [1]

2.2 Aufbau der Brennstoffzelle

Allgemein besteht eine Brennstoffzelle aus zwei Elektroden, der Anode und der Kathode, und einem dazwischen angeordneten Elektrolyten. An der Anode findet die Oxidation statt, das heißt hier wird unter Abspaltung von Elektronen die Oxidationszahl erhöht. An der Kathode findet die Reduktion statt, also die Reduzierung der Oxidationszahl durch Aufnahme von Elektronen unter Zuführung von Sauerstoff. Beide Elektroden sind räumlich durch einen Elektrolyten voneinander getrennt, sodass die bei der Oxidation abgespalteten Elektronen durch einen äußeren Stromkreis zur Kathode gelangen. Dabei diffundieren je nach Brennstoffzellentyp unterschiedliche Ionen durch den Elektrolyten. [1] Die Funktionsweise verschiedener Brennstoffzellentypen ist in Abbildung 1) dargestellt. Da in dieser Arbeit die Anwendung und Simulation einer speziellen Brennstoffzelle, nämlich der PEMBZ, erfolgen soll, sei diese im Folgenden nun nochmal näher beschrieben.

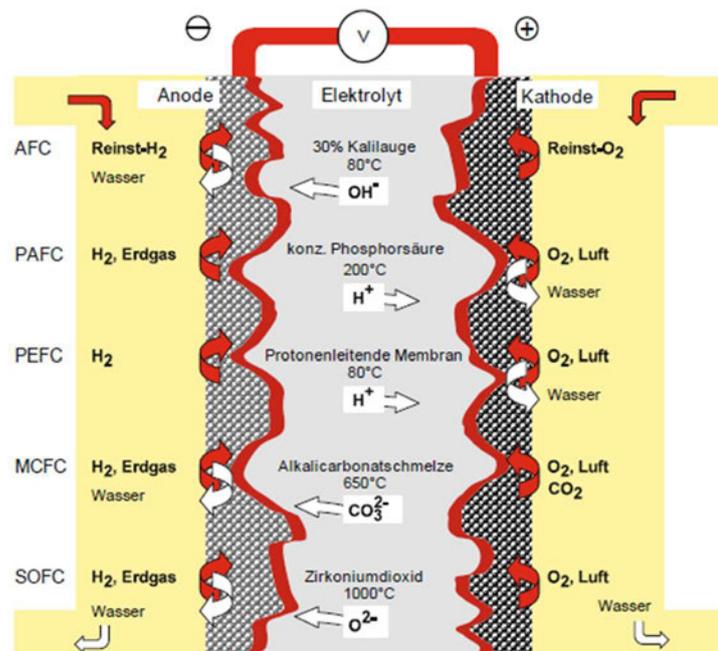


Abbildung 1: verschiedene Brennstoffzellentypen [1]

2.3 PEM-Brennstoffzellen

Die PEMZ basiert auf der Umkehrung der Wasser-Elektrolyse. Aufgrund der örtlichen Trennung durch den Elektrolyten (hier: Membran) läuft die Reaktion in zwei Teilschritten ab. Die Membran besteht aus einem ionenleitenden Polymer, das nur den Durchgang von Wasserstoffionen ermöglicht. Wasserstoff wird der Anode, an der die Oxidation stattfindet, zugeführt und das Molekül spaltet sich in positive Protonen und negative Elektronen auf. Anschließend wandern die Wasserstoff-Ionen durch die Membran zur Kathode. Hier wird zugeführter Sauerstoff mit den durch den äußeren Stromkreis geleiteten Elektronen reduziert. Dabei wird thermische und elektrische Energie freigesetzt. Das Endprodukt stellt die Verbindung beider Ionen zu Wasser dar. [5]

Teilreaktionen:

- Aufspaltung von Wasserstoff an der Anode



- Reduktion an der Kathode



Gesamtreaktion:

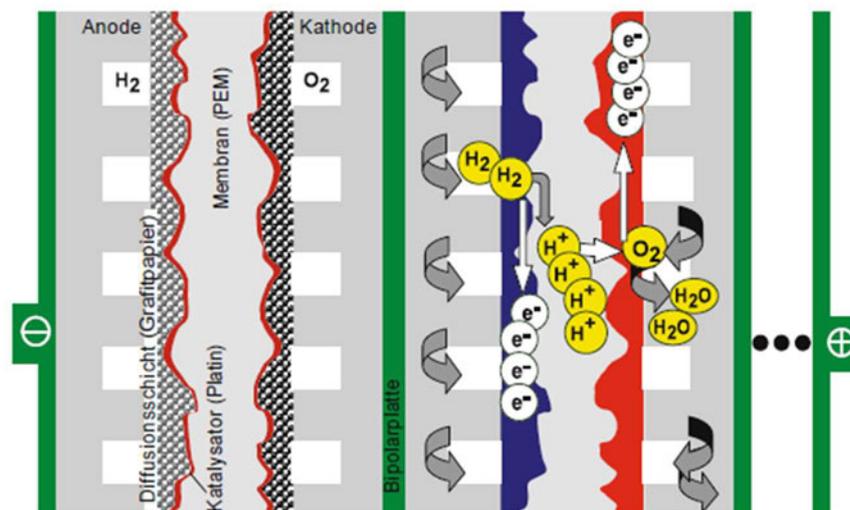


Abbildung 2: Funktionsprinzip der PEMFC [1]

Wie in Abbildung 2) zu erkennen ist, stellt der vorher genannte Aufbau durch zwei Elektroden und eine Membran nur eine Annäherung dar. So setzen sich die Elektroden aus mehreren funktionalen Einheiten, wie der Gasdiffusionsschicht, den Gasverteilerkanälen und der Katalysatorschicht zusammen. Diese genauere Auflösung soll nun im nächsten Kapitel erläutert und erklärt werden.

2.4 Funktionale Einheiten der Einzelzelle

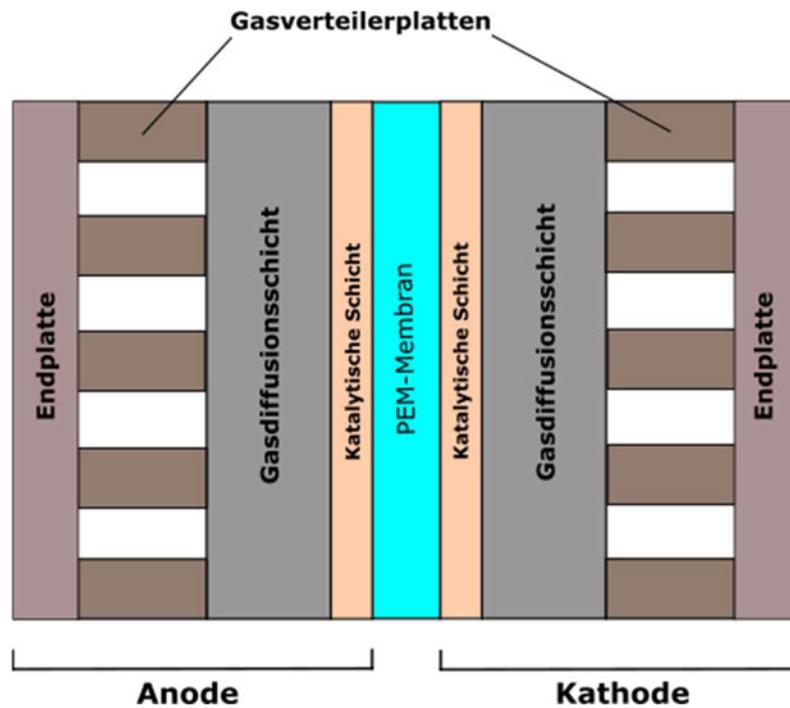


Abbildung 3: Aufbau der PEMFC

2.4.1 Polymerelektrolytmembran

Die Polymerelektrolytmembran hat drei wesentliche Aufgaben. Sie fungiert als Separator, Elektrolyt und als Katalysatorträger [1]. Zum einen muss die Membran die Reaktionspartner Wasserstoff und Sauerstoff räumlich voneinander trennen und dabei zeitgleich den Transport der Protonen (Wasserstoff-Ionen) ermöglichen. Als Eigenschaft der Membran ist deshalb eine hohe Protonenleitfähigkeit wichtig, wobei trotzdem die Barriere zwischen dem Brennstoff und dem Oxidationsmittel gegeben sein muss. Zum anderen darf das Elektrolyt nicht elektrisch leitfähig sein, um einen Kurzschluss durch die Membran zu verhindern und das Durchlaufen der Elektronen durch den äußeren Stromkreis zu gewährleisten. [5]

Mit dem Ladungstransport der Wasserstoff-Ionen durch die Membran geht ein merklicher Ohm'scher Widerstand einher. So sollte die Membran möglichst dünn sein, um einen hohen elektrischen Verlust zu vermeiden. Der Widerstand der Membran ist dabei maßgeblich abhängig von der ionischen Leitfähigkeit, welche ihrerseits abhängig vom Wassergehalt der Membran ist. [5] Es werden 50 – 150 μm dicke, protonenleitende Folien bei PEM-Brennstoffzellen eingesetzt. [1]

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Membran ist die Beständigkeit gegenüber mechanischen und thermischen Beanspruchungen. [5]

2.4.2 Katalytische Schicht

In der Katalysatorschicht finden die elektrochemischen Reaktionen der Brennstoffzelle statt. Dabei muss eine sogenannte Dreiphasengrenze vorhanden sein, damit diese Reaktionen ablaufen können. Die Dreiphasengrenze setzt sich aus Membranmaterial zur Protonenleitung, amorphen Kohlenstoff zur Elektronenleitung, den Reaktionsgasen H_2 und O_2 und zusätzlich Katalysatoren, die die Geschwindigkeit der Reaktionen erhöhen, zusammen. [6]

In PEM-Brennstoffzellen ist das am häufigsten eingesetzte Katalysatormaterial Platin. Dies wird sowohl an der Anode für die Wasserstoffoxidation als auch an der Kathode für die Sauerstoffreduktion eingesetzt. [5] Der wichtigste Faktor ist dabei nicht die Menge bzw. Größe der Katalysatorpartikel, sondern die aktive Oberfläche. Die Wirkung der Katalysatoren ist also umso größer, je größer die aktive Oberfläche der Katalysatoren ist. Ziel ist es deshalb, möglichst kleine Teilchen ($< 5 \text{ [nm]}$) auf einer möglichst großen Elektrodenoberfläche zu verteilen. Deshalb werden diese auf hochporösen Stützstrukturen aus Kohlenstoff platziert. Auch hier gilt ähnlich wie bei der Membran, dass die katalytische Schicht möglichst dünn ausfallen sollte, um Potentialverluste zu minimieren. [6]

Die Porosität der Elektroden dient zusätzlich einem weiteren Faktor, nämlich der Diffusion des entstehenden Produktwassers. Fließt dieses langsam oder gar nicht ab, so kann weniger Sauerstoff zur Kathode gelangen und die Reaktion wird gehemmt. [5]

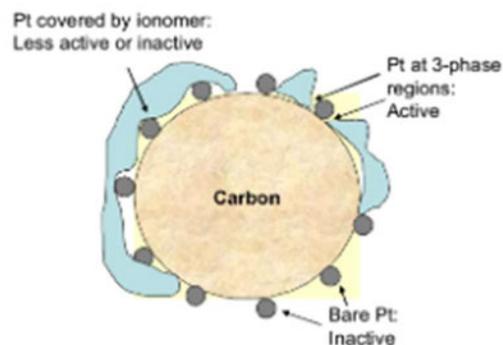


Abbildung 4: Dreiphasengrenze der katalytischen Schicht [10]

Die Abbildung 4) verdeutlicht noch einmal, wie wichtig es ist, dass alle drei Phasen gleichzeitig in Kontakt miteinander stehen. Soll die Reaktion ablaufen, so müssen Platinpartikel, Kohlenstoffstruktur, Gase und Membranflüssigkeit vorhanden sein, wie oben rechts im Bild zu erkennen ist. [9]

2.4.3 Gasdiffusionsschicht

Die Gasdiffusionsschicht ist zwischen der katalytischen Schicht und der Gasverteilerplatte angeordnet. Der Zweck dieser Schicht ist es, die Reaktionsgase gleichmäßig über der katalytischen Schicht zu verteilen, die elektrischen Ladungen an die Gasverteilerplatten weiterzuleiten und eine optimale Feuchtigkeit innerhalb der Elektroden und der Membran aufrecht zu erhalten. [9]

Ein guter Gastransport von den Verteilerplatten zu den Reaktionszentren innerhalb der katalytischen Schicht ist wichtig, um die Dreiphasengrenze zu erzeugen. Daher sollte die Gasdiffusionsschicht eine möglichst hohe Porosität aufweisen. Diese steht jedoch im Gegensatz zu einer guten elektrischen Leitfähigkeit und mechanischer Stabilität. [6] Dabei ist eine gleichmäßige Verteilung über der katalytischen Schicht erforderlich, um die Reaktionen flächendeckend zu initiieren. Außerdem muss die bei den elektrochemischen Reaktionen entstehende Wärme abgeleitet werden.

Zusätzlich dienen diese porösen Schichten dem Wassermanagement. Denn die Membran darf weder komplett Austrocknen (Wasserstoffionentransport kommt zum Erliegen) noch geflutet (Gastransport zu Reaktionszentren wird blockiert) werden. So ist der Abtransport vom flüssigen Produktwasser auf der Kathodenseite besonders kritisch. [9]

Die Erfüllung dieser beschriebenen Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit oder Porosität wird durch Verwendung von Materialien, wie Kohlenstoff-Papieren oder Kohlenstoff-Strukturgeweben, erreicht. [5]

2.4.4 Gasverteiler

Aufgabe der Gasverteiler ist es für einen effizienten An- und Abtransport der Reaktionsgase zu sorgen. Zusätzlich muss auf der Kathodenseite das Produktwasser abtransportiert werden. Außerdem unterstützen diese Gaskanäle die Leitung der Elektronen und die Leitung der entstehenden Abwärme. Dadurch ergeben sich mehrere Anforderungen an die thermischen, elektrischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften des Gasverteilerwerkstoffes. Ein oftmals eingesetztes Material stellt Graphit dar (Kohlenstoff), da dieses alle geforderten Eigenschaften, mit Ausnahme der hohen mechanischen Stabilität, erfüllt. Als Alternative wird Edelstahl verwendet. Hier kann es jedoch zu korrosionsbedingten Problemen durch die Präsenz von Wasser im System kommen. [5]

Die Größe, die Form und das Muster der Strömungskanäle der Gasverteiler können dabei einen großen Einfluss auf die Leistung der Brennstoffzelle haben. Im unteren Bild sind verschiedene Auslegungsmöglichkeiten dargestellt. So können die Strömungskanal-Geometrien prinzipiell zwischen paralleler, serpentinförmiger oder ineinander verschränkte (interdigitated) Musterung unterschieden werden. Durch die Wahl der Geometrie werden die Aufgaben der Verteilung der Gase, der Minimierung des Druckverlustes und der Produktwasserentfernung unterschiedlich gut umgesetzt. Zum Beispiel sorgt ein Serpentinendesign für ein gutes Abfließen des entstehenden Wassers, jedoch entsteht auch ein höherer Druckverlust bei größeren Plattenflächen. Parallel geführte Kanäle bewirken das genaue Gegenteil: Der Druckverlust wird minimiert, doch das Wasser kann sich leicht ansammeln. Die ineinandergreifenden fördern die Gasdiffusion und haben positive Eigenschaften in Bezug auf das Wassermanagement, jedoch entstehen auch hier höhere Druckverluste. [9]

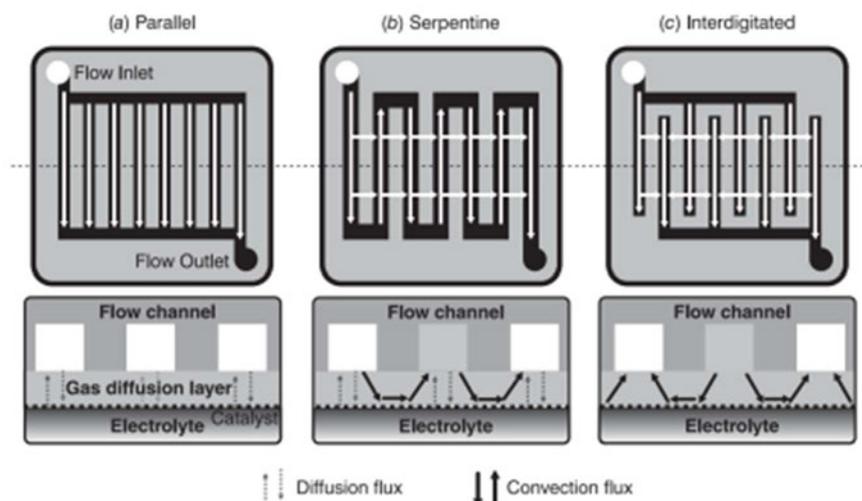


Abbildung 5: Gasverteiler Varianten [19]

2.4.5 Membran Elektroden Einheit (MEA)

Als Membran- Elektroden- Einheit (MEA) wird die Verbindung der inneren Schichten einer PEM-Brennstoffzelle bezeichnet. In der Minimalkonfiguration besteht diese Verbundeinheit aus den zwei katalytischen Schichten und der Membran, welche auch als Dreischicht-MEA bezeichnet wird. Im Falle der Fünfschicht-MEA werden die beiden Gasdiffusionsschichten an der Anode und der Kathode hinzugezählt. Die maximale Anzahl an Schichten stellt die Siebenschicht-MEA dar, da diese neben den fünf herkömmlichen Schichten noch zwei Schichten für Dichtungszwecke in die Sandwich-Konstruktion integriert. [5]

2.4.6 Kontakt- und Endplatten

Ausgehend von der katalytischen Schicht werden die Elektronen durch die Gasdiffusionsschicht und die Gasverteilerplatten an die Kontaktplatten geleitet. Von diesen Komponenten aus fließt der Strom durch den äußeren Stromkreis, an dem eine Last hängt und elektrische Leistung entnommen wird. Außer der guten elektrischen Leitfähigkeit und mechanischer Festigkeit müssen die Kontaktplatten keine weiteren Eigenschaften aufweisen.

Die Endplatten werden aus Metall hergestellt und bilden das Grundgerüst für die gesamte Brennstoffzelle. Die bei der Reaktion entstehende Wärme wird hier zum Beispiel über Kühlrippen an die Umgebung abgeführt. Alternativ ist auch das Kühlen der Zelle durch Wasser, das durch die Metallstruktur in von der Reaktion getrennten Kanälen geleitet wird, denkbar. Anforderungen an die Endplatten sind beispielsweise eine ausreichende mechanische Festigkeit, eine gute Wärmeleitfähigkeit und eine Mindestkorrosionsbeständigkeit. [5]

In Brennstoffzellenstacks übernehmen die Bipolarplatten die Aufgaben der Endplatten und der Kontaktplatten. Zusätzlich sind in diesen Bipolarplatten die Gasverteilerkanäle eingelassen. Im nächsten Abschnitt soll deshalb die Verschaltung mehrerer Einzelzellen zu einem Stack aufgezeigt werden.

3 Auswahl des Simulationsansatzes

Da nun im letzten Kapitel die Grundlagen für den Aufbau und das Funktionsprinzip von PEM Brennstoffzellen aufgezeigt wurde, soll nun die Auswahl des Simulationsansatzes erfolgen. Entscheidend für dieses Kapitel ist die allgemeine Frage, warum und wozu die Simulation der beschriebenen Brennstoffzelle nützlich ist. Im weiteren Verlauf werden dann verschiedene Ansätze dargestellt, die in der Vergangenheit für die mathematische Modellierung verwendet wurden. Zusätzlich sollen einige Modelle aus der Literatur, auf die in dieser Arbeit Bezug genommen wird, näher beschrieben werden. Auf Basis der Möglichkeiten, die die verschiedenen Ansätze bieten, und der vorher mit dem Betreuersteam besprochenen Anforderungen an das Modell, erfolgt die Erstellung eines Lastenheftes.

Schließlich kann dann mit der Grundlage des Lastenheftes ein geeigneter Simulationsansatz ausgewählt werden. Hierzu gehören unter anderem alle getroffenen Vereinfachungen und beinhalteten Annahmen.

3.1 Mathematische Modellierung von Brennstoffzellen

Die mathematische Modellierung von Brennstoffzellen spielt eine entscheidende Rolle in der Brennstoffzellenforschung und -entwicklung. So kann diese Modellierung Entwicklern dabei helfen, das Design der Zellen zu verbessern, Produktionskosten zu senken und sowohl bessere als auch effizientere Brennstoffzellen auf den Markt zu bringen.

Das Modell an sich sollte dabei möglichst robust und genau funktionieren und für eine Vielzahl von Problemen gute Näherungslösungen liefern. Ein gutes Modell kann die Leistungsabgabe der Brennstoffzelle in Anbetracht verschiedener Betriebsparameter abschätzen. Solche können z.B. Temperaturen innerhalb der Zelle, des Brennstoffes oder der zugeführten Luft, die Partialdrücke der zugeführten Gase, oder auch Zell- und Elektrodenpotentiale und Massenbilanzen der Reaktionspartner sein.

Das Ziel bei der Simulation ist hierbei eben die Entwicklung insofern zu unterstützen, als das neue und effizientere Designs für beispielsweise Gaskanäle oder andere Grundgerüste gefunden werden. Auch die Eignung von verschiedenen Materialien für die Gasdiffusionschichten, Membranen oder katalytischen Schichten wird immer noch erforscht. [13]

Nun gibt es in der Literatur eine Vielzahl von Ansätzen, die sich mit der Simulation von Brennstoffzellen beschäftigen. Diese unterscheiden sich teilweise sehr in deren Komplexität und Detailierung. Um eine Übersicht über das Thema zu geben, sei hier auf die Tabelle (1) verwiesen. Diese ordnet die verschiedenen Kategorien, die zu einer Modellierung von Brennstoffzellen erforderlich sind, und zeigt einige Beispiele auf, mit deren Hilfe die Probleme mathematisch beschreiben lassen.

Anzahl der Dimensionen	Dyn. / Stat.	Kinetik der Anode und der Kathode	Phase innerhalb der Elektroden	Massentransport (Elektroden)	Massentransport (Elektrolyt)	Energiebilanz
Eindimensional	Statischer Zustand oder dynamischer Zustand	Butler-Volmer Gleichung Tafel-Ansatz	Einphasig: Entweder gasförmig oder flüssig	Effektive Fick'sche Diffusion	Nernst-Planck + Schlögl	Isotherm
Zweidimensional		Komplexe Gleichungen für die Kinetik	Zweiphasig: Kombination der beiden Phasen, Zweiphasenströmung	Nernst-Planck Ansatz	Nernst-Planck + „drag coefficient“	Gesamte Energiebilanz
Dreidimensional				Nernst-Planck + Schlögl Maxwell-Stefan	Maxwell-Stefan Effektive Fick'sche Diffusion	

Tabelle 1: Übersicht der mathematischen Modelle für die Brennstoffzellensimulation [13]

Die erste Kategorie bezieht sich auf die Anzahl der Dimensionen. Es besteht die Möglichkeit, die Transportvorgänge von Ladung, Wärme und Masse entweder eindimensional durch die Schichten (siehe Kapitel 2) der Brennstoffzelle, zweidimensional oder komplett durch den Raum aufgelöst (3D) zu betrachten. Die Komplexität der mathematischen Beschreibungen nimmt dabei mit der Anzahl der Dimension zu. In den letzten Jahren wird zunehmend versucht, die Vorgänge in der Zelle komplett durch den Raum aufgelöst zu berechnen.

Die nächste grundsätzliche Möglichkeit, Modelle zu unterscheiden, besteht darin, das Betriebsverhalten und die Leistung der Brennstoffzelle unter statischen oder unter dynamischen Zuständen zu betrachten. Statische Modelle sind meist einfacher, können jedoch Lastwechsel wie z.B. bei Fahrdynamiken schlecht abbilden. Dynamische Modelle sind komplexer und werden deutlich weniger in der Literatur verwendet als statische. Meistens wird zur Abbildung der Dynamik ein äquivalentes elektrisches Ersatzmodell mit einem Kondensator verwendet.

Eine der wichtigsten Kategorien ist die der Elektrodenkinetik. Hier werden mitunter die wichtigsten Vorgänge, die elektrochemischen Reaktionen, betrachtet. Mathematisch kommt die Butler-Volmer Gleichung, deren Vereinfachte Ableitung die Tafel-Gleichung oder hochkomplexe Gleichungen für die Kinetik zum Einsatz.

Die nächste Spalte bezieht sich auf die Phase innerhalb der Elektroden. Entweder werden die Strömungen als einphasig, also flüssig oder gasförmig, oder in komplexerer Form als Zweiphasenströmung betrachtet.

Darauf folgen die Möglichkeiten für die mathematische Beschreibung des Massentransports in den Elektroden und dem Elektrolyten. Weit verbreitet ist der Ansatz mit Hilfe der effektiven Fickschen Diffusion, der Ansatz von Maxwell-Stefan oder auch der Ansatz von Nernst-Planck.

Die letzte Spalte widmet sich der energetischen Bilanzierung. Diese kann entweder isotherm oder raumspezifisch durchgeführt werden. [13]

3.2 Modelle aus der Literatur

In diesem Abschnitt sollen nun einige Beispiele aus der Literatur aufgeführt werden, auf die in dieser Arbeit Bezug genommen wird und die bei der Entwicklung des Modells und der Entscheidungsfindung für den Modellierungsansatz eine Rolle gespielt haben. Zuerst werden statische Modelle aufgeführt. Diese sind in der Literatur deutlich häufiger vertreten als die dynamischen Modelle. Letztere haben jedoch in den vergangenen Jahren mehr und mehr an Relevanz und Aufmerksamkeit gewonnen. Da sich diese Arbeit ebenfalls mit der Dynamik der Brennstoffzelle beschäftigt, umfasst die Literaturrecherche deutlich mehr dynamische als statische Modelle.

3.2.1 statische Modelle

In [18] wird ein nulldimensionales Modell entwickelt, das neben den elektrochemischen und thermodynamischen Vorgängen auch die Massenströme an den Elektroden behandelt. Zusätzlich ist ein Modell zum Verhalten der Membranfeuchte enthalten. Die Arbeit in [17] orientiert sich stark an dem vorher beschriebenen Ansatz. Hier wird jedoch das Zusammenspiel von Brennstoffzelle mit einem Metallhydridspeicher untersucht. In [21] wird ein eindimensionales Modell entwickelt. Dabei werden die Diffusionsvorgänge durch die binäre Ficksche Diffusion beschrieben. Zusätzlich ist ein umfassendes Membranmodell integriert.

3.2.2 dynamische Modelle

Die Arbeiten [15], [16], und [24] wählen alle einen ähnlichen Ansatz zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens einer PEMBZ. Die elektrochemischen Grundgleichungen basieren hier auf semi-empirischen Ansätzen. Bei der Dynamik wird sich auf das Verhalten der Helmholtz Doppelschicht konzentriert. Dieses wird durch ein elektrisches Ersatzmodell beschrieben. Die Dynamik der Massenströme oder ein Temperaturmodell sind nicht enthalten. Im Gegensatz hierzu behandeln die Arbeiten [28], [29] und [31] die Dynamik auf Basis von umfassenden Betrachtungen zu den Massenströmen in der PEMBZ. Dabei integrieren [29] und [31] dynamische Betrachtungen zum Verdichter. Dieser wird mit Hilfe einer linearen Motorgleichung und einer Kompressormap modelliert. In [30] wird neben einem semi-empirischen Ansatz für das elektrochemische Modell auch ein Temperaturmodell entwickelt. Zusätzlich liegt hier der Fokus auf der Echtzeit-Simulation. Die Arbeit [34] wird ein dynamisches Modell entwickelt, das auf physikalischen und chemischen Gleichungen basiert. Besonders interessant ist hier der Ansatz zur Gasdiffusion, welcher mittels der Stefan-Maxwell Gleichung beschrieben wird. In der Arbeit [6] wird ein umfassendes dreidimensionales Modell entwickelt. Die Grundgleichungen werden mit den Erhaltungsprinzipien von Masse, Energie und Ladung hergeleitet.

3.3 Erstellung eines Lastenheftes

Funktionierendes Modell

Ziel der Arbeit ist es, ein funktionierendes Modell zu erstellen, das die dynamischen Vorgänge innerhalb einer PEM-Brennstoffzelle abbildet. Dabei ist die Komplexität, mit derer das Simulationsmodell aufgebaut wird, im Sinne des vorgegebenen Zeitraumes zu wählen. Das bedeutet, dass die dreimonatige Frist für das Erstellen der Bachelorthesis als limitierender Faktor zu betrachten ist. Zum Beispiel wäre ein vollaufgelöstes, dreidimensionales Modell, das die komplexen Vorgänge wie der Elektrodenkinetik sehr detailliert auflöst, in dem Zeitraum nicht realisierbar. Im Vordergrund soll demnach die Erstellung eines funktionstüchtigen Modelles stehen, welches anschließend in einen Versuchstand für Hybridantriebe integriert werden kann.

Implementierung in LabVIEW

Die Implementierung des Modells soll mit dem Programmierwerkzeug LabVIEW erfolgen. Dieses bietet eine gute Bedienbarkeit und eine übersichtliche Benutzeroberfläche, sodass zu einem späteren Zeitpunkt das Ergebnis der Arbeit von Studierenden und Mitarbeitern des Instituts für Erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen (IEE) für Versuche und Auswertungen verwendet werden kann. Dabei ist können jegliche Berechnungen, die für das Simulieren des dynamischen Verhaltens der Brennstoffzelle erforderlich sind, auch mit einer anderen Programmiersprache erfolgen. LabVIEW bietet in diesem Fall die Möglichkeit, Berechnungscodes in der Oberfläche zu integrieren. Besonders die weit verbreiteten Sprachen Matlab und Python können sehr schnell und einfach für diese Anwendung benutzt werden.

Dynamik

Für den Hybridversuchsstand ist es von Bedeutung, dass das Simulationsmodell in der Lage ist dynamische Vorgänge abzubilden. Es sollen an diesem Versuchstand das Zusammenspiel von Brennstoffzelle, Batteriespeicher und Last untersucht werden. So soll das Simulationsmodell mit verschiedenen hohen Lasten und Lastsprüngen beaufschlagt werden. Insbesondere die Dynamik der Helmholtz Doppelschicht innerhalb der Elektroden, die Dynamik des Verdichters, der für die Sauerstoffzufuhr sorgt, oder der Temperaturverlauf können hier behandelt werden.

3.4 Der Simulationsansatz

Da in den vorherigen Abschnitten des Kapitels die Grundlagen der Simulation von Brennstoffzellen dargestellt wurden, soll im letzten Schritt der Ansatz für diese Arbeit ausgewählt werden. Dabei werden insbesondere die Möglichkeiten der mathematischen Modellierung, die Anforderungen des Lastenheftes und vorherige Arbeiten zum Thema der Simulation bei der Entscheidung berücksichtigt. Ein weiterer wichtiger Faktor stellt das Zeitlimit für die Bearbeitung der Thesis dar.

In dieser Arbeit fällt die Wahl auf ein eindimensionales Modell. Jegliche Transportphänomene sollen so vereinfachend durch die verschiedenen Schichten der Brennstoffzelle (siehe Abb. (3)) simuliert und berechnet werden. Dies ist besonders von Vorteil, da nicht nur rein statische Vorgänge, sondern auch dynamische Vorgänge abgebildet werden. Beispielsweise ist die Betrachtung von zweidimensionalem Gastransport in den Gasverteilern äußerst aufwendig. So wird ausgehend von der Eduktkonzentration in den Elektroden der Transport durch die 5-Schicht-MEA modelliert, und hieraus die jeweiligen Spannungen und die Leistung des Stacks bestimmt. Die Eindimensionalität des Modells führt also unweigerlich zu einer Vernachlässigung des konvektiven Massentransport der Gase und nur die diffusiven Vorgänge sollen abgebildet werden.

Ein äußerst komplexes Thema stellt die Kinetik der Elektroden dar. Wie im später folgenden Kapitel zur Spannungsberechnung deutlich wird, spielt die Kinetik innerhalb der Elektroden eine elementare Rolle in Bezug auf die Spannungsausgabe der Zelle. Um die Modellierung in diesem Falle nicht zu aufwändig ausfallen zu lassen, wird davon ausgegangen, dass der Brennstoffzellenstack bei hohen Stromdichten, also dem fließenden Strom bezogen auf die aktive Membranfläche der einzelnen Zellen, betrieben wird. So kann die Butler-Volmer Gleichung vereinfacht und der Tafel-Ansatz verwendet werden.

Eine der am meisten vereinfachenden Annahmen in dem in dieser Arbeit entwickelten Modellierungsansatz stellt die Phase innerhalb der Elektroden dar. Auch wenn hier Niedertemperatur Brennstoffzellen behandelt werden, also in der Realität das Produktwasser flüssig vorliegt, soll das Wasser im System durchweg als dampfförmig angenommen werden. Mit dieser Annahme wird gewährleistet, dass die aufwendig zu modellierende Zweiphasenströmung ignoriert wird. Diese ist nämlich immer noch ein Forschungsthema im Bereich der Brennstoffzellensimulation und in der Literatur nur wenig vertreten. So muss schon von im Vorfeld von einer Abweichung des Modells von der Realität ausgegangen werden.

Für den Massentransport innerhalb der Elektroden wird ein binäres System von Gasen verwendet. Aus diesem Grund lässt sich die einfache Ficksche Diffusion anwenden. Dabei wird der Massenumsatz von Stickstoff, welcher keinen Anteil am Reaktionsgeschehen hat, vernachlässigt. Innerhalb der Elektrolytmembran, in der besonders der Wassertransport zur Bestimmung der ionischen Leitfähigkeit eine Rolle spielt, sollen die Transportphänomene über eine Bilanzierung der gesamten Zelle bestimmt werden. Ebenfalls werden hier vereinfachte Gleichungen für die Diffusionsvorgänge verwendet.

Die dynamische Energiebilanz, also das Aufwärmen der Brennstoffzelle während des Betriebs, entfällt in dieser Arbeit. Es wird davon ausgegangen, dass in der Zelle eine einheitliche Temperatur herrscht, die als Eingangsparameter dem Berechnungsmodell zugeführt wird.

Die generelle Dynamik des Modells wird über die Helmholtz Doppelschicht, bei der ein elektrisches Ersatzschaltbild zum Einsatz kommt, und die Dynamik des Verdichters, bei dem insbesondere das Trägheitsmoment des Verdichters für die zeitliche Änderung der Drehzahl und des daraus resultierenden geförderten Volumenstromes wichtig ist, modelliert.

Nun, da die hauptsächlichen Annahmen getroffen und erläutert wurden, sollen anschließend weitere Vereinfachungen aufgelistet werden:

Weitere Vereinfachungen und Annahmen

- Nichtlinear
- Elektrode hat konstante Porosität
- Gasdruck innerhalb der Elektroden ist einheitlich
- Ohm'sche Überspannung resultiert nur aus den Widerständen für ionische Leitung, elektrische Leitungswiderstände werden ignoriert
- Anodische Überspannung wird vernachlässigt
- Diffusiver Transport in den Gasverteiltern wird vernachlässigt
- Kein konvektiver Transport in den Gasdiffusionsschichten
- Katalytische Schicht ist sehr dünn: Transportvorgänge werden ignoriert und finden nur in Membran und GDL statt

In Anbetracht der aufgeführten Vereinfachungen kann ein generelles Modellschema analog zu den Arbeiten [17], [18] und [31] entwickelt werden. Der Unterschied zu dieser Arbeit ist, dass kein Supply und Return Manifold verwendet wird:

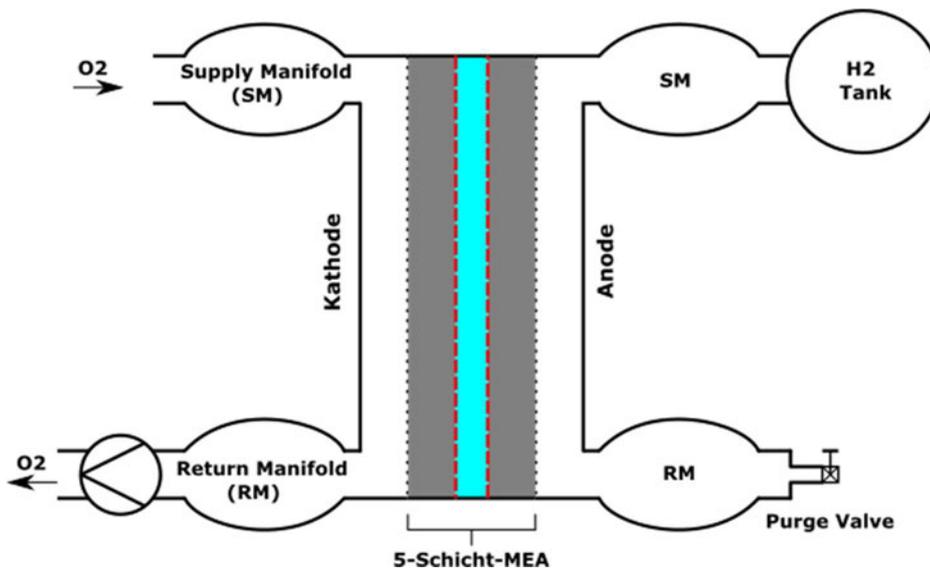


Abbildung 7: generelles Modellschema

Auf der Kathodenseite sorgt der Verdichter für die Eduktkonzentration bzw. den Gesamtdruck von Luft. An der Anode sorgt ein Wasserstofftank für den Gesamtdruck. Wie in der Einleitung geschildert dient die 100W PEMBZ von Horizon (H-100 [19]) als Vorlage. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass der Druck an der Anode konstant ist und den Hinweisen des Herstellers im Produktdatenblatt entspricht. Ausgehend von den Gesamtdrücken an den Elektroden erfolgt dann die Diffusion der Eduktgase zu den Reaktionszentren und die Transportvorgänge innerhalb der Membran. Aus diesen Beziehungen lassen sich Spannungsberechnungen für das Modell durchführen. Diese und weitere Grundgleichungen sollen nun im nächsten Kapitel umfassend behandelt werden.

4. Grundgleichungen für die dynamische Simulation

In den vorherigen Kapiteln wurden neben dem generellen Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle auch die Grundlagen für die Simulation aufgezeigt. Der eindimensionale Ansatz für die Modellierung des Stacks wurde festgelegt und zusätzliche Annahmen und Vereinfachungen konnten daraus abgeleitet werden. Bevor das Modell in einer rechnerbasierten Umgebung implementiert werden kann, müssen nun die Grundgleichungen für die dynamische Simulation festgelegt und erläutert werden. Dabei werden unter anderem die Thermodynamik von PEMBZ, die Spannungsverluste während des Betriebes, die Bilanzierung der Einzelzelle, ein Membranmodell und dynamische Betrachtungen behandelt.

4.1 Thermodynamik der PEMBZ

Wie bereits im vorherigen Abschnitt dargestellt, handelt es sich bei Brennstoffzellen um keine thermischen Maschinen, sondern um galvanische Elemente. Das heißt, dass diese die chemische Energie des Brennstoffes in elektrische Energie umwandeln. Als Maß für die Quantifizierung von Arbeit, die nicht auf der Änderung des Volumens basiert, wird in der Thermodynamik die Änderung der Freien Enthalpie ΔG verwendet. Im thermodynamischen Idealfall kann diese vollständig in Spannung, die sogenannte reversible Spannung, umgesetzt werden. Dies gilt bei Standardbedingungen (25 °C, 101325 Pa).

$$U_{rev} = \Delta E^0 = -\frac{\Delta G^0}{z F} \quad (2.1)$$

Die reversible Zellspannung (Standardbedingungen) ist die Differenz der Standard-Elektrodenpotentiale ΔE^0 . Je Mol Stoffumsatz wird eine Ladung, die dem Produkt aus der umgesetzter Elektronenanzahl z und der Faraday-Konstante F entspricht, umgesetzt. Bei wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen werden stets $z = 2$ Elektronen pro Mol transferiert. Die Enthalpie der elektrochemischen Redoxreaktion in der PEMBZ, mit Annahme von flüssigem Produktwasser, beträgt

$$\Delta G^0 = -237,13 \frac{kJ}{mol}$$

Damit folgt für die theoretische Spannungsberechnung:

$$\Delta E^0 = 1,229 V$$

Für beliebige Temperaturen und Konzentrationen (bzw. Aktivitäten), also den Abweichungen von den Standardbedingungen, gilt die sogenannte Nernst-Gleichung.

$$U_{ocv}(T, p) = \Delta E^0 - \frac{R_M T_{St}}{z F} \ln \frac{a_C^c a_D^d (Red)}{a_A^a a_B^b (Ox)} \quad (2.2)$$

Diese beschreibt die Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Temperatur des Stacks und der Aktivität der Reaktionen a . Die Aktivität kann durch die Partialdrücke und die Konzentration angegeben werden. Typische Annahmen für die Aktivität lauten wie folgt:

$$a_i = \frac{c_i}{c_N} \quad (2.3)$$

$$\text{mit } c_N = 1 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

$$a_i = \frac{p_i}{p_N} \quad (2.4)$$

$$\text{mit } p_N = 1013,25 \text{ HPa}$$

Zusätzlich wird für a_i bei Festkörpern und Lösungsmitteln der Wert 1 angenommen. [12] Dies ist von Vorteil, da in dieser Arbeit das Verhalten einer Niedertemperatur Brennstoffzelle behandelt wird. Die Reaktion bringt deshalb stets flüssiges Wasser hervor, sodass die Aktivität als 1 betrachtet werden und die Nernst-Gleichung um die Aktivität der Oxidation gekürzt werden kann. Weiterhin entspricht R_M der allgemeinen Gaskonstante. Erweitert man die Nernst-Gleichung um die Reaktionsentropie und ersetzt die Aktivitätsverhältnisse der Redoxreaktion durch das Verhältnis der Partialdrücke zu Normbedingungen, entsteht die temperatur- und druckabhängige Nernst-Gleichung: [7]

$$U_{ocv}(T, p) = \frac{\Delta G^0(T_N, p_N)}{2F} + \frac{\Delta S^0}{2F} (T_{St} - T_N) + \frac{R_M T_{St}}{2F} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{p_{O_2}}{p_N} \right) + \ln \left(\frac{p_{H_2}}{p_N} \right) \right] \quad (2.5)$$

Die Reaktionsentropie ΔS^0 ist eigentlich auch von der Temperatur anhängig. Die Änderungsrate ist jedoch so gering, dass in guter Näherung mit der Reaktionsentropie unter Standardbedingungen ($\Delta S^0(T_N, p_N) = -136,32 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$) gerechnet werden kann. [7]

4.2 Spannungsverluste

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, liefert eine PEM-Brennstoffzelle idealer Weise eine Spannung von 1,229 V. Dies ist jedoch nur theoretisch und unter der Annahme von reversiblen Vorgängen der Fall. Praktisch betrachtet verringert sich dieses Potential um einen Betrag, der auf Basis mehrerer Faktoren entsteht, wenn elektrische Energie aus der Brennstoffzelle entnommen wird. Diese Faktoren werden als irreversible Verluste betrachtet und entstehen während der elektrochemischen Vorgänge innerhalb der PEMFC. Allgemein formuliert, lautet die Gleichung für die tatsächliche Spannung einer Zelle also:

$$U_{Zelle} = U_{rev} - U_{irrev} \quad (3.1)$$

Die irreversiblen Verluste, die den Spannungsabfall von der Leerlaufspannung bewirken, setzen sich aus hauptsächlich drei Phänomenen zusammen. Diese werden auch als Überspannungen bezeichnet und sollen im Folgenden erklärt werden. Zusätzlich werden mathematische Gleichungen auf Basis der Tabelle [] aufgeführt, die später für die Implementierung in LabVIEW verwendet werden.

Reale Zellspannung

Die reale Zellspannung entsteht durch die Subtraktion der Überspannungen von der Leerlaufspannung. Diese sind die Leckageverluste U_{leck} , die Aktivierungsüberspannung U_{akt} , die Ohm'schen Verluste U_{ohm} und die Konzentrationsüberspannungen U_{kon} .

$$U_{Zelle} = U_{ocv} - U_{leck} - U_{akt} - U_{ohm} - U_{kon} \quad (3.2)$$

In der Abbildung (8) ist die Zellspannung über der Stromdichte dargestellt. Zu erkennen sind einzelnen Bereiche der Spannungsverluste, die hier mit V statt U bezeichnet werden:

- I. Aktivierungsbereich: Durchtrittsüberspannungen dominieren
- II. Arbeitsbereich: Ohm'scher Spannungsabfall durch Widerstände
- III. Grenzstrombereich: Limitierung durch Stofftransport

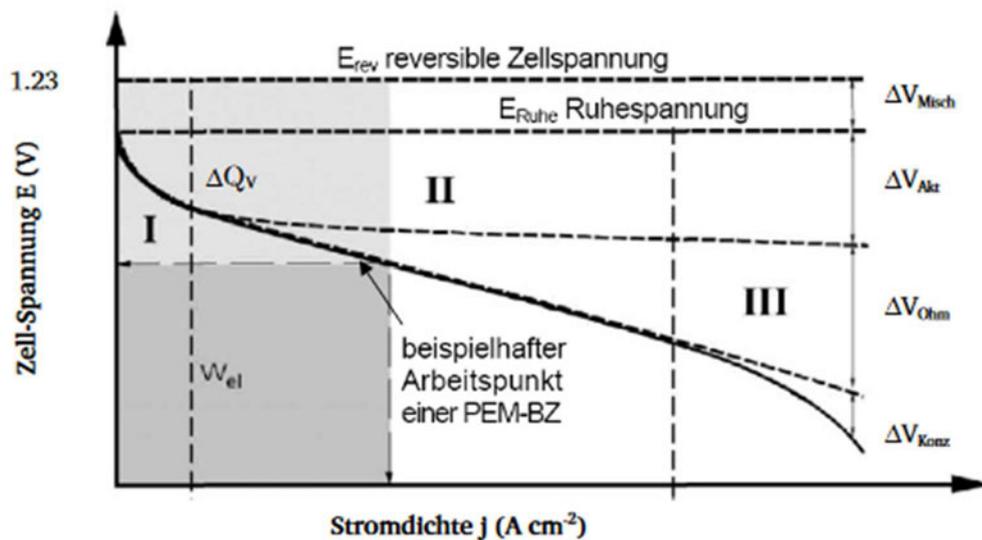


Abbildung 8: typischer Strom-Spannungs-Verlauf von PEMBZ [5]

Im Folgenden sollen die einzelnen Spannungsverluste nun genau erläutert und Ansätze zur mathematischen Beschreibung der Vorgänge aufgezeigt werden.

4.2.1 Leckageverluste

Im stromlosen Zustand erreicht eine Brennstoffzelle nicht die reversible Zellspannung von 1,229 V. Die Ursache hierfür liegt in der Ausbildung eines Mischpotentials. Dieses beinhaltet mehrere Effekte, die für den Spannungsverlust verantwortlich sind. Obwohl die Polymerelektrolytmembran gasdicht sein sollte, also nur den Transport von Wasserstoffionen ermöglichen sollte, diffundieren kleine Mengen der Reaktionsgase H_2 und O_2 durch die Membran zur jeweils gegenüberliegenden Elektrode. Auch Elektronen können durch die Membran zur Kathode wandern, und nicht den gewünschten Weg durch den äußeren Stromkreis nehmen. [5]

Im Betrieb wird Sauerstoff an der Kathode reduziert und gleichzeitig Verunreinigungen, Kohle und Platin oxidiert. Der Wirkungsgradverlust beträgt daher zwischen 8 – 16 %. [1] Da diese Effekte schon im Ruhezustand (siehe Abbildung (8)) auftreten, werden sie für die dynamischen Berechnungen irrelevant.

4.2.2 Aktivierungsverluste

Die Aktivierungsverluste oder Aktivierungsüberspannungen entstehen durch die Kinetik der elektrochemischen Reaktionen. Sowohl an Kathode als auch an der Anode geht eine gewisse Spannungsdifferenz zur Leerlaufspannung verloren, um eine Aktivierungsbarriere zu überwinden. Diese Barriere ist maßgeblich mit den elektrochemischen Reaktionen verbunden. [5] Erst nach der Aufwendung der nötigen Energie können Ladungsträger (Protonen und Elektronen) eine Phasengrenze (z.B. Elektrode-Elektrolyt) überwinden. [7]

Die Spannungsdifferenz im Aktivierungsbereich wird auch als Durchtrittsüberspannung bezeichnet, da sie beim Ladungsdurchtritt entsteht. Sie beschreibt die Geschwindigkeit des Elektronen- und Protonenübergangs von Wasserstoff (Brennstoff) und Sauerstoff (Oxidationsmittel) an die Elektroden. [1] Dieses Phänomen wird an beiden Elektroden beobachtet. An der Anode läuft die Wasserstoff-Oxidations-Reaktion (WOR) ab. Diese ist relativ einfach und beinhaltet unter anderem den Antransport des Wasserstoffes, die Chemiesorption an der Elektrodenoberfläche und die Aufspaltung in positiv geladene Wasserstoffionen und negativ geladene Elektronen. Durch die Einfachheit der Reaktion kann die Elektrodenkinetik schnell ablaufen. Im Gegensatz hierzu steht die an der Kathode ablaufende Sauerstoff-Reduktions-Reaktion (SRR). Diese beinhaltet deutlich mehr Teilschritte als die WOR und weist zusätzlich signifikante molekulare Reorganisationen auf. Aus diesem Grund läuft die SRR deutlich langsamer ab. Die Geschwindigkeit ist dabei relevant, da die Gesamtreaktion vom langsamsten Teilschritt bestimmt wird. Die Höhe der Aktivierungsverluste verhält sich proportional zur Geschwindigkeit der Reaktion. Aus diesem Grund kann in den meisten Fällen die anodische Aktivierungsüberspannung vernachlässigt werden, da diese bei Niedertemperatur-Brennstoffzellen deutlich kleiner als die Verluste durch Aktivierungsüberspannungen an der Kathode ausfallen. [21] Die Gesamtaktivierungsüberspannung wird bei PEM-Brennstoffzellen demnach von der Kinetik der Sauerstoffelektrode (Kathode) dominiert. [1] In dieser Arbeit soll als Vereinfachung der Gleichungen die anodische Überspannung vernachlässigt werden.

Die Aktivierungsüberspannung ist zusätzlich stark temperaturabhängig [1] und es gilt, je höher die Austauschstromdichte, desto niedriger fallen die Verluste aus. [5] Wie in der Abbildung (8) zu erkennen, ist der Aktivierungsbereich demnach für kleine Stromdichten dominant.

Eine quantitative Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Aktivierungsüberspannung und der Stromdichte liefert die Butler-Volmer-Gleichung:

$$i = i_0 \left[\exp \left(\frac{(1 - \alpha)zF}{R_M T_{St}} U_{akt} \right) - \exp \left(\frac{-\alpha zF}{R_M T_{St}} U_{akt} \right) \right] \quad (3.3)$$

In der Gleichung steht i für die Stromdichte und i_0 für die Austauschstromdichte. Der sogenannte Durchtrittsfaktor α liegt in einem Wertebereich von $0 < \alpha < 1$, und nimmt für die meisten Kathodenmaterialien 0,5 an. [7]

Wie bereits erwähnt, kann die anodische Überspannung vernachlässigt werden. Dies ist der Fall, da die Austauschstromdichte deutlich höher (\rightarrow Durchtrittsüberspannung geht gegen Null) an der Anode als an der Kathode ist. Für kleine U_{akt} vereinfacht sich die Gleichung zu einer linearen Funktion, während für große U_{akt} die Gleichung in die Tafel-Gleichung überführt werden kann: [7]

$$U_{akt} = \frac{R_M T_{St}}{\alpha zF} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) = a + b \ln(I) \quad (3.4)$$

Die Austauschstromdichte wird meistens empirisch bestimmt. Aus diesem Grund soll hier aus Quelle [21] ein Wert für i_0 übernommen werden, der typischer Weise bei NT-PEMBZ auftritt. Dieser ist in Tabelle (4) in Kapitel 5.2 aufgelistet, die alle Parameter und Eingangsgrößen des Modells zusammenfasst.

4.2.3 Ohm'sche Verluste

Der Ohm'sche Spannungsabfall entsteht durch den Transport von Ladung. Der Ladungstransport beschreibt im Gegensatz zum Massentransport, bei dem die Bewegung von ungeladenen Teilchen relevant ist, die Bewegung von geladenen Teilchen. Im System der Brennstoffzellen gibt es dabei zwei Arten von Ladungsträgern. Durch die festen Bestandteile der Brennstoffzelle, wie z.B. die Kontaktplatten oder die Gasdiffusionsschichten, und durch die sonstigen Leiter werden Elektronen transportiert. In der Membran, die bei PEMBZ aus Polymeren besteht, werden Ionen transportiert. Dabei ist jeder Bewegung ein Widerstand entgegengesetzt. Das heißt, dass durch den Transport von Elektronen durch die Elektroden und den Transport von Ionen im Elektrolyten ein Verlust entsteht, der sich in der Spannungsabgabe der Zelle bemerkbar macht. [22]

Hierbei ist der Ladungsfluss der Ionen deutlich widerstandsbehafteter, da mit diesem ein größerer Massenumsatz einhergeht. Die Ohm'schen Verluste resultieren also größtenteils aus den Widerständen der ionischen Leitung. [5] Aus diesem Grund sollen in dem entwickelten Modell die elektrischen Verluste vernachlässigt werden.

Diese Verluste können durch das Ohm'sche Gesetz beschrieben werden. Wie in der Abbildung (8) zu erkennen ist, nimmt der Spannungsabfall im Arbeitsbereich einen linearen Verlauf an.

$$U_{ohm} = I R_i \quad (3.5)$$

Hierbei steht i für die Stromdichte und R_i für den Gesamtwiderstand. Dieser setzt sich aus den Widerständen der ionischen Leitung R_{ion} und der elektrischen Leitung R_{elek} zusammen.

$$R_i = R_{elek} + R_{ion} \quad (3.6)$$

Mit $R_{elek} = R_{Leiter} + R_{Kontakt} \quad (3.7)$

Wenn R_{elek} vernachlässigt wird, muss für die Verluste durch Ladungstransport lediglich der ionische Widerstand bestimmt werden.

$$R_{ion} = \frac{l_{mem}}{A \sigma} \quad (3.8)$$

Dieser ist maßgeblich von der Dicke l_{mem} der Membran, der aktiven Fläche A der Einzelzelle und der Leitfähigkeit der Membran σ abhängig. Die Leitfähigkeit der Membran ist abhängig vom Wassergehalt. Deshalb wird in Kapitel 4.4 ein Membranmodell beschrieben, das umfassend die Leitfähigkeit der Membran bestimmt.

4.2.4 Verluste durch Transportlimitierung

Im dritten und letzten Bereich der Abbildung (8) knickt die Kennlinie bei hohen Stromdichten ab. Die Ursache hierfür ist die Limitierung durch den Stoffmengentransport. Wenn die Reaktionsgase schneller verbraucht werden als sie zu den Reaktionszentren gelangen oder das entstehende Produktwasser nicht schnell genug abtransportiert wird, tritt ein Spannungsverlust U_{kon} auf. Der Stoffmengentransport im Brennstoffzellensystem basiert dabei auf zweierlei Prinzipien. Dies ist der Transport durch Konvektion, der vermehrt in den Gaskanälen der Elektroden auftritt, und Transport durch Diffusion, der in der Membran und in den Gasdiffusionsschichten auftritt. Die mathematische Beschreibung der Konvektion in den Gasverteilern gilt als komplex, deswegen soll hier lediglich die eindimensionale diffusive Bewegung der Produkte und Edukte durch die Schichten der Brennstoffzelle bestimmt werden. Das Kapitel 4.4 beschäftigt sich eingehend mit den Transportvorgängen innerhalb der Membran. Für die Konzentrationsverluste sind aber besonders die Diffusionsvorgänge durch die Gasdiffusionsschichten von Bedeutung. Diese können unter Verwendung des Fickschen Gesetzes approximiert werden, welches für ein binäres System aus zwei Gasen gültig ist. [21, 22]

$$J_i = -D_{i,j} \frac{dc_i}{dx} \quad (3.9)$$

Und

$$J_j = -D_{j,i} \frac{dc_j}{dx} \quad (3.10)$$

Der Fluss einer Spezies i (bzw. j) wird durch die binäre Diffusivität $D_{i,j}$ und dem Konzentrationsgradienten $\frac{dc_i}{dx}$ bestimmt. Dabei gilt, dass die Summe der Ströme der beteiligten Gase gleich null ist:

$$J_j + J_i = 0 \quad (3.11)$$

Daraus folgt

$$D_{i,j} = D_{j,i} \quad (3.12)$$

Die binäre Diffusivität ist eine Funktion der Temperatur, des Druckes und den molaren Massen der Spezies i und j . Diese kann aus der folgenden Gleichung bestimmt werden: [21]

$$p D_{i,j} = a \left(\frac{T}{\sqrt{T_{ci} T_{cj}}} \right)^b (p_{ci} p_{cj})^{\frac{1}{3}} (T_{ci} T_{cj})^{\frac{5}{12}} \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

Hier ist p der Gesamtdruck an der Elektrode, T die Temperatur und M die molare Masse. Die Indizes ci bzw. cj stehen für die kritischen Temperaturen und Drücke. In Anhang B können die zugehörigen Werte für die beteiligten Gase aus einer Tabelle entnommen werden.

Für die Annahme eines statischen Zustands kann das Ficksche Gesetz in folgende Gleichung überführt werden:

$$J_{diff} = -D_{i,j}^{eff} \frac{c_R^* - c_R^G}{\delta} \quad (3.14)$$

Hier steht δ für die Dicke der Gasdiffusionsschicht, c_R^* für die Konzentration des Reaktanden in der katalytischen Schicht, c_R^G für die Konzentration im Gaskanal und $D_{i,j}^{eff}$ für den effektiven

Diffusionskoeffizienten. Dieser kann aus dem binären Diffusionskoeffizienten mit der Porosität der Elektrode ε aus der folgenden Beziehung bestimmt werden, die auch als Bruggeman Korrektur bekannt ist:

$$D_{i,j}^{eff} = \varepsilon^{1,5} D_{i,j} \quad (3.15)$$

Mit dem idealen Gasgesetz ($p_i = c R T$) können zusätzliche Umformungen vorgenommen werden, um die unhandlichen Konzentrationen durch Drücke zu ersetzen.

$$J_i = - \frac{p_{ges} D_{i,j}^{eff}}{R T} \frac{dx_i}{dx} \quad (3.16)$$

Hier stehen p für den Gesamtdruck an der Elektrode, der an der Kathode maßgeblich durch den Verdichter beeinflusst wird, R für die Gaskonstante, T für die Temperatur und x_i für das Stoffmengenverhältnis. Es gilt:

$$x_i = \frac{p_i}{p_{ges}} \quad (3.17)$$

Um nun die Konzentrationsverluste zu bestimmen, wird aus der Nernst- Gleichung die folgende Beziehung abgeleitet: [21]

$$U_{con} = \frac{RT}{zF} \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{i_{lim}}{i_{lim} - i} \right) \quad (3.18)$$

Bzw.

$$U_{con} = - \frac{RT}{zF} \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \ln \left(1 - \frac{i}{i_{lim}} \right) \quad (3.19)$$

Dabei ist α der Durchtrittsfaktor. Dieser spielt bei den Konzentrationsverlusten eine Rolle, da bei schwankender Eduktkonzentration in der katalytischen Schicht ebenfalls die Reaktionskinetik der Brennstoffzelle beeinflusst wird. i_{lim} ist die sogenannte Grenzstromdichte. Bei dieser ergibt sich eine Zellspannung von null, wenn an der Reaktionsoberfläche die Eduktkonzentration c_R^* auf null sinkt. Die Grenzstromdichte stellt also die maximale Stromdichte dar, bei der eine Brennstoffzelle betrieben werden kann. [21] Sie wird unter anderem durch geometrische sowie Strömungs- und Diffusionseigenschaften beeinflusst und ist mit dem Faraday Gesetz aus Gleichung (3.14) abgeleitet:

$$i_{lim} = z F D_{i,j}^{eff} \frac{c_R^G}{\delta} \quad (3.20)$$

4.2.5 Berechnung der Gesamtspannung

Führt man alle Spannungsverluste und die reversible Zellspannung zusammen, so lässt sich die folgende Gleichung aufstellen:

$$U_{Zelle} = U_{ocv} - U_{akt} - U_{kon} - U_{ohm} \quad (3.21)$$

Mit den aufgeführten Gleichungen für die Spannungsverluste kann daraus die Berechnung der Gesamtspannung erfolgen. Wichtig hierbei zu beachten ist, dass diese das Spannungsverhalten einer Einzelzelle widerspiegelt.

$$U_{Zelle} = U_{ocv} - \frac{R_M T_{St}}{z\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) - \frac{R_M T_{St}}{zF} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \ln\left(\frac{i_{lim}}{i_{lim} - i}\right) - i R_i \quad (3.22)$$

Um nun die Gesamtspannung des Brennstoffzellenstacks zu erhalten, wird die Spannung der Einzelzelle mit der Anzahl der Zellen multipliziert. Wie in Kapitel 2 aufgeführt werden die Einzelzellen seriell bzw. in Reihe geschaltet, sodass die Gesamtspannung durch die Summe der Einzelspannungen bestimmt wird.

$$U_{Stack} = N U_{Zelle} \quad (3.21)$$

Weil mit der Gleichung (3.21) die Gesamtspannung des Stacks bekannt ist, kann über die einfache Beziehung

$$P = U_{Stack} \cdot I \quad (3.22)$$

die Leistungsabgabe der Zelle berechnet werden.

Mit Gl. (3.21) eingesetzt in (3.22) folgt daraus:

$$P = N U_{Zelle} I \quad (3.23)$$

4.3 Bilanzierung der Brennstoffzelle

In diesem Abschnitt soll, da die generellen Gleichungen für die Berechnung der Stackspannung aufgestellt wurden, der Massentransport der Gase und des Wassers im System der Brennstoffzelle behandelt und bilanziert werden. Hierfür werden zuerst allgemeine Bilanzen der verschiedenen Gase, die sich an den elektrochemischen Reaktionen beteiligen, aufgestellt. Diese werden für das Gesamtsystem der Brennstoffzelle, also der Kombination der Flüsse in Kathode, Anode und Membran, betrachtet. Aus den einzelnen Flüssen wird dann eine Gleichung, die alle Komponenten miteinander verbindet, abgeleitet. Dabei werden alle Beziehungen nach dem Prinzip der Massenerhaltung, der Ladungserhaltung und der Spezieserhaltung entwickelt. Eintretende Ströme müssen gleich der austretenden Ströme sein. [21]

Zuerst soll die generelle Bilanz der Zelle, wie in Abbildung (9) zu sehen, aufgestellt werden. Hier ist die Leistung mit den grundlegenden Massenströmen verknüpft. In das System der PEMBZ treten die Edukte Wasserstoff und Sauerstoff ein. Als Produkt entsteht Wasser und es kann eine elektrische Leistung entnommen werden. [13]

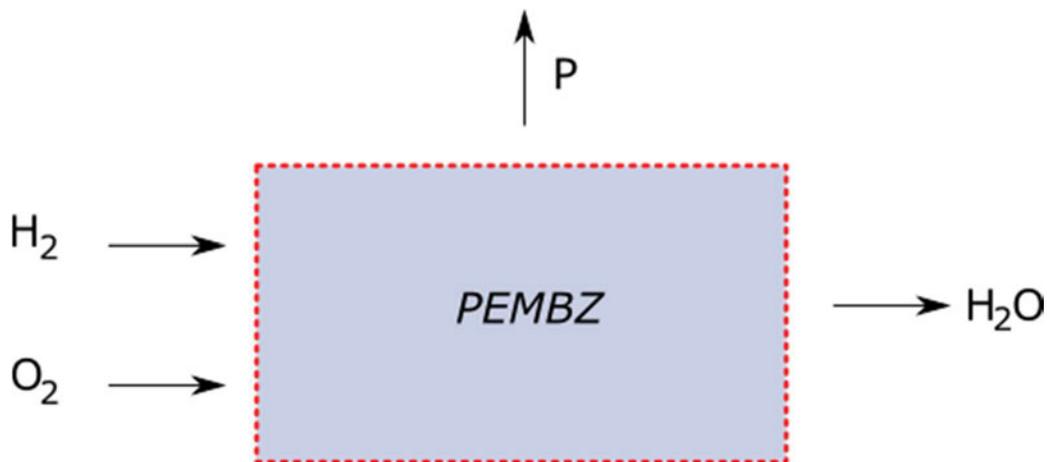


Abbildung 9: generelle Bilanz einer H₂-O₂-Brennstoffzelle

Mathematisch kann dies in die folgende Gleichung überführt werden, wenn von einer adiabaten Zelle ausgegangen wird:

$$\dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{air} = P_{elek} + \dot{m}_{H_2O} \quad (4.1)$$

mit

$$P_{elek} = N U_{Zelle} I \quad (4.2)$$

Die Leistung des Systems kann außerdem durch das Produkt von dem fließenden Strom und der gesamten Zellspannung beschrieben werden. Die Gesamtspannung setzt sich, wie bereits erläutert, aus dem Produkt der Spannung der Einzelzelle und der Anzahl der in Reihe geschalteten Zellen zusammen. [13]

$$I N = \frac{P_{Zelle}}{U_{Zelle}} \quad (4.3)$$

Flussbilanz der PEMBZ

Betrachtet man die einzelnen Flüsse im Brennstoffzellensystem, so wird schnell klar, dass diese Betrachtung deutlich komplexer als die vorherige generelle Bilanz ist. In Abbildung (10) sind alle relevanten Stoffströme dargestellt und nummeriert, um für eine bessere Übersicht zu sorgen. Wichtig ist in diesem Fall die Modellannahme, dass die Kathode nicht mit reinem Sauerstoff, sondern mit Luft versorgt wird. Dies hat, wie später bei der Simulation deutlich werden soll, große Auswirkungen auf sowohl die Spannung des Stacks wie auch die damit verbundene Leistung.

Luft soll hier als Gemisch von dreierlei Gasen angesehen werden. Diese sind Sauerstoff, Stickstoff und Wasserdampf. Wie aus den Vereinfachungen in Kapitel 3 hervorgeht, soll Wasser nur als dampfförmiges Gas bilanziert werden. Auch wenn das in der Kathode entstehende Produktwasser bei Niedertemperatur-Brennstoffzellen flüssig ist, wird angenommen, dass dieses verdunstet. Eine weitere Schwierigkeit stellt der in der Luft enthaltene Stickstoff dar. Denn die Gleichung zur Beschreibung von Diffusion aus Kapitel 4.3.4 sind nur für ein binäres System, also mit zweierlei Gaskomponenten gültig. Aus diesem Grund wird der Stickstoff, der nicht an der Reaktion oder sonstigen Mechanismen wie der Leitfähigkeiten beteiligt ist, nicht mit in die Bilanz miteinbezogen. Dieser beeinflusst jedoch maßgeblich den Partialdruck von Sauerstoff in der Luft, was Auswirkungen auf die Reaktionskinetik und Stofftransportlimitierungen hat. [21]

Zusätzlich werden hier nicht die Massenströme bilanziert, sondern die molaren Stoffströme. Beide sind durch das ideale Gasgesetz miteinander verbunden. Als Formelzeichen für einen molaren Fluss wird der Buchstabe J verwendet. Die Einheit lautet $\left[\frac{\text{mol}}{\text{s cm}^2}\right]$

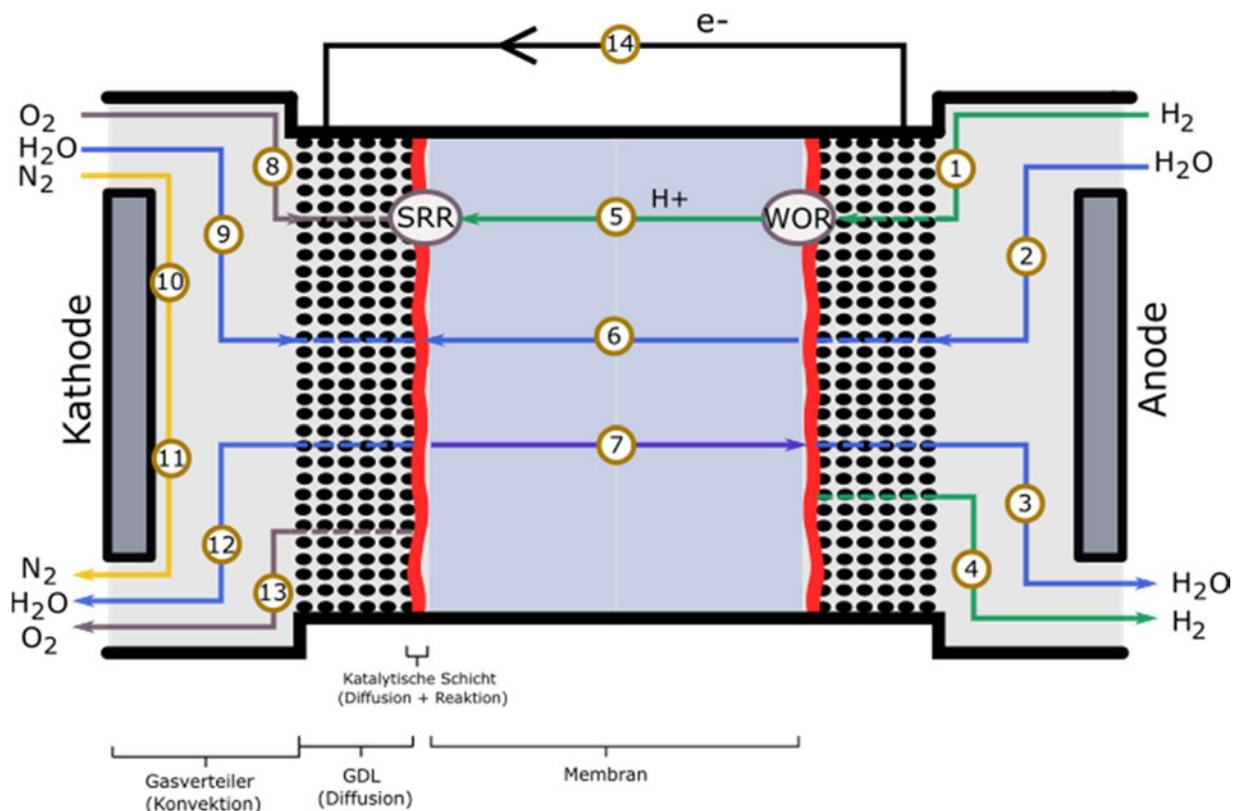


Abbildung 10: Flussbilanz der PEMBZ

Die folgende Tabelle fasst zusammen, wie die in Abbildung (10) dargestellten Flüsse mit den Nummerierungen und den für die nachfolgenden Bilanzen wichtigen Formelzeichen zusammenhängen.

Nummer	Formelzeichen	Beschreibung
1	$J_{H_2, ein}^A$	Einströmender Wasserstoff an der Anode
2	$J_{H_2O, ein}^A$	Einströmendes Wasser an der Anode
3	$J_{H_2O, aus}^A$	Ausströmendes Wasser an der Anode
4	$J_{H_2, aus}^A$	Ausströmender Wasserstoff an der Anode
5	$J_{H^+}^M$	Ladungstransport der Wasserstoffionen durch die Membran
6	$J_{H_2O, drag}^M$	Elektroosmotischer Transport von Wasser in der Membran
7	$J_{H_2O, Rück}^M$	Rückdiffusion von Wasserdurch Konzentrationsunterschiede in der Membran
8	$J_{O_2, ein}^K$	Einströmender Sauerstoff an der Kathode
9	$J_{H_2O, ein}^K$	Einströmendes Wasser an der Kathode
10	$J_{N_2, ein}^K$	Einströmender Stickstoff an der Kathode
11	$J_{N_2, aus}^K$	Ausströmender Stickstoff an der Kathode
12	$J_{H_2O, aus}^K$	Ausströmendes Wasser an der Kathode
13	$J_{O_2, aus}^K$	Ausströmender Sauerstoff an der Kathode
14	J_{e^-}	Ladungstransport der Elektronen durch den äußeren Stromkreis

Tabelle 2: Zusammenhang der Nummerierung und der Formelzeichen für die Flussbilanz

Aus Abbildung (10) kann die erste Bilanz gewonnen werden:

$$J_{14} = J_5 = J_1 - J_4 = J_8 - J_{13} \quad (4.4)$$

Diese sagt aus, dass die Stromdichte (14) gleich dem Protonenfluss durch die Membran (5) sein muss. Beide Flüsse sind gleich mit dem Wasserstofffluss in der Anode, welcher gleich dem Sauerstofffluss in der Kathode ist. [21]

Mathematisch mit den Formelzeichen aus Tabelle (2) wird dies zu

$$J_{e^-} = J_{H^+}^M = J_{H_2, ein}^A - J_{H_2, aus}^A = J_{O_2, ein}^K - J_{O_2, aus}^K \quad (4.5)$$

Mit dem Faraday Gesetz und der Zusammenfassung von Ein- und Austritt an Kathode und Anode kann die Gleichung umgeformt werden.

$$\frac{i}{2F} = \frac{i_{H^+}}{2} = J_{H_2}^A = 2J_{O_2}^K = S_{H_2O}^K \quad (4.6)$$

Hier steht i für die Stromdichte, F für die Faradaykonstante, $J_{H_2}^A$ für den Gesamtfluss des Wasserstoffes an der Anode und $J_{O_2}^K$ für den Gesamtfluss von Sauerstoff an der Kathode. $S_{H_2O}^K$ beschreibt die Rate, mit der Wasser an der Kathode generiert wird. Diese ist ebenfalls gleich dem Gesamtfluss des Wasserstoffes, da mit jedem Mol H^+ , das verbraucht wird, ein Mol Wasser produziert wird. [21]

Wasserbilanz:

Nicht zu vernachlässigen ist die nachfolgende Wasserbilanz des Systems, welche ebenfalls erfüllt sein muss. Im späteren Kapitel zum Membranmodell für die Brennstoffzelle wird deutlich, wie wichtig der Wasserhaushalt in Bezug auf Leitfähigkeit und dem damit einhergehenden ionischen Widerstand ist.

$$J_2 - J_3 = J_6 - J_7 = J_{12} - J_9 - J_5 \quad (4.7)$$

Die Gleichung beschreibt, dass der Gesamtfluss des Wassers in der Anode gleich dem Fluss durch die Membran sein muss. Der Transport von Wasser in der Membran setzt sich aus dem elektroosmotischen Transport und der Rückdiffusion von Wasser zusammen. Nähere Betrachtungen werden im Kapitel 4.4 aufgeführt, welches sich mit der Entwicklung des Membranmodells beschäftigt. Beide Flüsse in Membran und Anode müssen gleich des in der Kathode umgesetzten Wassers sein. Wichtig ist hierbei das Miteinbeziehen des Produktwassers der kathodenseitigen Reaktion. Die Nummerierung kann auch hier unter Verwendung der Tabelle (2) ersetzt werden:

$$J_{H_2O}^A = J_{H_2O}^K = J_{H_2O}^{Mem} \quad (4.8)$$

mit

$$J_{H_2O}^A = J_2 - J_3 \quad (4.9)$$

$$J_{H_2O}^K = J_{12} - J_9 - J_5 \quad (4.10)$$

$$J_{H_2O}^{Mem} = J_6 - J_7 \quad (4.11)$$

Mathematisch ausgedrückt wird daraus analog zur Bilanz der non-polaren Gase:

$$J_{H_2O}^A = J_{H_2O}^K - \frac{i}{2F} = J_{H_2O}^{Mem} \quad (4.12)$$

Hierbei wird das kathodenseitig entstehende Wasser durch das Faraday Gesetz $J = \frac{i}{2F}$ beschrieben. An dieser Stelle soll nun ein unbekannter Faktor β eingeführt werden. Dieser steht für das Verhältnis zwischen Wasserfluss und Ladungsfluss durch die Membran.

$$\beta = \frac{J_{H_2O}^{Mem}}{\frac{i}{2F}} \quad (4.13)$$

Mit diesem Faktor β kann nun die Gleichung (4.12) in folgenden Ausdruck umgeschrieben werden:

$$J_{H_2O}^K = \frac{i}{2F} (1 + \beta) \quad (4.14)$$

Nun, da alle einzelnen Flüsse und Beziehungen dargelegt wurden, können diese in der beherrschenden Gleichung für das Modell zusammengeführt werden. Besonders der Faktor β und die Stromdichte i tragen zur Verbindung der einzelnen Ausdrücke bei.

$$\frac{i}{2F} = \frac{J_{H^+}^M}{2} = J_{H_2}^A = 2J_{O_2}^K = \frac{J_{H_2O}^A}{\beta} = \frac{J_{H_2O}^{Mem}}{\beta} = \frac{J_{H_2O}^K}{\beta} \quad (4.15)$$

4.4 Membranmodell

Bei PEM-Brennstoffzellen ist, wie schon im Kapitel zu den Ohm'schen Verlusten erwähnt, die Leitfähigkeit der Elektrolytmembran ausschlaggebend für die Berechnung der Verluste durch Ladungstransport. Auf Grund dieser Tatsache soll nun in diesem Kapitel die Leitfähigkeit der Membran bestimmt werden. Diese ist bei Nafion-Membranen, welche häufig für PEMBZ verwendet werden, hauptsächlich vom Wasserhaushalt und der Temperatur abhängig. Das Wasser in der Membran sorgt dafür, dass Wasserstoffionen durch die Verbindung mit H_2O zu Hydroxidionen von der Anode zur Kathode transportiert werden. Dieser Transport weist zwei grundlegende Mechanismen auf. Zum einen ist dies der elektroosmotische Transport, bei dem Protonen ein oder mehrere Wassermoleküle mit zur Kathode bewegen. Zum anderen ist dies die Rückdiffusion. Hier gelangt das Wasser durch Konzentrationsgefälle zurück zur Anodenoberfläche. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass der Wassergehalt über die Dicke der Membran variiert. An der Kathodenseite, auch besonders durch das durch die Reaktion entstehende Produktwasser, finden sich dabei deutlich mehr Wassermoleküle als an der Anodenseite der Membran. [21]

Bei der Bestimmung der Leitfähigkeit der Membran ist es deshalb von großer Wichtigkeit, den Transport des Wassers in der Brennstoffzelle und den damit einhergehenden Wassergehalt der Membran zu modellieren. Aus Kapitel 4.2.3 ging hervor, dass

$$R_{ion} = \frac{l_{mem}}{A \sigma [T, \lambda]} \quad (5.1)$$

Hierbei ist R_{ion} der Widerstand der ionischen Leitung innerhalb der Membran. Dieser wird durch das Verhältnis der Dicke der Membran l_{mem} zum Produkt aus aktiver Membranfläche A und Leitfähigkeit σ berechnet. Die Leitfähigkeit soll hier nach Vorlage wie in der Quelle [21] mit empirischen Werten bestimmt werden. Wie bereits erwähnt, variiert der Wassergehalt der Membran in Abhängigkeit der Entfernung zu den Elektroden.

$$\lambda = \lambda(x) \quad (5.2)$$

Aus diesem Grund soll nun eine Variable x eingeführt werden, die ausgehend von der Anodenseite (A) der Membran bei $x(0)$ bis zur Kathodenseite (K) bei $x(l_{mem})$ verläuft.

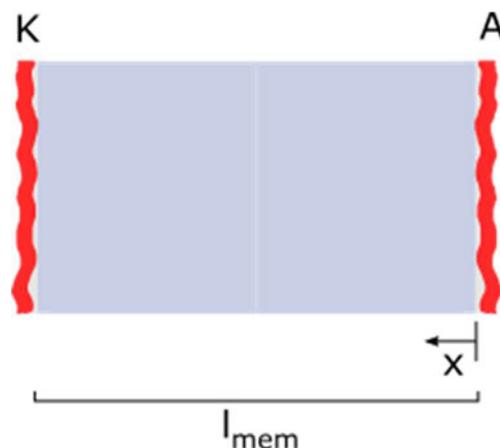


Abbildung 11: Ortsvariable des Membranmodells

Das Integral über die Dicke der Membran liefert den Gesamtwiderstand.

$$R_{ion} = \frac{1}{A} \int_{x=0}^{x=l_{mem}} \frac{dx}{\sigma [T, \lambda]} \quad (5.3)$$

Die Leitfähigkeit kann über folgende Beziehung bestimmt werden:

$$\sigma (T, \lambda) = (0,005193 \lambda - 0,00326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5.4)$$

Um den Wassergehalt in Abhängigkeit des Ortes zu bestimmen, muss die vorher aufgestellte Wasserbilanz der Membran aufgelöst werden. Wie aufgeführt, setzt sich der Wassertransport J_{H_2O} in der Membran aus den zwei Phänomenen Rückdiffusion und elektroosmotischer Transport zusammen. Als Indize soll der Einfachheit halber für letzteren $J_{H_2O,drag}$ aus dem Englischen übernommen werden.

$$J_{H_2O,drag} = 2 n_{drag}^{sat} \frac{i \lambda}{2 F 22} \quad (5.5)$$

Bei dem elektroosmotischen Transport spielt der elektroosmotische Koeffizient n_{drag}^{sat} , die Stromdichte i , die Valenzzahl $z = 2$, die Faraday Konstante F , und der Wassergehalt λ eine Rolle. n_{drag}^{sat} kann hier mit dem Wert 2,5 approximiert werden.

$$J_{H_2O,Rückdiffusion} = - \frac{\rho_{tr}}{M_m} D_\lambda \frac{d\lambda}{dx} \quad (5.6)$$

Bei der Rückdiffusion fallen die Dichte der Membran in trockenem Zustand ρ_{tr} , das äquivalente Gewicht von Nafion M_m und die Diffusivität von Wasser in einer Nafion Membran D_λ ins Gewicht, um Transport und Wassergehalt zu verbinden. Durch Zusammenführen der beiden Anteile ergibt sich für den Transport des Wassers innerhalb der Membran:

$$J_{H_2O}^{Mem} = 2 n_{drag}^{sat} \frac{i \lambda}{2 F 22} - \frac{\rho_{tr}}{M_m} D_\lambda \frac{d\lambda}{dx} \quad (5.7)$$

$$J_{H_2O}^{Mem} = \beta \left(\frac{i}{2 F} \right) \quad (5.8)$$

Durch Integration über die Ortsvariable dx erhält man den vom Ort abhängigen Wassergehalt $\lambda(x)$.

$$\lambda(x) = \frac{11 \beta}{n_{drag}^{sat}} + C \exp \left(\frac{i M_m n_{drag}^{sat}}{22 F \rho_{tr} D_\lambda} x \right) \quad (5.9)$$

C ist die Integrationskonstante, die später aus den Randbedingungen zusammen mit β bestimmt werden muss. Nun kann die Gleichung für den Wassergehalt sowohl an der Anode für $x = 0$ und an der Kathode für $x = l_{mem}$ aufgestellt werden:

$$\lambda_A = \lambda(x = 0) = 4,4 \beta + C \quad (5.10)$$

$$\lambda_K = \lambda(x = l_{mem}) = 4,4 \beta + C \exp \left(\frac{i M_m n_{drag}^{sat}}{22 F \rho_{tr} D_\lambda} l_{mem} \right) \quad (5.11)$$

Um nun C und β zu bestimmen, werden an dieser Stelle neben den Randbedingungen drei weitere Vereinfachungen eingeführt, um die Berechnung zu erleichtern. Bei den Randbedingungen handelt es sich um die Proportionalität zwischen Feuchtegehalt der Membran und der Aktivität des Wassers an der jeweiligen Kathode.

Die Aktivität von Wasser ist dabei grundsätzlich abhängig vom Partialdruck bezogen auf den Sättigungsdruck von Wasser.

$$a_W = \frac{p_W}{p_{SAT}} \quad (5.12)$$

Mit dem Sättigungsdruck, der eine Funktion der Temperatur ϑ (in Grad Celsius) ist:

$$p_{SAT} = 10^{-2,1794 + 0,02953 \vartheta - 9,1837 \cdot 10^{-5} \vartheta^2 + 1,4454 \cdot 10^{-7} \vartheta^3} \quad (5.13)$$

Ersetzt man den Partialdruck durch das Produkt von Gesamtdruck an der Elektrode und Stoffmengenverhältnis, kann die Gleichung dann in folgenden Ausdruck überführt werden:

$$a_W = \frac{p_{H_2O}}{p_{SAT}} = \frac{x_{H_2O} p_{ges}}{p_{SAT}} \quad (5.14)$$

Das Stoffmengenverhältnis x_{H_2O} soll mit Verwendung der Diffusionsgleichung (3.16) aus Kapitel 4.2.4 als Differenz zwischen molarem Verhältnis im Gaskanal und molarem Verhältnis am Reaktionszentrum berechnet werden. Mit der binären Fickschen Diffusion kann dabei das Stoffmengenverhältnis in der katalytischen Schicht ($x_{H_2O,R}$) bestimmt werden. Der Anteil im Gaskanal ($x_{H_2O,G}$) soll hier als Eingangsparameter behandelt werden.

$$x_{H_2O} = x_{H_2O,G} - x_{H_2O,R} \quad (5.15)$$

Dies führt zu der ersten der drei weiterführenden Annahmen. Normalerweise ist der Wassergehalt in einer Nafion-Membran eine nichtlineare Funktion der Wasseraktivität. Hier soll dieser Zusammenhang aber linearisiert werden.

1. Der Wassergehalt steigt linear mit der Wasseraktivität. Dabei gilt:

$$\lambda = 14 a_W \quad \text{für } 0 < a_W \leq 1$$

$$\lambda = 12,6 + 1,4 a_W \quad \text{für } 1 < a_W \leq 3$$

In direkter Verbindung mit der ersten Vereinfachung steht die zweite Annahme. Da an der Kathode durch die elektrochemische Reaktion Wasser produziert wird und zusätzlich durch den elektroosmotischen Transport Wasser durch die Membran zur Kathode gelangt, soll hier von einer Wasseraktivität ausgegangen werden, die größer als 1 beträgt. Analog wird davon ausgegangen, dass an der Anode, an der sich nur durch die Rückdiffusion von Wassermolekülen durch die Membran oder durch die Befuchtung des zugeführten Eduktgases Wasser ansammelt, die Wasseraktivität unter 1 liegt.

2. a_W an der Kathode ist > 1 ; a_W an der Anode ist < 1

Hieraus können nun die Randbedingungen entwickelt werden:

Wassergehalt an der Anode

$$\lambda_A = 14 a_{W,A} \quad (5.16)$$

$$= 14 \frac{x_{H_2O}^A p_A}{p_{SAT}}$$

$$\lambda_A = 14 \frac{p_A}{p_{SAT}} \left(x_{H_2O,G}^A - \delta \frac{\beta i R_M T_{St}}{2 F p_A D_{H_2,H_2O}^{eff}} \right) \quad (5.17)$$

Analog: Wassergehalt an der Kathode

$$\lambda_K = 12,6 + 1,4 a_{W,K} \quad (5.18)$$

$$\lambda_K = 12,6 + 1,4 \frac{p_K}{p_{SAT}} \left(x_{H_2O,G}^K - \delta \frac{(1 + \beta) i R_M T_{St}}{2 F p_K D_{O_2,H_2O}^{eff}} \right) \quad (5.19)$$

Im letzten Schritt für die Bestimmung des Ortsabhängigen Wassergehalts der Membran kann nun ein lineares Gleichungssystem aus den Formeln (5.10), (5.11), (5.17) und (5.19) aufgestellt werden, und hieraus die Integrationskonstante C und das Verhältnis β bestimmt werden.

$$\lambda_A = 4,4 \beta + C = 14 \frac{p_A}{p_{SAT}} \left(x_{H_2O,G}^A - \delta \frac{\beta i R_M T_{St}}{2 F p_A D_{H_2,H_2O}^{eff}} \right) \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned} \lambda_K &= 4,4 \beta + C \exp\left(\frac{i M_m n_{drag}^{sat}}{22 F \rho_{tr} D_\lambda} l_{mem}\right) \\ &= 12,6 + 1,4 \frac{p_K}{p_{SAT}} \left(x_{H_2O,G}^K - \delta \frac{(1 + \beta) i R_M T_{St}}{2 F p_K D_{O_2,H_2O}^{eff}} \right) \end{aligned} \quad (5.21)$$

Das Gleichungssystem beinhaltet zwei Gleichungen und zwei Unbekannte und kann aus diesem Grund eindeutig aufgelöst werden. Daraufhin werden C und β in Gleichung (5.9) eingesetzt, welche wiederum mit Gl. (5.4) und Integration der Gl (5.3) zum Gesamtwiderstand der Elektrolytmembran führt.

Zur besseren Verständlichkeit ist im Anhang ein Rechenbeispiel beigelegt, welches unter vorgegeben Parametern die Berechnung des Gesamtwiderstandes der Membran vornimmt.

4.5 Dynamisches Verhalten der PEM-Brennstoffzelle

Mit den Betrachtungen zu den im Betrieb auftretenden Spannungsverlusten, der Bilanzierung der Stoffströme in der Brennstoffzelle und dem Membranmodell sind nun alle statischen Aspekte des Modells aufgelistet und erklärt worden. Im nächsten Schritt sollen daher die dynamischen Vorgänge der Brennstoffzelle behandelt werden. Da in dieser Arbeit kein Modell zum dynamischen thermischen Verhalten des Stacks miteinbezogen wird, soll der Fokus auf den zwei nachfolgenden Vorgängen liegen. Dies ist zum einen die Dynamik Luftzufuhr an der Kathode, die sich mit der Trägheit des Verdichters und dem sich zeitabhängig einstellenden Luftdruck an der Kathode beschäftigt. Zum anderen wird die Helmholtz Doppelschicht und ihr dynamisches Verhalten berücksichtigt.

4.5.1 Luftzufuhr an der Kathode

Zuerst soll die Luftzufuhr an der Kathode modelliert werden. Hierfür soll das dynamische Verhalten eines Axiallüfters der Firma Papst simuliert werden. Das zugehörige Datenblatt findet sich im Anhang. Als Vorbild für das Modell dienen die Quellen [28] und [31]. Alle haben gemeinsam, dass diese ähnlichen Herangehensweisen an die Thematik aufweisen. So soll auch dieses Modell eine Spannung, die an den Motor des Verdichters angelegt wird, als Eingangsparameter erhalten und daraus das dynamische Verhalten des geförderten Luftvolumenstromes berechnen.

Dabei stellt die Drehzahl des Verdichters einen wesentlichen Parameter dar, der für den zeitliche Füllvorgang der Kathode mit Luft verantwortlich ist. Die Drehzahl steht dabei in direktem Zusammenhang mit dem Luftmassenstrom. In den nachfolgenden Formeln wird jedoch immer die Winkelgeschwindigkeit verwendet. Diese ist durch die Beziehung

$$\omega_V = 2 \pi n_V \quad (6.1)$$

mit der Drehzahl verknüpft. Hierbei steht ω_V für die Winkelgeschwindigkeit und n_V für die Drehzahl. Um das zeitliche Verhalten dieser zu beschreiben, gilt folgender Zusammenhang:

$$J_V \frac{d\omega_V}{dt} = \frac{1}{\omega_V} (\tau_{Vm} - \tau_V) \quad (6.2)$$

Die Änderung der Winkelgeschwindigkeit ist dabei abhängig vom Trägheitsmoment J_V , unter welchem die die Trägheitsmomente von Verdichtermotor und Verdichter zusammengefasst sind. In der Formel steht weiterhin τ_{Vm} für das Drehmoment am Verdichtermotor und τ_V für das Drehmoment des Verdichters. Das Drehmoment des Motors wird dabei durch den Wirkungsgrad, die angelegte Spannung und auf Basis mehrerer Motorkonstanten berechnet.

$$\tau_{Vm} = \eta_{Vm} \frac{k_t}{R_{Vm}} (U_{Vm} K - k_v \omega_V) \quad (6.3)$$

η_{Vm} steht für den Wirkungsgrad des Motors, k_t und k_v sind die Motorkonstanten, R_{Vm} ist der ohmsche Widerstand des Motors und U_{Vm} beschreibt die angelegte Spannung. Da sich für Axiallüfter in der Größenordnung von 12 Volt keine Motorkennndaten etc. finden lassen, werden hier die Werte aus der Quelle [31] für einen Verdichter übernommen und durch den Korrekturfaktor K so angepasst, dass das Verhalten der Drehzahl mit den Herstellerangaben übereinstimmt.

Das Drehmoment des Verdichters τ_V wird durch die folgende Beziehung bestimmt:

$$\tau_V = \frac{c_{p,L} T_U}{\omega_V \eta_V} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_U} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \dot{m}_V \quad (6.4)$$

Hier steht $c_{p,L}$ für die Wärmekapazität von Luft, T_U und p_U für die Temperatur und den Druck der Umgebung, η_V für den Wirkungsgrad des Verdichters und γ für das spezifische Luftverhältnis. Dieses hat hier den Wert $\gamma = 1,4$. \dot{m}_V stellt den vom Verdichter geförderten Massenstrom dar. Dieser soll anhand praktischer Vorgehensweisen, die im zweiten Teil dieses Abschnittes erläutert werden, bestimmt werden. In [28] und [31] wird ein „Supply Manifold“ als Volumen eingeführt, welches sich vor der Kathode befindet. Hierzu werden z.B. alle Leitungen zusammenaddiert, die die Luft vom Verdichter zur Kathode befördern. Der Axiallüfter der Horizon H-100 ist jedoch direkt auf dem Brennstoffzellenstack montiert. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit zur Vereinfachung davon ausgegangen werden, dass das in der obigen Formel aufgeführte Druckverhältnis durch Umgebungsdruck und Druck an der Kathode definiert wird. Der Druck im Supply Manifold p_{sm} wird also durch den Gesamtdruck an der Kathode p_{ka} ersetzt:

$$p_{sm} = p_{ka} \quad (6.5)$$

Nach mehreren Versuchsreihen stellte sich heraus, dass das Einsetzen des Kathodendruckes anstelle des Druckes im Supply Manifold zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Simulation führt. Die komplexen Verknüpfungen der Differentialgleichungen konnten deshalb nicht in LabVIEW und Python umgesetzt werden. Daher wird die Gleichung (6.4), welche das Drehmoment des Verdichters angibt vernachlässigt und lediglich das Drehmoment des Lüftermotors (Gl. (6.3)) für die zeitliche Änderung der Drehzahl verwendet.

Die Druckberechnung erfolgt durch Verwendung des idealen Gasgesetzes. Um den zeitabhängige Druckänderung zu bestimmen, werden dabei die Gaskonstante für Luft R_L , die Temperatur des Stacks T_{St} und das Gesamtvolumen der Kathode V_{Ka} benötigt. V_{Ka} stellt dabei die Zusammenfassung aller Einzelvolumina der Kathoden dar, und wurde hier nach Vorlage der Arbeit von [18] mit dem Wert $V_{Ka} = 0,003 [m^3]$ bestimmt.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R_L T_{St}}{V_{Ka}} \frac{dm}{dt} \quad (6.6)$$

Um auf die Änderung der Masse im System zu schließen, wird hier wie in Kapitel 4.3 der Raum der Kathode mit allen ein- und austretenden Massenströmen bilanziert. Zudem ist es von Vorteil, die individuelle Gaskonstante R_L durch die Beziehung

$$R_M = R_L M \quad (6.7)$$

zu ersetzen. Die Massenbilanz wird hier anschaulich in Abbildung (12) dargestellt. Aus dieser folgt:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R_M T_{St}}{V_{ka}} \left(\frac{\dot{m}_{ein} - \dot{m}_{aus}}{M_i} \right) \quad (6.8)$$

$$= \frac{R_M T_{St}}{V_{Ka}} \left(\frac{\dot{m}_{Luft,ein} - \dot{m}_{Luft,aus}}{M_{Luft}} - \frac{\dot{m}_{O2,reak}}{M_{O2}} + \frac{\dot{m}_{W,gen}}{M_W} \right) \quad (6.9)$$

Dabei ist der eintretende Luftmassenstrom gleich dem vom Lüfter geförderten Massenstrom. Der austretende Massenstrom soll über eine linearisierte Düsgleichung bestimmt werden.

$$\dot{m}_{Luft,ein} = \dot{m}_V \quad (6.10)$$

$$\dot{m}_{Luft,aus} = k_{Düse} (p_{up} - p_{down}) \quad (6.11)$$

$$= k_{Düse} (p_{Ka} - p_U) \quad (6.12)$$

Der Düsenkoeffizient $k_{Düse}$, bei dem es sich um eine Konstante handelt, beschreibt das Ausströmverhalten der Luft. Dieser wird aus Quelle [31] übernommen. Die Druckdifferenz bei der Düsgleichung setzt sich dabei aus dem Druck p_{up} , der stromaufwärts herrscht, und p_{down} , der stromabwärts herrscht, zusammen.

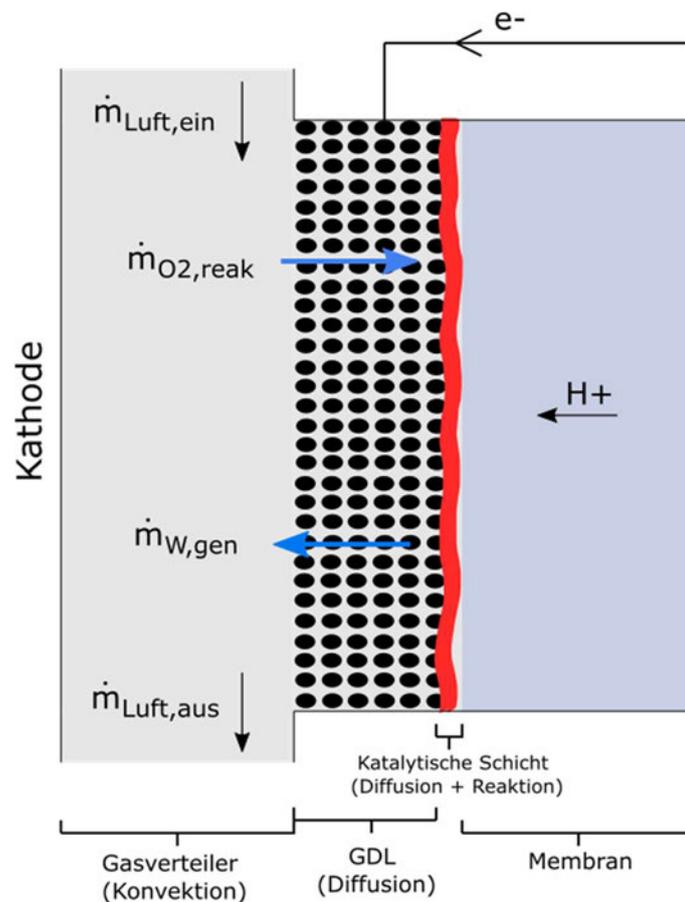


Abbildung 12: Massenströme an der Kathode für die Druckberechnung

Bei den Massenströmen $\dot{m}_{O2,reak}$ und $\dot{m}_{W,gen}$ handelt es sich um den Sauerstoff, der zum Reaktionszentrum diffundiert und verbraucht wird, und das während der Reaktion entstehende Wasser. Beide lassen sich unter Verwendung des Faraday Gesetzes bestimmen. Der Wasserfluss durch die Membran soll hier anders als in den Literaturquellen nicht miteinbezogen werden.

$$\dot{m}_{O2,reak} = M_{O2} \frac{n I_{St}}{4 F} \quad (6.13)$$

$$\dot{m}_{W,gen} = M_W \frac{n I_{St}}{2 F} \quad (6.14)$$

Kennlinie des Verdichters

Der letzte unbekannte Parameter der Gleichung (6.9) stellt der Verdichtermassenstrom \dot{m}_V dar. In der Literatur wird dieser nach der Jensen & Kristensen Methode zur Kurvenapproximation der Verdichterkennlinie bestimmt. Die Kennlinie eines Verdichters verbindet dabei das Gesamtdruckverhältnis mit der Drehzahl der Strömungsmaschine und dem Luftmassenstrom. In diesem Fall wird jedoch ein Axiallüfter verwendet, welcher im Datenblatt keine solche Verdichterkennlinie aufweist. Auch sind zu viele Unbekannte in der Methode enthalten, die in dieser theoretischen Arbeit nicht mess- oder bestimmbar sind. Aus diesem Grund soll auf Basis der Herstellerangaben ein praktischer Ansatz gewählt werden, um die Drehzahl des Lüfters mit dem geförderten Luftmassenstrom zu verbinden.

Im Datenblatt des Axiallüfters der Firma Papst [26] ist folgende Tabelle zu finden. Auf Grundlage dieser ist es möglich, eine einfache Grafik zur Untersuchung des Betriebsverhaltens des Lüfters zu erzeugen.

Merkmale	Bedingung	Symbol	Werte		
			8,0 V	12,0 V	15,0 V
Spannungsbereich		U	8,0 V	12,0 V	15,0 V
Nennspannung		U_N			
Leistungsaufnahme	$\Delta p = 0$	P	0,2 W	0,45 W	0,7 W
Toleranz	0010		+/- 17,5 %	+/- 12,5 %	+/- 15,0 %
Stromaufnahme	$\Delta p = 0$	I	29 mA	37 mA	47 mA
Toleranz	0010		+/- 17,5 %	+/- 12,5 %	+/- 15,0 %
Drehzahl	$\Delta p = 0$	n	910 1/min	1.500 1/min	1.900 1/min
Toleranz	0010		+/- 12,5 %	+/- 10,0 %	+/- 10,0 %
Anlaufstrom				< 100 mA	

Tabelle 3: Übersicht aus dem Produktdatenblatt des Axiallüfters von Papst über den Zusammenhang von Drehzahl und Spannung

Werden der Spannungsbereich bzw. die Leistungsaufnahme über der Drehzahl aufgetragen, so lässt sich ein linearer Zusammenhang erkennen. Aus diesem Grund soll davon ausgegangen werden, dass sich auch der geförderte Volumenstrom linear zur Drehzahl verhält.

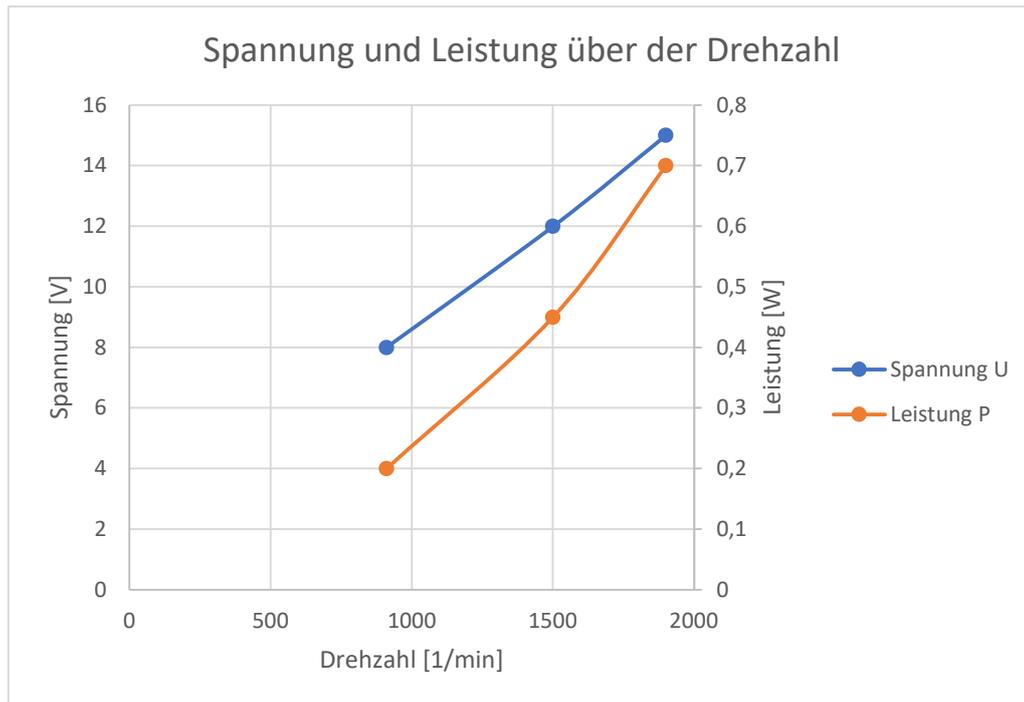


Abbildung 13: Spannung und Leistung über der Drehzahl des Verdichters

Weiterhin findet sich im Datenblatt ein Kapitel zur Aerodynamik des Verdichters. In der Abbildung (14) ist der Volumenstrom des Lüfters bei $U = 12 \text{ V}$ und $n = 1500 \frac{1}{\text{min}}$ mit $30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ angegeben.

3.4 Aerodynamik

Messbedingungen: Gemessen mit einem saugseitigen Doppelkammerprüfstand nach DIN EN ISO 5801.
 Normalluftdichte = $1,2 \text{ kg/m}^3$; $TU = 23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$;
 Im Ansaug- und Ausblasbereich darf im Abstand von 0,5 m kein massives Hindernis angeordnet sein. Motorachse waagrecht.
 Die Angaben gelten nur unter den angegebenen Messbedingungen und können sich durch die Einbaubedingungen verändern. Bei Abweichungen zum Normaufbau sind die Kennwerte im eingebauten Zustand zu überprüfen.

a.) Betriebsbedingung:

1.500 1/min freiblasend	
Max. freiblasender Volumenstrom ($\Delta p = 0 / \dot{V} = \text{max.}$)	30,0 m ³ /h
Max. Staudruck ($\Delta p = \text{max.} / \dot{V} = 0$)	10 Pa

Abbildung 14: Auszug aus dem Produktdatenblatt des Axiallüfters zum Kapitel Aerodynamik

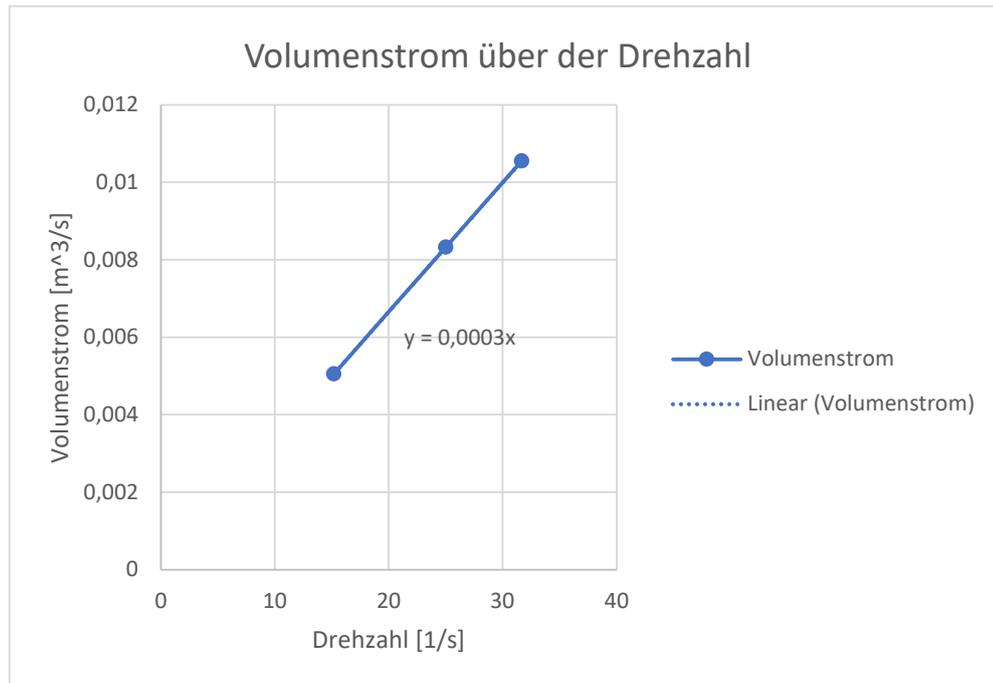


Abbildung 15: Linearer Zusammenhang von Volumenstrom und Drehzahl des Axiallüfters

Die obere Abbildung (15) zeigt das Verhältnis zwischen Volumenstrom und Drehzahl. Dieses wurde über die einfache Anwendung des Dreisatzes bestimmt, um eine lineare Trendlinie zu erzeugen. Fügt man eine Trendlinie dazu im Graphen ein, so lautet der lineare Zusammenhang folgender Maßen:

$$\dot{V} = 0,000334 n \quad (6.15)$$

Dieser kann unter Verwendung der Winkelgeschwindigkeit zu

$$\dot{V} = 0,000334 \frac{\omega}{2 \pi} \quad (6.16)$$

umgeformt werden, und mit der Dichte der Luft ρ_L in den Massenstrom umgerechnet werden.

$$\dot{m}_V = 0,000334 \frac{\omega}{2 \pi} \rho_L \quad (6.17)$$

4.5.2 Dynamik der Helmholtz Doppelschicht

Ein weiterer Faktor bei den dynamischen Betrachtungen für das Simulationsmodell stellt die Helmholtz Doppelschicht dar. Diese soll hier durch ein elektrisches Ersatzmodell approximiert werden.

An der Schnittstelle zwischen Elektrode und Elektrolyt treten geladene Partikel in Kontakt. Diese weisen dabei mitunter eine unterschiedliche Polarisation auf. Die Folge ist, dass ein Kondensatoreffekt beobachtet werden kann, welcher auch als Doppelschichtkapazität bezeichnet wird. Dabei verursacht die Doppelschicht nicht direkt eine Überspannung wie z.B. die Aktivierungsverluste, jedoch nimmt sie direkten Einfluss auf eben diese Durchtrittsüberspannung. Die Aktivierungsreaktion kann mit einem RC-Glied modelliert werden, sodass sich nach einer gewissen Verzögerung erst die Aktivierungsspannung einstellt. [8] Auch die Konzentrationsüberspannung wird in diese Betrachtung miteinbezogen und beide Überspannungen bilden zusammen mit der als Kondensator modellierten Doppelschicht ein RC-Glied aus zwei Widerständen und einer Kapazität. Die hierüber abfallende Verlustspannung soll im weiteren Verlauf als V_C bezeichnet werden. Das gesamte Schaltbild sieht dabei folgendermaßen aus:

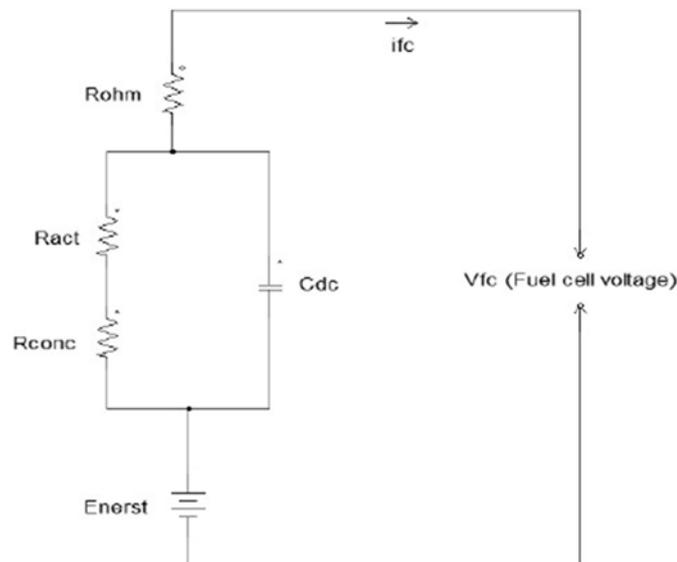


Abbildung 16: Ersatzschaltbild für die Helmholtz Doppelschicht

Dieses wurde wie in [15], [16], und [23] übernommen. Sowohl die Nernst-Spannung wie auch die ohmschen Verluste werden nicht durch das kapazitive Verhalten der Doppelschicht beeinflusst. Aus der Ersatzmodell lässt sich folgende Beziehung für die Spannung der Zelle ableiten:

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} I - \frac{1}{\tau} V_C \quad (6.18)$$

Hierbei stehen C für die Kapazität in Farad, I für den fließenden Strom und V_C für die Verlustspannung der Aktivierungs- und Konzentrationswiderstände. Unter τ sind die eben besagten Widerstände in folgender Gleichung zusammengefasst:

$$\tau = C (R_{akt} + R_{kon}) \quad (6.19)$$

Bzw. mit den Überspannungen:

$$\tau = C \frac{(U_{akt} + U_{kon})}{I} \quad (6.20)$$

5. Implementierung in LabVIEW/ Python

Mit dem Abschluss des vierten Kapitels dieser Arbeit sind nun alle physikalischen und mathematischen Grundlagen gegeben, um das Modell in einer programmierbaren Umgebung zu implementieren und auszuwerten. Als generelle Randbedingung für diese Thesis wurde die Bedingung gestellt, dass dabei das Programm LabVIEW verwendet werden soll. Dieses eignet sich besonders um logische Verknüpfungen herzustellen und eine dynamische Simulation durchzuführen. Wie bereits im Lastenheft erwähnt, besteht aber die Möglichkeit weitere Berechnungen mit anderen Tools zu programmieren und in das Modell miteinzubinden.

Die Wahl in dieser Arbeit fällt auf die Software Python. In dieser können Formeln mit vielen Eingangsparametern schnell und einfach programmiert werden. Neben der Schnittstelle zwischen Python und LabVIEW, die hier eine interessante und entscheidende Rolle spielt, werden nun im Folgenden alle Eingangsparameter und Randbedingungen für das Modell aufgelistet, ein genereller Überblick über die Struktur des Modells beschrieben und schließlich die in LabVIEW implementierten Modelle gezeigt.

5.1 Generelle Struktur des Modells

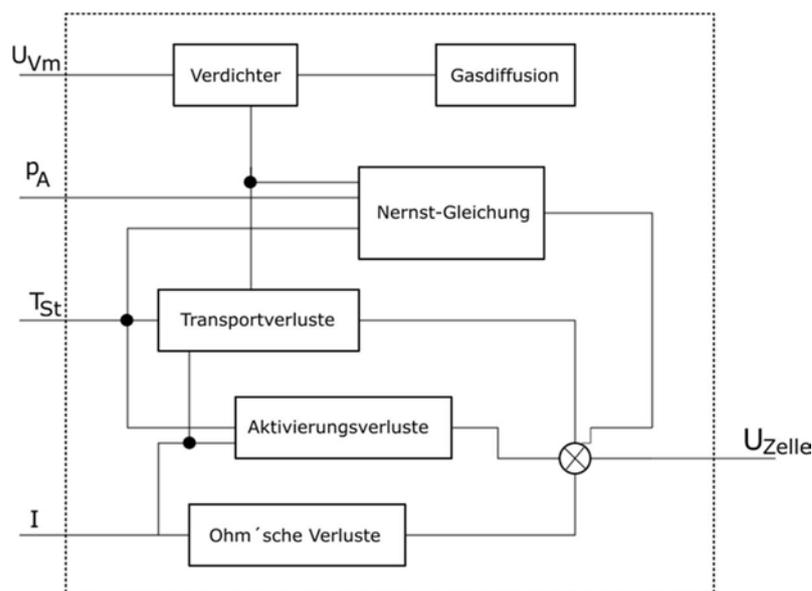


Abbildung 17: Generelle Struktur des Simulationsmodells

Die generelle Struktur des Modells ist in Abbildung (17) zu erkennen. Den Kern des Modells bilden die Elemente für die Spannungsberechnung im Betrieb. Ausgehend von der reversiblen Zellspannung, welche mit Hilfe der Nernst-Gleichung bestimmt wird, werden die unterschiedlichen Überspannungen von der Leerlaufspannung subtrahiert. Neben dem fließenden Strom wird hier als Eingangsparameter insbesondere die Temperatur des Stacks benötigt. Auch die Drücke an den Elektroden sind von entscheidender Bedeutung, um als Ausgabe des Modells die Spannung der Einzelzelle zu erhalten. Das Verdichtermodell, welches als Eingangsgröße die am Motor angelegte Spannung benötigt, sorgt dabei für die zeitabhängige Druck- und Sauerstoffkonzentrationsänderung. Der Druck an der Anode wird als konstant und den Herstellerangaben entsprechend angenommen.

5.2 Schnittstelle LabVIEW/ Python

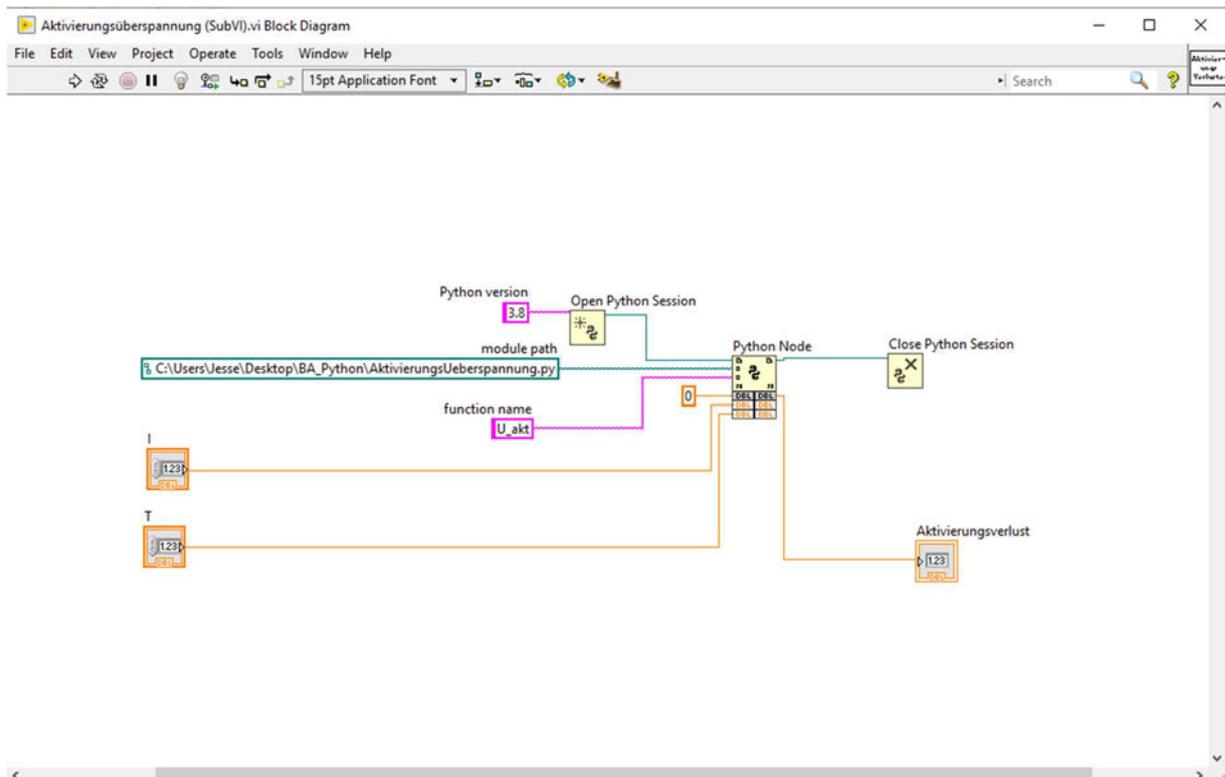


Abbildung 18: Anwendung der Funktion "Python Node" als Schnittstelle zwischen LabVIEW und Python

Wie bereits erwähnt spielt die Schnittstelle zwischen LabVIEW und Python eine entscheidende Rolle bei der Implementierung des Modells in dieser Arbeit. In LabVIEW ist als Funktion ein sogenannter „Python Node“ erhältlich. Hinter diesem verbirgt sich der in Python geschriebene Code. Um den Code abzurufen, benötigt die Funktion einige zusätzliche Parameter. Beispielsweise muss die aktuelle Python Version definiert werden (hier Version 3.8), das Öffnen und Schließen des Python Skripts initiiert werden, und der Speicherort (module path) sowie der Name der aufzurufenden Funktion angegeben werden.

So kann dann die Funktion in Python mit Eingabegrößen aus LabVIEW versorgt werden, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Als Beispiel ist hier in Abbildung (18) die Berechnung der Aktivierungsüberspannung dargestellt. Als Betriebsparameter werden in LabVIEW dabei der Strom I und die Temperatur des Stacks T eingegeben. Das Python Skript, in welchem die Berechnung der Überspannung stattfindet (siehe Formel (3.4)), ruft auf Basis dieser Parameter die Funktion auf und gibt als Ausgabegröße dann die Verlustspannung aus.

Die gesamte Funktion um den Python Node wird als sogenanntes Sub VI (engl. virtual interface) verwendet, um Platz in der LabVIEW Oberfläche zu sparen. Es besteht dabei die Möglichkeit das Anzeigebild der Sub VI im Sinne der besseren Identifizierbarkeit zu verändern. Dieses Prinzip soll anhand der nachfolgenden Abbildungen der implementierten Modelle in LabVIEW deutlich werden.

5.4 LabVIEW Modelle

5.4.1 statisches Modell

In der Abbildung (20) ist das Grundgerüst des statischen Modells in LabVIEW zu sehen. Die Überspannungen und die Nernst-Spannung sind als Sub VI's integriert, um Platz zu sparen. Diese sind als weiße Kästen zu erkennen. Das statische Modell wird anhand konstanter Elektrodrücke und vorgegebener Stacktemperatur ausgewertet. In der unteren Abbildung (19) wird der Control & Simulation Loop verwendet, um ein Strom-Spannung-Kennlinie zu erzeugen. In diesem ist es neben unterschiedlichen Stromverläufen möglich, direkt Graphen zu erzeugen und dynamische Simulationen durchzuführen. Prägnant ist hierbei, dass das gesamte statische Modell (Abb. (20)) ebenfalls als Sub VI (weißer Kasten in der Mitte) verwendet werden kann.

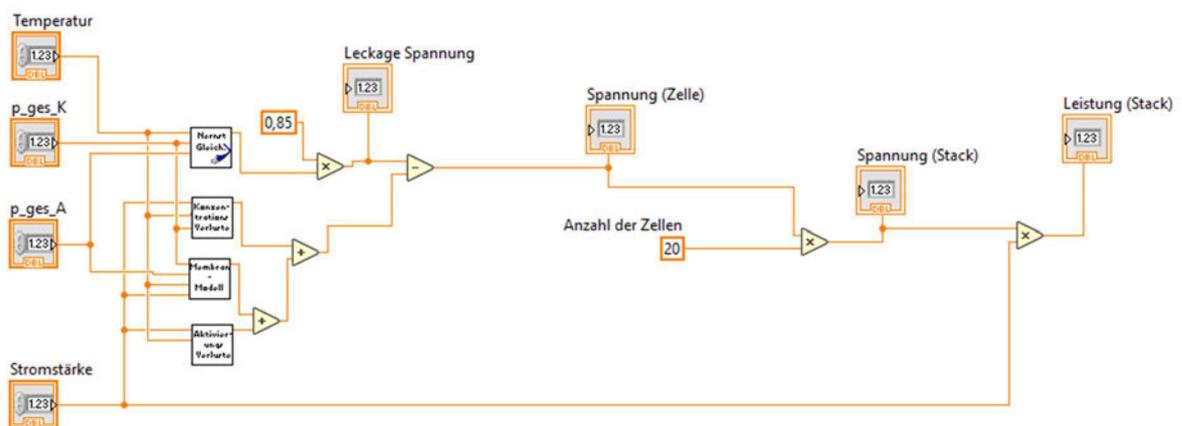


Abbildung 20: Aufbau des statischen Modells in LabVIEW mit Sub VI's

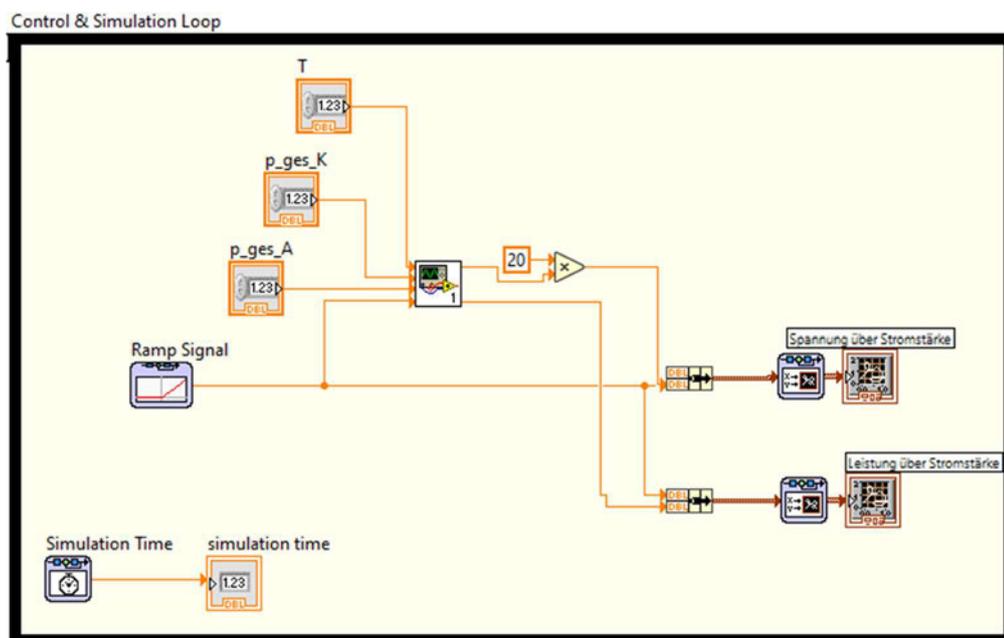


Abbildung 19: Aufnahme der U-I-Kennlinie mit dem Control & Simulation Loop

5.4.2 dynamisches Modell

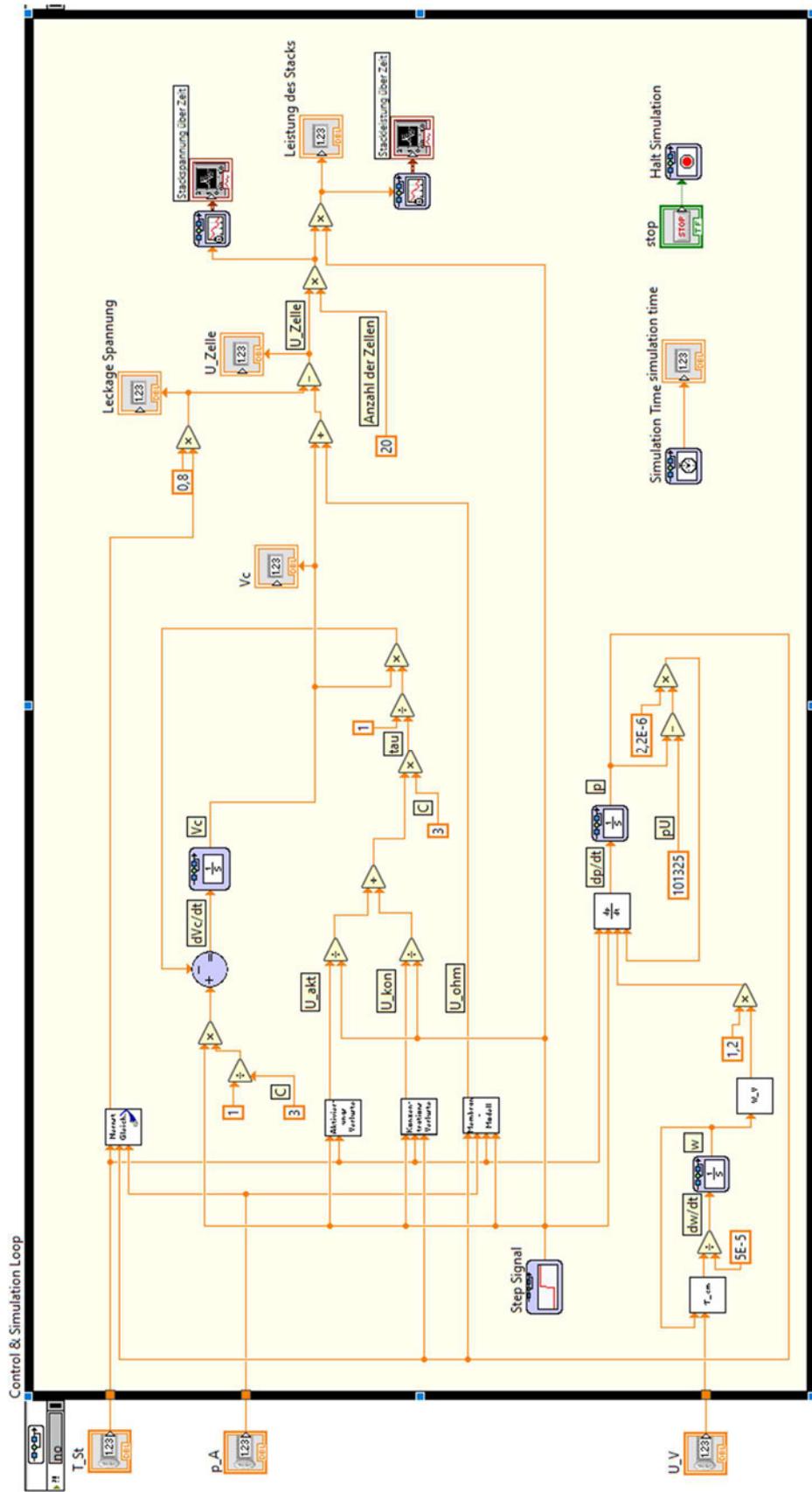


Abbildung 21: Aufbau des dynamischen Modells in LabVIEW

Dass dynamische Modell (Abb. (21)) in LabVIEW ist neben der Dynamik der Helmholtz Doppelschicht um den Verdichter und den dynamischen Kathodendruck erweitert. Außerdem werden mit der Anzahl der Zellen die Gesamtleistung und -spannung berechnet und deren Verläufe mittels Graphen dokumentiert. In der unteren Auflistung sind die verschiedenen Bereiche des Modells gekennzeichnet und erklärt.

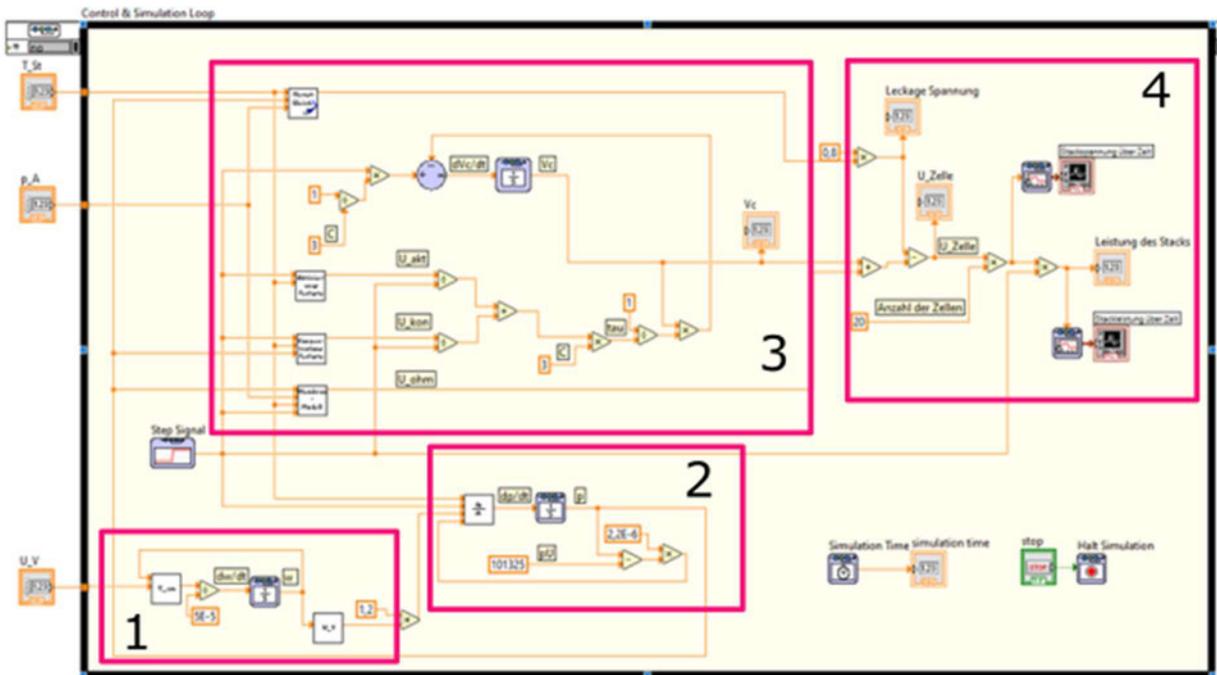


Abbildung 22: Einteilung des dynamischen Modells in nummerierte Bereiche

- **Bereich 1:** Verdichter
 - Berechnung der zeitabhängigen Drehzahl mit der Spannung am Verdichter als Eingangsgröße, Ausgabegröße ist der Luftmassenstrom
- **Bereich 2:** Kathodendruck
 - Druckänderung der Kathode in Abhängigkeit des geförderten Luftmassenstrom
- **Bereich 3:** Spannungsberechnung
 - Nernst-Spannung, Aktivierungs- und Konzentrationsüberspannung und Membranmodell als Sub-VI
 - Dynamik der Helmholtz Doppelschicht
- **Bereich 4:** Datenverwertung
 - Bestimmung der Gesamtspannung und -leistung
 - Erzeugen der Graphen

5.2 Eingangsgrößen/ Modellparameter

Die nachfolgende Tabelle (4) listet alle physikalischen Eingangsgrößen und -parameter auf, die für die Berechnung des Modells verwendet wurden. Diese wurden aus den im Literaturverzeichnis aufgeführten Quellen entnommen. In weiterführenden Arbeiten mit dem Simulationsmodell können diese variiert werden. Besonders die Parameter, die den Verdichter betreffen, können dabei noch anhand von Versuchsreihen genauer bestimmt werden. Auch die Wassergehälte an den Elektroden sind hier als Konstanten definiert und können dementsprechend noch durch Modelle zur Befeuchtung der Eduktgase und in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte realitätsgetreuer bestimmt werden.

Parameter	Beschreibung	Wert	Einheit
T_U	Umgebungstemperatur	293,15	[K]
p_U	Umgebungsdruck	1,01325	[bar]
A_{FC}	Aktive Fläche der Einzelzelle	22,5	[cm ²]
i_0	Austauschstromdichte	0,0001	[A/cm ²]
p_A	Gesamtdruck an der Anode	0,5	[bar]
T_{St}	Stacktemperatur	340	[K]
l_{mem}	Dicke der Membran	0,0125	[cm]
α	Übertragungsfaktor	0,5	[–]
δ	Dicke der Gasdiffusionsschichten	0,02	[cm]
ε	Elektrodenporosität	0,78	[–]
$x_{H_2O,G}^A$	Wassergehalt im Gaskanal der Anode	0,1	[–]
$x_{H_2O,G}^K$	Wassergehalt im Gaskanal der Kathode	0,1	[–]
x_{O_2}	Sauerstoffgehalt der Luft	0,21	[–]
x_{H_2}	Wasserstoffgehalt der Anode	0,9	[–]
n	Anzahl der Zellen	20	[–]
n_{drag}^{sat}	Elektroosmotischer Koeffizient	2,5	[–]
ρ_{tr}	Dichte der Membran in trockenem Zustand	0,00197	[kg/cm ³]
M_m	Äquivalentes Gewicht von Nafion	1	[kg/mol]
V_{Ka}	Gesamtvolumen der Kathoden	0,003	[m ³]
R_M	Universelle Gaskonstante	8,3143	[J/kg K]
F	Faraday Konstante	96485	[C/mol]
$c_{p,L}$	Wärmekapazität Luft	1,004	[kJ/kg K]
J_V	Massenträgheitsmoment von Verdichtermotor + Verdichter	$5 \cdot 10^{-5}$	[kg m ²]
η_{Vm}	Wirkungsgrad des Verdichtermotors	0,98	[–]
k_t	Motorkonstante	0,0153	[Nm/A]
k_v	Motorkonstante	0,0153	[Vs/rad]
R_{Vm}	Ohm'scher Widerstand des Motors	1,6	[ohm]
U_{Vm}	Spannung am Motor	12	[V]
η_V	Wirkungsgrad des Verdichters	0,8	[–]
$k_{Düse}$	Düsenkonstante	$0,22 \cdot 10^{-5}$	[kg/s Pa]
ρ_L	Dichte der Luft	1,2	[kg/m ³]
C	Kapazität des Doppelschichtkondensators	3	[F]

Tabelle 4: Modellparameter

6. Simulationsergebnisse

Nun, da das Simulationsmodell in LabVIEW mit Hilfe von Python implementiert wurde und alle Parameter für die Simulation angegeben wurden, soll das Modell umfassend getestet und ausgewertet werden. Dazu werden im ersten Schritt Spannungsverläufe des statischen Modells aufgenommen. Zusätzlich soll das Verhalten des Verdichters und des Kathodendruckes untersucht und graphisch dargestellt werden. Anschließend erfolgt die Auswertung des dynamischen Modells. Dieses wird mit unterschiedlich großen Stromsprüngen beaufschlagt und der daraus resultierende Spannungsverlauf gemessen.

6.1 Strom-Spannungs-Kennlinie des statischen Modells

Für die Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie wird das statische Modell (siehe Abb. ()) mit einem sogenannten „Ramp Signal“ als Stromverlauf getestet. Dieses Signal sorgt für einen stetigen Anstieg der Stromstärke in Abhängigkeit der Zeit. Die weiteren Betriebsparameter sind in diesem Fall die konstanten Drücke an Kathode (1 bar) und Anode (0,5 bar). Die Temperatur der Brennstoffzelle wird mit 45 °C bzw 318,15 K angenommen. Da die maximale Temperatur des Stacks 65 °C beträgt und von der Normtemperatur für die Umgebung (25 °C) ausgegangen wird, handelt es sich hierbei also um einen mittleren Wert, bei dem die Brennstoffzelle häufig betrieben wird.

Für die Spannung über der Stromstärke ergibt sich folgender Verlauf:

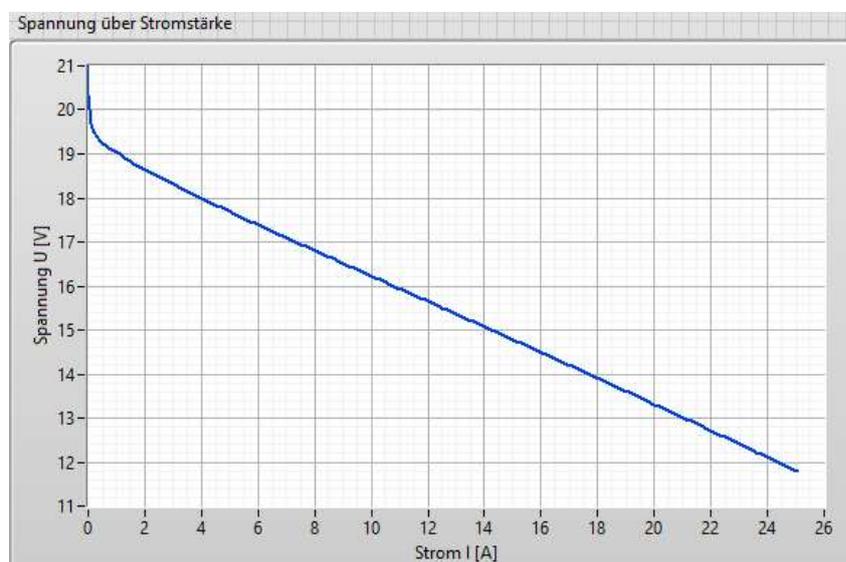


Abbildung 23: U-I-Kennlinie des statischen Modells

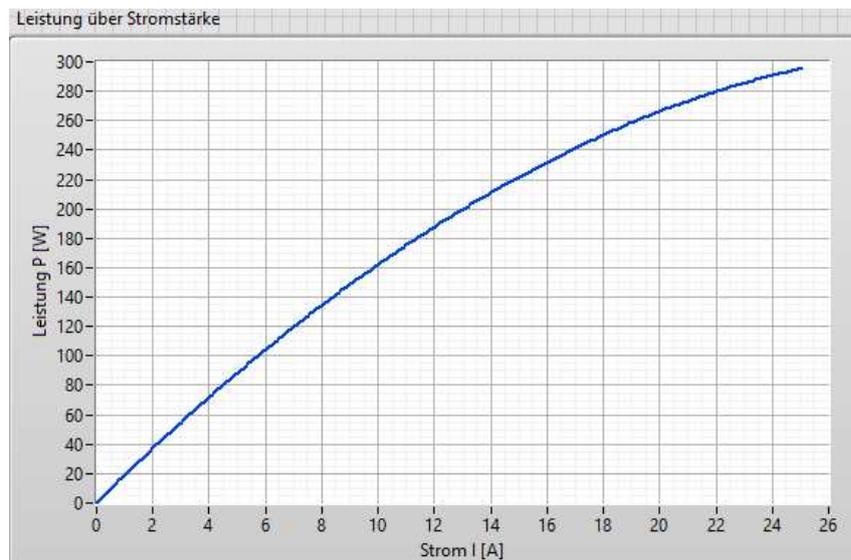


Abbildung 24: Leistungskurve des statischen Modells

Beim Blick auf die U-I-Kennlinie und den Leistungsverlauf (Abb. (23) und (24)) fällt schnell auf, dass diese nicht dem üblichen Verlauf von Brennstoffzellen entsprechen. Gerade im Bereich hoher Stromstärken fehlt der typische Abfall der Spannung und Leistung. Auch die Leistung, welche hier bei circa 300 W ihr maximum erreicht, liegt deutlich über dem vom Hersteller angegebenen Wert. Diese Beobachtung kann durch den theoretisch bestimmten Wert für die limitierende Stromdichte erklärt werden. Diese beträgt unter Verwendung der Formel (3.20) circa $3 \frac{A}{cm^2}$. Daraus ergibt sich jedoch ein maximaler Strom, der deutlich zu hoch ist. Der Hersteller Horizon gibt an, dass bei 12 A ein Schutzmechanismus greift, um das System vor zu hohen Strömen zu schützen. Aus diesem Grund soll der theoretische Wert hier vernachlässigt werden und durch einen praktischeren Wert ersetzt werden. Unter Berücksichtigung der Strom-Spannungs-Kennlinie, die von Horizon angegeben wird, wird die limitierende Stromdichte auf $i_{lim} = 0,45 \left[\frac{A}{cm^2} \right]$ geschätzt.

Zusätzlich fällt auf, dass die Ruhespannung in der Praxis etwas niedriger ausfällt als jene, die durch das Modell berechnet wird. Deshalb sollen auch die Leckageverluste geringfügig erhöht und angepasst werden. Einen genaueren Überblick über den Vergleich zwischen Modell und Herstellerangabe liefert das Kapitel 7, welches die Validierung des Modells behandelt.

Nach den Anpassungen liefert die Simulation eine Kennlinie, die deutlich besser dem typischen Verlauf und den Herstellerangaben entspricht (Abb. (25) und (26)). Für die dynamische Analyse wurde das korrigierte statische Verhalten ins Modell integriert.

Korrigiertes statisches Verhalten

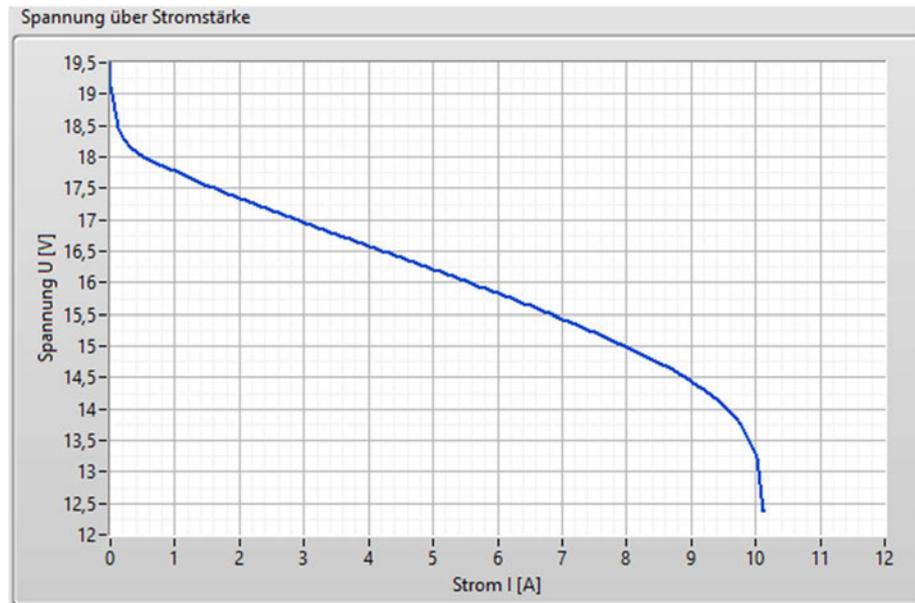


Abbildung 25: korrigierte U-I-Kennlinie des statischen Modells

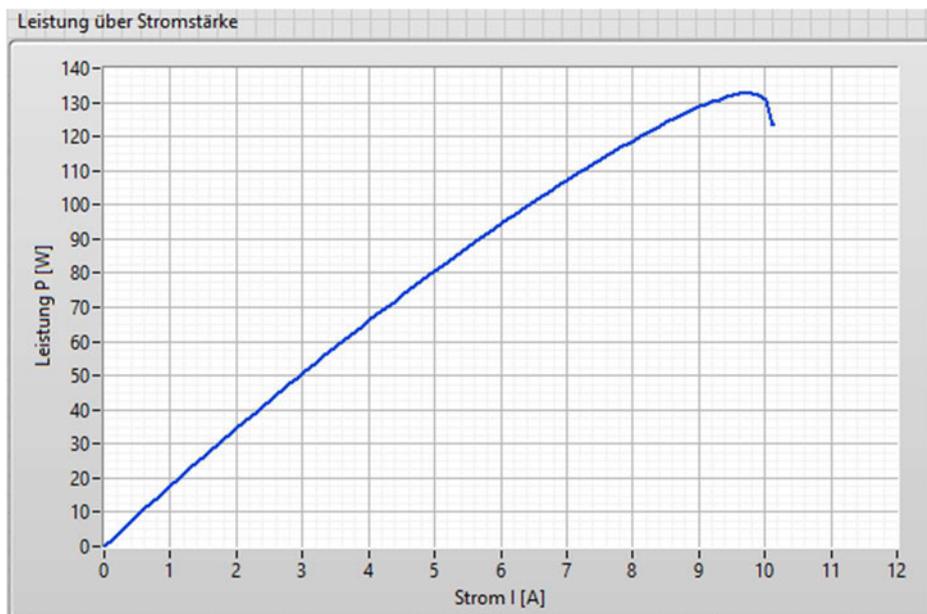


Abbildung 26: korrigierte Leistungskurve des statischen Modells

6.2 dynamisches Verhalten des Verdichters und Kathodendruck

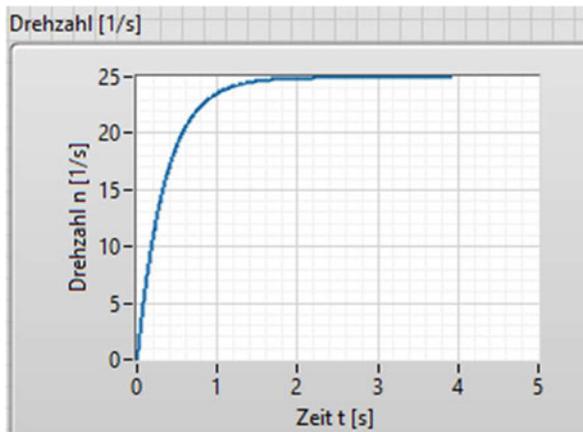


Abbildung 28: Drehzahländerung des Verdichters

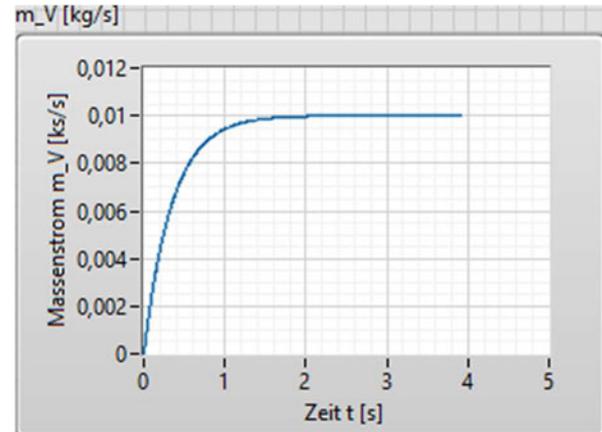


Abbildung 27: Massenstromänderung des Verdichters

Die Abbildungen (28) und (29) zeigen das dynamische Verhalten des Verdichters. Beide Graphen haben den gleichen Verlauf, da für den Zusammenhang zwischen gefördertem Luftvolumenstrom und der Drehzahl des Lüfters ein linearer Verlauf angenommen wurde. Die Werte entsprechen dabei gut den Angaben des Herstellers Papst. Bei einer am Lüftermotor angelegten Spannung von 12 V wird eine Drehzahl von $25\left[\frac{1}{s}\right]$ und ein Luftmassenstrom von $0,01\left[\frac{kg}{s}\right]$ erreicht. Um von Volumenstrom auf den Massenstrom umzurechnen, wurde hier eine Luftdichte von $\rho_L = 1,2\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ verwendet.

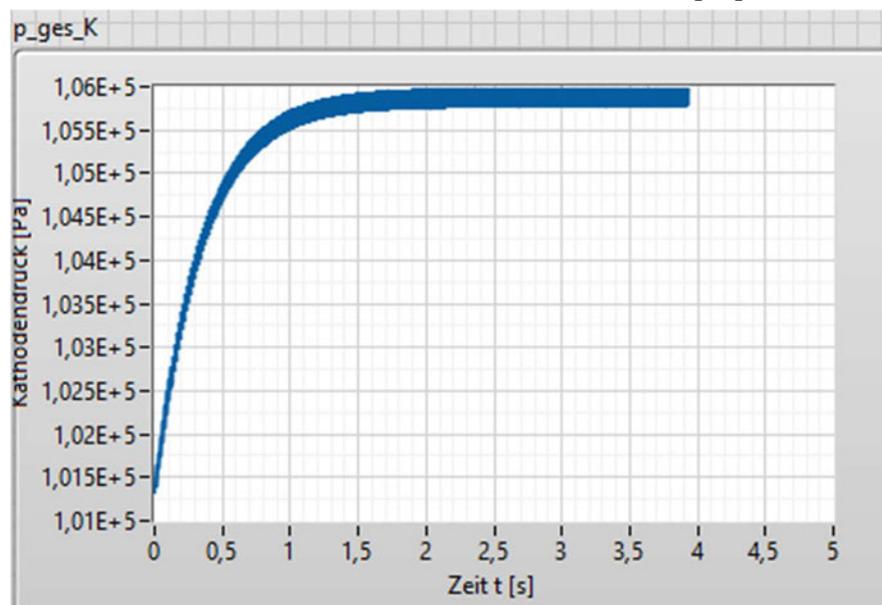


Abbildung 29: Druckänderung an der Kathode

In der Abbildung (29) ist die zeitliche Änderung des Kathodendruckes zu sehen. Dieser folgt analog der Verdichterdrehzahl und dem Luftmassenstrom. Auffällig ist die Druckschwankung um einen konstanten Wert, nach dem die maximale Drehzahl erreicht wurde. Die Messung wurde bei einer Stacktemperatur von $T_{St} = 318,15\text{ [K]}$ und einem konstanten Strom von 1 [A] aufgenommen.

6.3 Sprungantworten auf Lastsprünge des dynamischen Modells

Für die Simulation des dynamischen Modells sollen hier einige Lastsprünge dargestellt und deren Verlauf erklärt werden. Für alle Simulationen wurde wie schon vorher eine mittlere Temperatur von $T = 318,15 [K]$, ein Anodendruck von $p_A = 0,5 [bar]$ und eine am Verdichter angelegte Spannung von $U_V = 12 [V]$ als Ausgangsparameter festgelegt.

In der Abbildung (30) ist der Verlauf der Spannung und der Leistung des Stacks dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen positiven Sprung, bei dem der Eingangsstrom von 1 auf 3 A erhöht wurde. Dabei wurde der Sprung erst bei $t = 2 [s]$ initiiert, um das Einschwingverhalten des Modells zu berücksichtigen. Dieses ist zwischen 0 und 2 s zu erkennen. Neben dem Kathodendruck, der hier in den ersten Sekunden etwas steigt (siehe Abb. (29)), muss sich das Modell erst auf die Spannung von 1 A einschwingen. Die Spannung des Stacks erreicht nach den ersten Sekunden einen Wert von circa $U_{Stack} = 18,8 [V]$. Die Leistung pendelt sich gegen $P = 20 [W]$ ein. Sobald der Stromsprung in Kraft tritt, steigt die Leistung auf circa 55 W. Die Stackspannung zeigt einen typischen Verlauf. Erst nach einigen Zehntelsekunden erreicht sie einen konstanten Wert von unter 18 V.

Das Simulationsmodell bildet also das typische dynamische Verhalten der Brennstoffzelle gut ab. Dabei gilt, dass je größer der Strom ist, desto größer sind die Spannungsverluste. Die Leistung steigt im Gegensatz dazu mit steigender Stromstärke. Wie genau das Simulationsmodell die Realität abbildet, soll im nächsten Kapitel mit der Validierung durch Messwerte geklärt werden.

Im Sinne der Validierung wurden noch weitere Stromsprünge aufgenommen, jedoch wird hier die Leistung nicht mehr mit abgebildet. Die Abbildung (31) zeigt weitere positive Sprünge. Ausgehend von dem fließenden Strom von 2 Ampere werden unterschiedlich große Stromsprünge ausgewertet. Auch hier wird der Sprung erst nach 2 Sekunden initiiert, damit die Spannung sich auf einen konstanten Wert einstellen kann. Der Unterschied zu Abb. (30) besteht darin, dass die Spannung der Einzelzelle anstatt der Gesamtspannung des Stacks abgebildet ist. Im letzten Graphen dieses Abschnittes (Abb. (32)) sind analog zu den positiven Sprüngen auch negative Sprungantworten simuliert worden, welche von unterschiedlichen Ausgangsspannung auf dieselbe Endspannung springen.

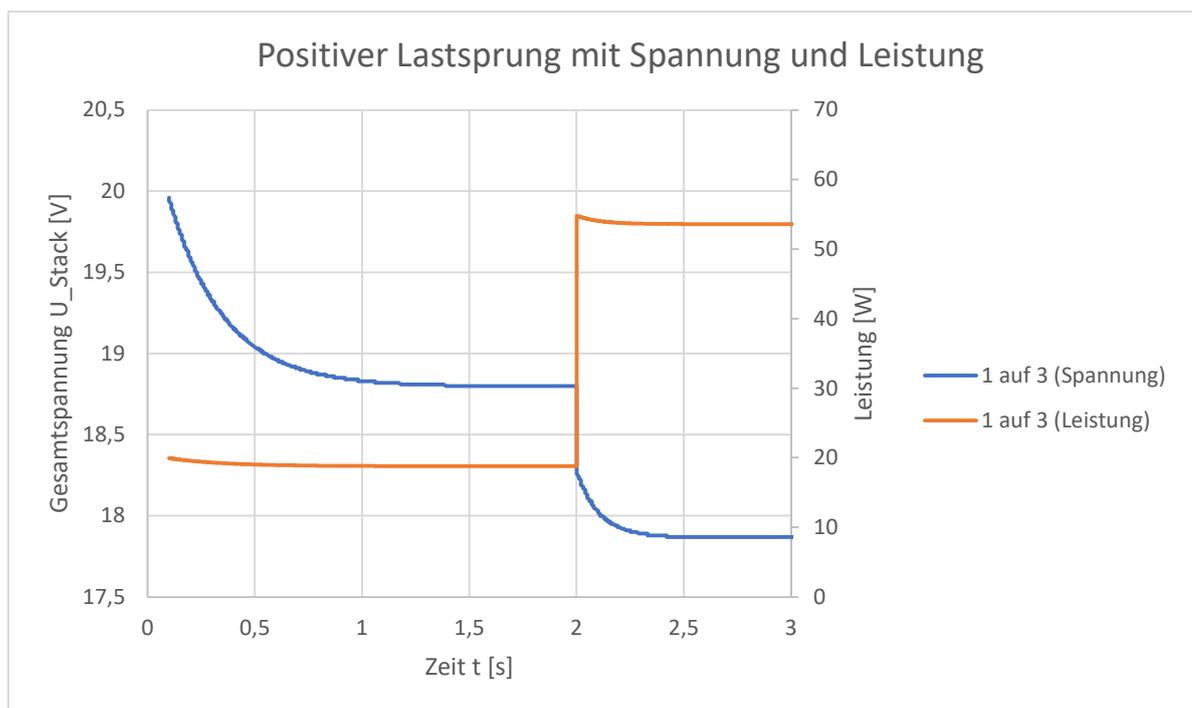


Abbildung 30: Positiver Lastsprung von 1 auf 3 Ampere

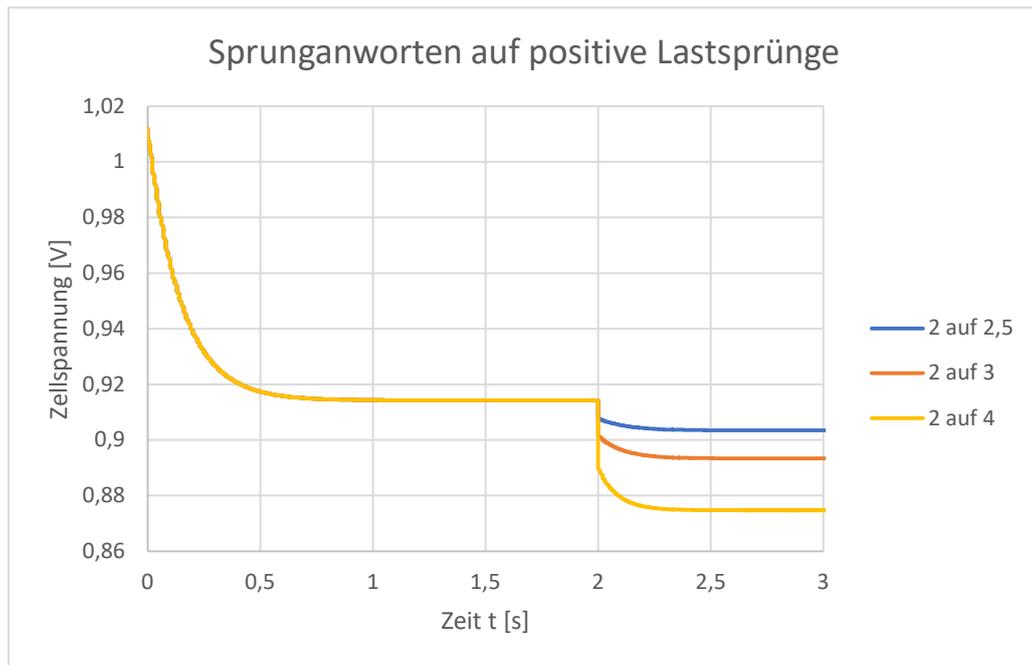


Abbildung 31: Sprungantworten auf verschiedene positive Lastsprünge

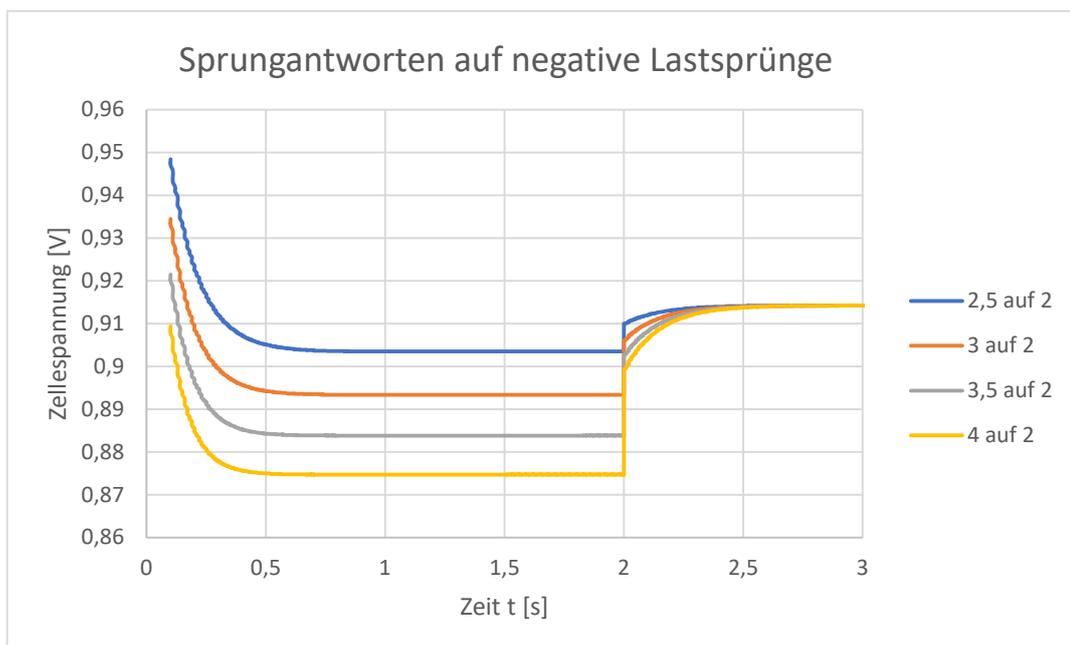


Abbildung 32: Sprungantworten auf verschiedene negative Lastsprünge

Bei der Betrachtung der positiven Sprünge fällt abermals auf, dass je größer der Stromsprung ausfällt, desto größer werden die Spannungsverluste. Die Zeit, die zum Erreichen des konstanten Endwertes benötigt wird, ist ungefähr gleich. Bei den negativen Sprüngen fällt auf, dass je größer die Differenz zwischen Endwert und Ausgangswert, desto länger braucht das System, um auf den konstanten Wert für 2 Ampere zu erreichen.

7. Modellvalidierung

7.1 statisches Modell

Für die Validierung des statischen Modells werden die Herstellerkennlinie von Horizon (Abbildung (33) hier aus Quelle [33] übernommen) mit dem korrigierten statischen Spannungsverlauf in der Abbildung (34) verglichen.

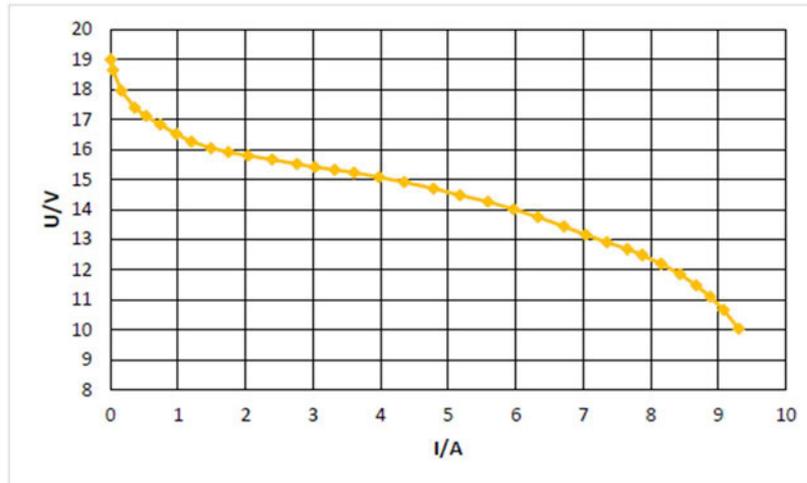


Abbildung 33: U-I-Kennlinie des Herstellers Horizon

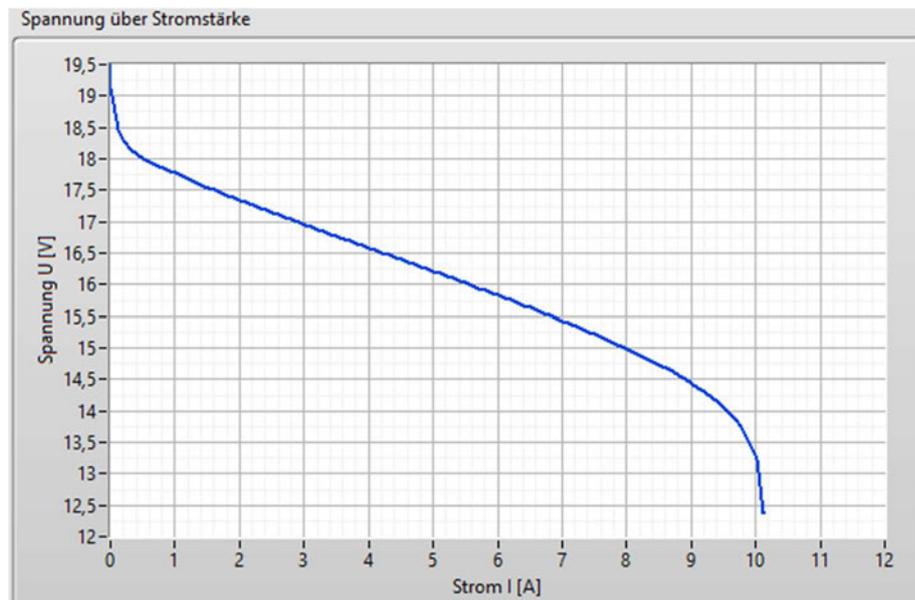


Abbildung 34: U-I-Kennlinie des Simulationsmodells

Beim Vergleich der beiden Kennlinien wird deutlich, dass das Simulationsmodell nach den Anpassungen das statische Verhalten der realen Brennstoffzelle gut widerspiegelt. Lediglich im Aktivierungsbereich, der circa zwischen 0 und 2 [A] liegt, fällt die Spannung bei der Herstellerkennlinie deutlich stärker ab. Daraus resultiert ein Spannungsniveau des Modells, welches höher als in der Realität liegt. Somit ist auch die Leistungsausgabe des Modells etwas höher als vom Hersteller angegebene Leistung.

7.2 dynamisches Modell

Das dynamische Modell wird mit den in der Arbeit [33] aufgenommenen Messwerten validiert. Wichtig zu beachten ist, dass an der Y-Achse keine reine Spannung aufgetragen ist, sondern das Verhältnis zwischen Stackspannung und Ausgangsspannung gebildet wird. Wie bereits im Kapitel 6 dargelegt, werden die Sprungantworten des Simulationsmodells erst nach der Einschwingphase nach 2 Sekunden gemessen.

Beim Vergleich der positiven Sprünge in Abb. (35) und Abb. (36) ist zu erkennen, dass beide Verläufe sich stark ähneln. Der Spannungsverlauf des Modells ist jedoch nicht so stetig wie die Messergebnisse, das heißt direkt nach dem Sprung fällt das Spannungsniveau des Modells abrupt ab, bevor es sich langsam einem konstanten Wert nähert. Die kleinen Schwankungen des Modells können durch die Schwankungen des Kathodendruckes erklärt werden. Weiterhin fällt auf, dass das Verhältnis der Spannungen bei dem Modell höhere Werte annimmt. Wie bereits im statischen Modell aufgefallen ist, liegt dies daran, dass das Simulationsmodell eine Spannung berechnet, die etwas höher ausfällt als in der Praxis. Ein weiterer Unterschied besteht in der Zeit, die nach der ein konstanter Wert nach dem Sprung erreicht wird. In der Messreihe aus [33] dauert dies etwa 0,2 Sekunden, während das Modell einen circa doppelt so langen Zeitraum benötigt. Dies könnte an einer zu hoch gewählten Größe für die Kapazität der Doppelschicht liegen.

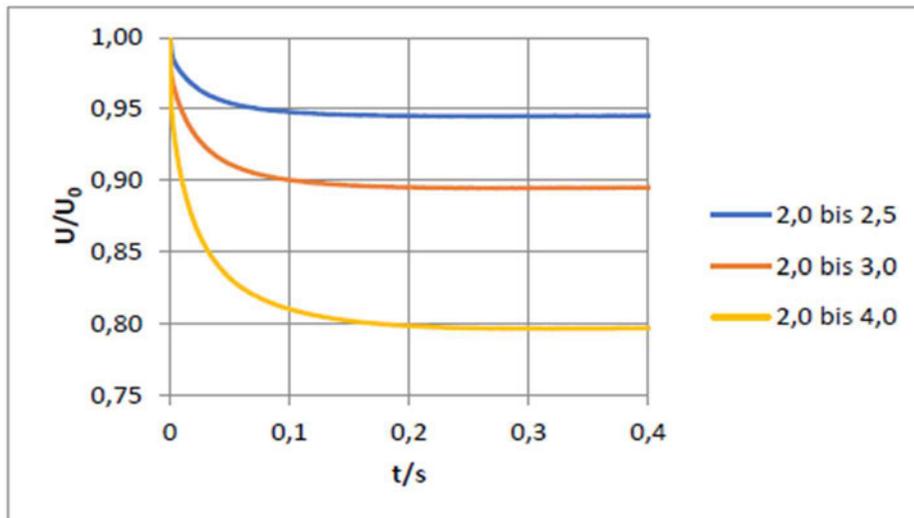


Abbildung 36: positive Sprungantworten der realen Messung

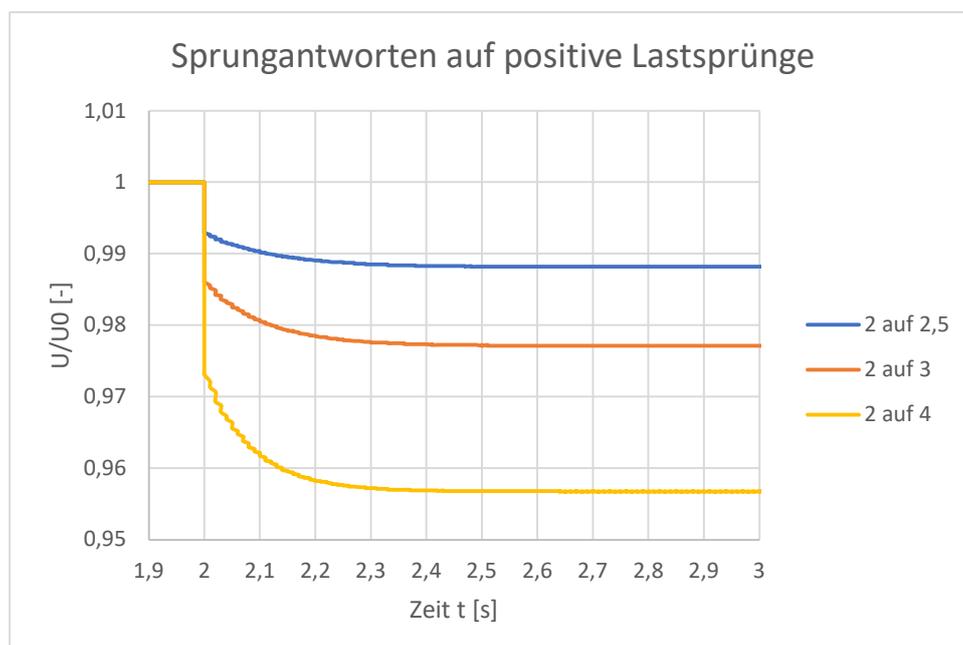


Abbildung 35: positive Sprungantworten des Simulationsmodells

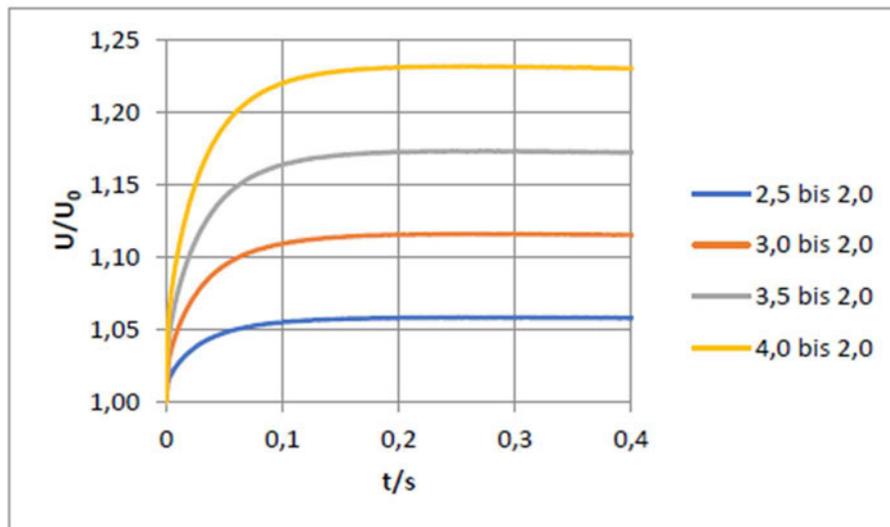


Abbildung 38: negative Sprungantworten der realen Messreihe

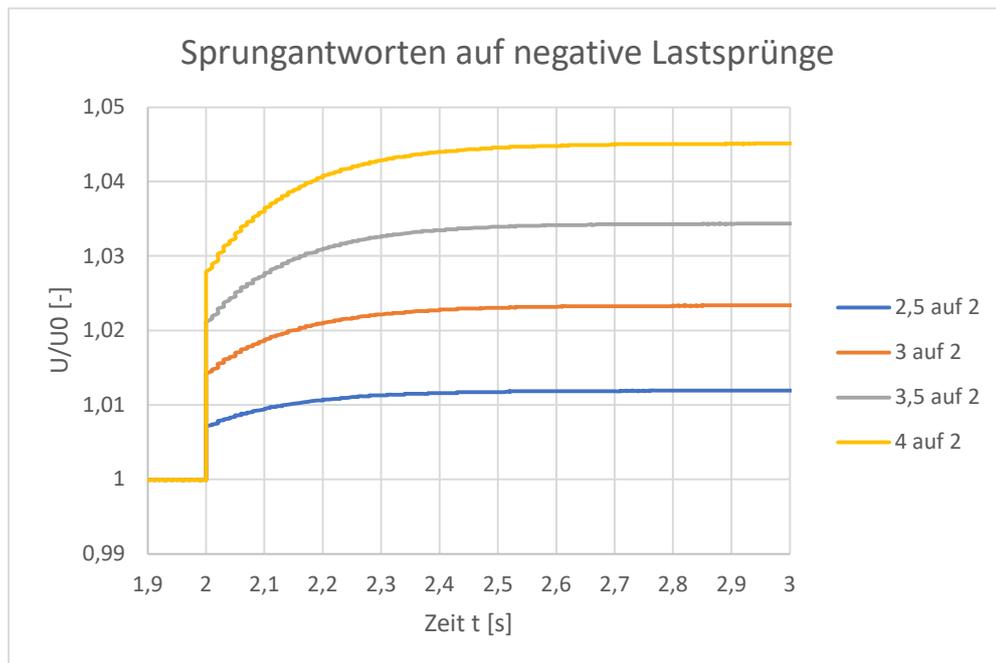


Abbildung 37: negative Sprungantworten des Simulationsmodells

Auch beim Vergleich der negativen Sprungantworten (Abb. (37) und Abb. (38)) fallen die Unterschiede, die bereits bei den positiven Sprüngen aufgeführt wurden, auf. Nach dem Sprung fällt die Kurve des Simulationsmodells abrupt ab und weist leichte Schwankungen durch den Kathodendruck auf. Die Zeit, die bis zum Erreichen eines konstanten Wertes benötigt wird, ist circa doppelt so hoch, und die Wertebereiche des Spannungsverhältnisses weichen leicht voneinander ab. Als Fazit kann jedoch gesagt werden, dass das Modell die Realität in guter Näherung widerspiegelt. In weiteren Arbeiten mit dem Modell können jedoch Parameter wie die Kapazität der Doppelschicht angepasst und verbessert werden.

8. Zusammenfassung und Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurde ein funktionierendes Simulationsmodell entwickelt, welches das statische und dynamische Verhalten einer 100 Watt PEMBZ in guter Näherung abschätzen kann. Es handelt sich dabei um einen eindimensionalen Ansatz, der die verschiedenen Stoffflüsse, wie z.B. von den Gasen oder dem Strom, durch die einzelnen Schichten einer Brennstoffzelle modelliert. Dazu wurde ein binärer Diffusionsansatz gewählt, der den mikroskopischen Stofftransport berechnet. Konvektive Aspekte des Massentransportes wurden vernachlässigt. Die statischen Spannungsberechnungen wurden mit der Nernst-Gleichung, der Tafelapproximation und dem ohmschen Gesetz durchgeführt. Bei den dynamischen Aspekten konnten die Dynamik der Helmholtz Doppelschicht durch ein elektrisches Ersatzmodell und die Dynamik eines Axiallüfters durch eine lineare Motorgleichung integriert werden. Zusätzlich wurde ein Membranmodell beschrieben, welches den Wassertransport und die damit einhergehende ionische Leitfähigkeit innerhalb der Membran berechnet. Das Simulationsmodell wurde in der grafischen Programmierumgebung des Tools LabVIEW implementiert. Die Programmiersprache Python wurde dazu als Unterstützung verwendet.

Im ersten Teil der Arbeit wurden der generelle Aufbau und die Funktionsweise von PEM-Brennstoffzellen behandelt. Neben der elektrochemischen Gesamtreaktion wurden anschaulich die einzelnen funktionellen Einheiten der Brennstoffzelle dargestellt und erklärt. Im nächsten Schritt wurde der Simulationsansatz ausgewählt. Für die Auswahl des Ansatzes wurden die Optionen zur mathematischen Modellierung recherchiert, bereits durchgeführte Arbeiten zum Thema aufgezeigt und ein Lastenheft entwickelt. Weiterhin wurden die physikalischen, chemischen und mathematischen Grundlagen diskutiert. Die Thermodynamik von PEMBZ, die Spannungsverluste während des Betriebes und die Bilanzierung des PEMBZ wurden hier erklärt. Zusätzlich wurde ein Membranmodell beschrieben und die dynamischen Vorgänge, die für diese Arbeit relevant sind, integriert. Diese sind die Helmholtz Doppelschicht und die Dynamik des Verdichters. Ein Temperaturmodell wurde nicht hinzugefügt. Mit dem Abschluss der Grundlagen konnte das Modell dann in LabVIEW mit Hilfe von Python implementiert werden. Es wurden sowohl ein rein statisches wie auch ein dynamisches Modell zusammengestellt und anschaulich abgebildet. Im Folgenden Kapitel wurden, im Hinblick auf die Validierung des Modells, Sprungantworten des Simulationsmodells auf verschiedene Lastsprünge aufgenommen und diskutiert. Diese Lastsprünge wurden zum einen durch positive Stromsprünge umgesetzt, zum anderen durch negative Stromsprünge initiiert. Im letzten Teil der Arbeit wurde das Modell mittels praktischer Messreihen validiert. Das statische Modell wurde mit der Strom-Spannungs-Kennlinie des Herstellers Horizon, der eine 100 W PEMBZ herstellt, verglichen. Das dynamische Modell wurde anhand von Messreihen, die aus der Arbeit [33] aufgenommen wurden, validiert.

9. Ausblick auf Verbesserungsmöglichkeiten

Auch wenn das Simulationsmodell das dynamische und statische Verhalten einer PEMBZ in guter Näherung abschätzen kann, besteht viel Raum zur Verbesserung bzw. viele Möglichkeiten für spätere Arbeiten.

Der größte Schritt, um das Modell bedeutend zu verbessern, wäre die Integration eines Temperaturmodells. Im jetzigen Zustand wird die Stacktemperatur als konstanter Eingangsparameter angenommen. Während des Betriebes kommt es jedoch mitunter zu starken Schwankungen der Temperatur. Diese Schwankung hat gravierenden Einfluss auf das Verhalten der Aktivierungsverluste, der Konzentrationsverluste und den ohmschen Überspannungen, gerade bei längeren Simulationszeiten. Des Weiteren wäre es vorteilhaft, das elektrische Ersatzschaltbild für die Doppelschicht zu verbessern. Hier besteht noch viel Potential nach oben, um z.B. langzeitdynamische Vorgänge abzubilden.

Auch im Bereich des Stofftransportes kann das Modell noch verbessert werden. Hierzu zählt das Diffusionsmodell. Bei dem Ansatz der binären Fickschen Diffusion handelt es sich um ein eher ungenaues Modell. Ansätze wie die Stefan-Maxwell Gleichung können den Vorgang der Diffusion deutlich genauer beschreiben. Zusätzlich könnte die Konvektion in den Gaskanälen beachtet werden.

Eine große Vereinfachung des Modells besteht darin, dass im gesamten System das Wasser in gasförmigem Zustand angenommen wird. In der aktuellen Forschung werden vermehrt Zweiphasenströmungsmodelle von Wasser untersucht, und könnten das Modell deutlich verbessern.

Kleinere Verbesserungen könnten die Integration der Stöchiometrie, die in dieser Arbeit nicht behandelt wird, oder andere Betrachtungen wie der Wasserstoffverbrauch oder der Feuchtegehalt der Luft als Eingangsgröße sein.

Ein weiterer Nachteil besteht in der Simulationszeit des Modells. Einige Messreihen, gerade die des dynamischen Modells, nahmen einige Zeit in Anspruch. Dies wirft die Frage auf, ob das simultane Verwenden von LabVIEW und Python hierfür verantwortlich ist. Wahrscheinlich ist es von Vorteil, sich für eins der beiden Programme zu entscheiden, um Echtzeitsimulationen zu ermöglichen.

Der letzte Punkt ist die Verbesserung des Lüftermodells. In der Literatur ließen sich wenig bis keine Motorkennwerte und -daten zu kleinen Lüftern finden. Um das Verhalten des Verdichters genauer abzubilden, kann in Zukunft ein größerer Verdichter inklusive Kennzahlen integriert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Kurzweil, P.: Brennstoffzellentechnik, 2. Auflage, Springer Verlag, 2013
- [2] Schmidt, A.: Technical Thermodynamics for Engineers, Springer Verlag, 2019
- [3] P. Kurzweil, P. Scheipers: Chemie, 9. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [4] VDI Wärmeatlas, Springer Verlag; Auflage: 10. Auflage (2006)
- [5] Löhn, H.: Leistungsvergleich von Nieder- und Hochtemperatur Polymerelektrolytmembran Brennstoffzellen – Experimentelle Untersuchungen, Modellierung und numerische Simulation, TU Darmstadt, 2010
- [6] Vath, A.: Dreidimensionale dynamische Modellierung und Berechnung von Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellensystemen, TU Darmstadt, 2009
- [7] Meiler, M.: Entwicklung eines dynamischen Modells für einen Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen-Stack mittels experimenteller Systemidentifikation, Universität Ulm, 2013
- [8] Schmidt, A.: Skript: Batterietechnik (Teil: Systemmodellierung), HAW Hamburg, 2020
- [9] Lohniger, F.: Dynamic Modeling of PEM Fuel Cells“, TU Wien, 2014
- [10] LO Vasquez. Fuel cell research trends. Nova Publishers, 2007.
- [11] Papula, L.: Mathematische Formelsammlung, Springer Vieweg, 2014
- [12] Struckmann, T.: Skript: Batterietechnik, HAW Hamburg, 2020
- [13] Spiegel, C.: PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB®,
- [14] Smolinka, T.: Untersuchungen an einer mit Reformat betriebenen PEM-Brennstoffzelle, Universität Ulm, 2005
- [15] Zaidy, A. et. al.: Dynamic Modeling and Simulation of A PEM Fuel Cell: MATLAB and LabVIEW Modeling Approach, College of Engineering Pune, 2014
- [16] Seyezhai, R. et al.: Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell, International Journal of Computer Applications, 2011
- [17] Scarisbrick, C.: Simulation einer Brennstoffzelle und eines Metallhydridspeichers, TU Wien, 2019
- [18] Saleh, I. et al: Simplified mathematical model of proton exchange membranefuel cell based on horizon fuel cell stack, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016
- [19] H-100 fuel cell stack user manual, Horizon Educational, Paris, France, 2014
- [20] Stefener, M.: Praktikumsskript Brennstoffzellen, TU München, 2019
- [21] O`Hayre, R. et al.: Fuel Cell Fundamentals, Wiley, 2009
- [22] Barbir, F.: PEM Fuel Cells, Theory and Practice, Elsevier, 2013

-
- [23] Strahl, S. et al: Development and Experimental Validation of a Dynamic Thermal and Water Distribution Model of an Open Cathode Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Institut de Robotica i Informatica Industrial, Barcelona, 2010
- [24] Zhu, Y. et al: Simulation Study of PEM Fuel Cell and its Dynamic Characteristics in PSCAD/EMTDC, Ji Liu Research Center, 2011
- [25] Springer et al.: Polymer Electrolyte Fuel Cell Model, Journal of The Electrochemical Society, 1991
- [26] ebm papst: Produktdatenblatt 8412 N/2GLE, 2019
- [27] Ziegler, C.: Modeling and Simulation of the Dynamic Behavior of Portable Proton Exchange Membrane Fuel Cells, Universität Konstanz, 2005
- [28] Özbeck et al.: Modeling and control of a PEM fuel cell system: A practical study based on experimental defined component behavior, journal of process control, 2013
- [29] Zhang et al.: Dynamic modelling and simulation test of a 60 kW PEMFC generation system, Journal of Zhejiang University, 2011
- [30] Jung et al.: Dynamic Model of PEM Fuel Cell Using Real-time Simulation Techniques, Journal of Power Electronics, 2010
- [31] Pukrushpan et al.: simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow model, University of Michigan, 2002
- [32] Lee et al.: Modelling fuel cell stack systems, Journal of Power Sources, 1997
- [33] Zühr, P., Elsner, F.: Transiente Modellierung eines Brennstoffzellenstacks in Matlab/Simulink, HAW Hamburg, 2019
- [34] Ceraolo et al.: Modeling static and dynamic behaviour of proton exchange membrane fuel cells on the basis of electro-chemical description, Journal of Power Sources, 2002

Anhang

Anhang A: Berechnungsbeispiel Membranmodell

Zur Veranschaulichung des Membranmodells, soll hier ein Berechnungsbeispiel aufgeführt werden. Folgende Parameter wurden für die Berechnung verwendet:

Parameter für das Berechnungsbeispiel:

Parameter	Wert
i [A/cm^2]	0,2
A_{FC} [cm^2]	22,5
T [K]	318,15
R_M [J/mol K]	8,3143
F [C/mol]	96485
p_A [bar]	0,5
p_K [bar]	1
p_{SAT} [bar]	0,0948
$x_{H_2O,A,G}$ [-]	0,1
$x_{H_2O,K,G}$ [-]	0,1
D_{H_2,H_2O}^{eff} [cm^2/s]	0,204
D_{O_2,H_2O}^{eff} [cm^2/s]	0,020
δ [cm]	0,02
n_{drag}^{sat} [-]	2,5
M_m [kg/mol]	1
ρ_{tr} [kg/cm ³]	0,00197
l_{mem} [cm]	0,0125
D_λ [cm^2/s]	$3,81 \cdot 10^{-6}$

Um das die Konstanten β und C zu bestimmen, werden die Gleichungen (5.20) und (5.21) aufgestellt.

$$\lambda_A = 4,4 \beta + C = 14 \frac{p_A}{p_{SAT}} \left(x_{H_2O,G}^A - \delta \frac{\beta i R_M T}{2 F p_A D_{H_2,H_2O}^{eff}} \right)$$

$$\lambda_K = 4,4 \beta + C \exp \left(\frac{i M_m n_{drag}^{sat}}{22 F \rho_{tr} D_\lambda} l_{mem} \right) = 12,6 + 1,4 \frac{p_K}{p_{SAT}} \left(x_{H_2O,G}^K - \delta \frac{(1 + \beta) i R_M T}{2 F p_K D_{O_2,H_2O}^{eff}} \right)$$

Nach Einsetzen der Parameter aus der oberen Tabelle, vereinfachen sich diese zu:

$$\lambda_A = 4,4 \beta + C = 7,387 - 0,994 \beta$$

$$\lambda_K = 4,4 \beta + C 2,293 = 13,674 - 1,074 \beta$$

Anhand dieser kann das LGS mit 2 Gleichungen und 2 Unbekannten eindeutig aufgelöst werden. Die Ergebnisse in diesem Fall lauten:

$$\beta = 0,473$$

$$C = 4,833$$

Nun werden die eben berechneten Konstanten in die Gleichung (5.9) eingesetzt.

$$\lambda(x) = \frac{11 \beta}{n_{drag}^{sat}} + C \exp\left(\frac{i M_m n_{drag}^{sat}}{22 F \rho_{tr} D_\lambda} x\right)$$

Diese wird wiederum in die Gleichung (5.4) eingesetzt.

$$\sigma(T, \lambda) = (0,005193 \lambda - 0,00326) \exp\left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

Daraus ergibt sich die folgende Beziehung für die Leitfähigkeit der Membran:

$$\sigma(T, \lambda) = 0,009 + 0,031 \exp(66,408 x)$$

Abschließend wird die Leitfähigkeit in die Gleichung (5.3) zur Bestimmung des Widerstandes der Membran gesetzt. Mit Hilfe des Stammintegrals aus [11] kann die Integration einfach durchgeführt werden.

$$\begin{aligned} R_{ion} &= \frac{1}{A_{FC}} \int_{x=0}^{x=l_{mem}} \frac{dx}{\sigma[T, \lambda]} \\ &= 0,01013 \text{ [ohm]} \end{aligned}$$

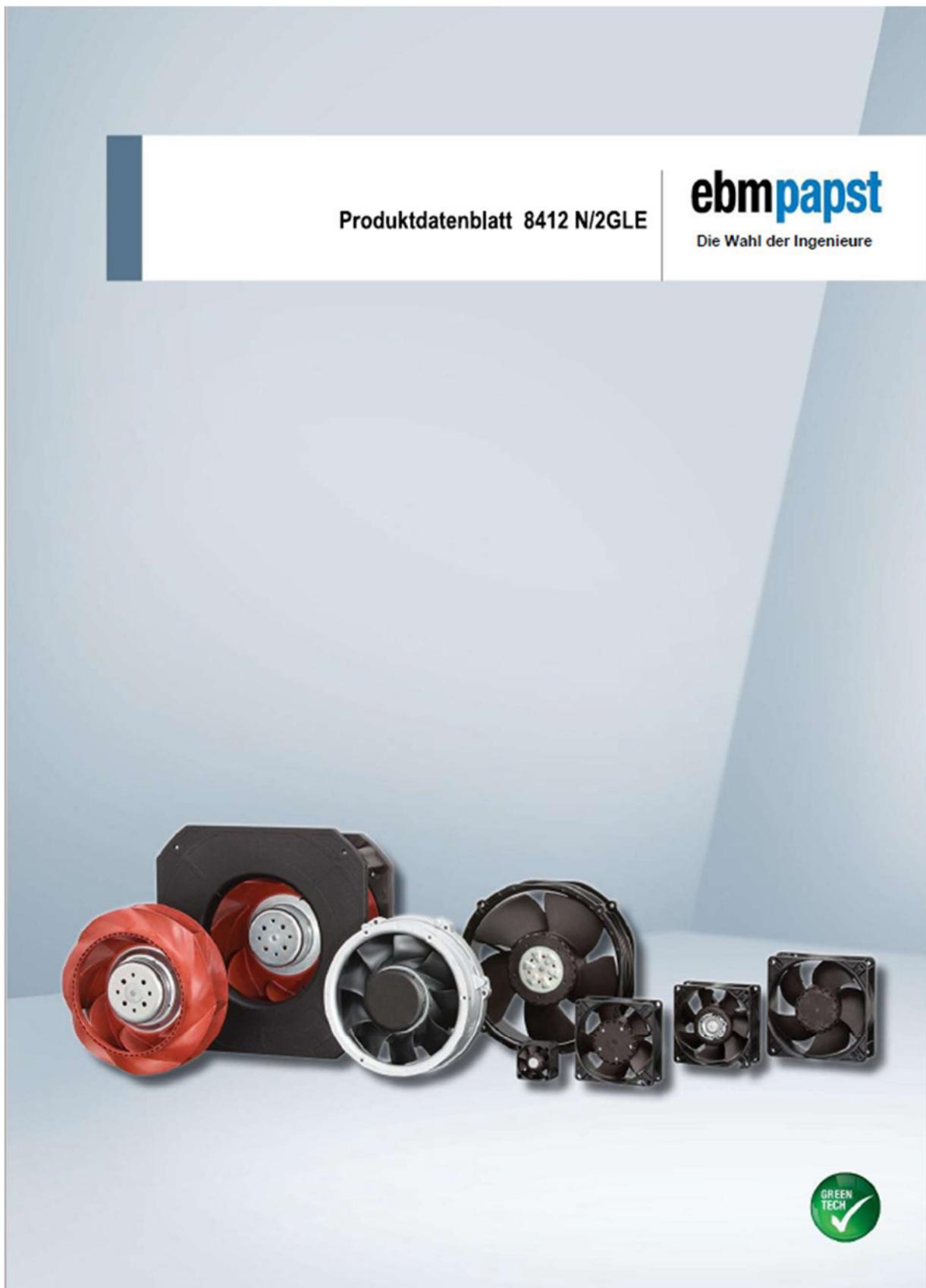
Der ohmsche Widerstand kann dann mittels des fließenden Stromes berechnet werden.

$$\begin{aligned} U_{ohm} &= R_{ion} i A \\ &= 0,0456 \text{ [V]} \end{aligned}$$

Anhang B: Stofftabelle aus [21]

Kritische Werte von Gasen

Stoff	Molares Gewicht (M)	T_{krit} (K)	p_{krit} (bar)
H_2	2,016	33,3	12,80
<i>Luft</i>	28,964	132,4	37,0
N_2	28,013	126,2	33,5
O_2	31,999	154,4	49,7
CO	28,010	132,9	34,5
CO_2	44,010	304,2	72,8
H_2O	18,015	647,3	217,5



8412 N/2GLE

INHALT

1	Allgemeines	3
2	Mechanik	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Anschluss.....	3
3	Betriebsdaten.....	4
3.1	Elektrische Betriebsdaten	4
3.2	Elektrische Schnittstelle - Ausgang	5
3.3	Elektrische Merkmale	5
3.4	Aerodynamik.....	6
3.5	Akustik	7
4	Umwelt.....	7
4.1	Allgemein	7
4.2	Klimatische Anforderungen.....	7
5	Sicherheit	8
5.1	Elektrische Sicherheit	8
5.2	Sicherheitszulassung.....	8
6	Zuverlässigkeit	8
6.1	Allgemein	8

1 Allgemeines

Lüfterart	Axial	
Drehrichtung auf Rotor gesehen	Links	
Förderrichtung	Über Stege blasend	
Lagerung	Gleitlager	
Einbaulage - Welle	Beliebig	

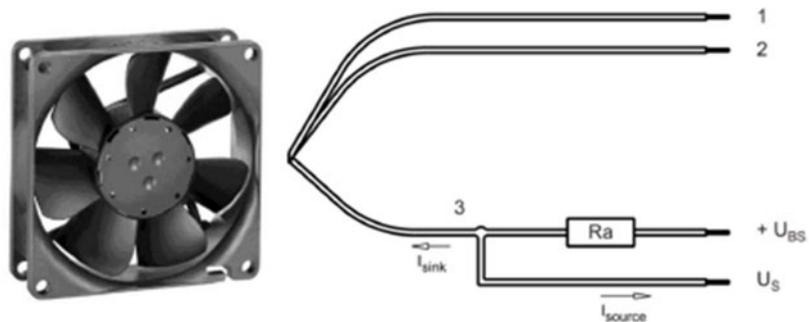
2 Mechanik

2.1 Allgemeines

Breite	80,0 mm	
Höhe	80,0 mm	
Tiefe	25,4 mm	
Gewicht	0,095 kg	
Gehäusewerkstoff	Kunststoff	
Flügelradwerkstoff	Kunststoff	
Max. Anzugsmoment bei Montage über beide Befestigungsflansche	Litzenausführungsecke: 50 Ncm Restliche Ecken: 70 Ncm	
Schraubengröße	ISO 4762 - M4 entfettet, ohne zusätzliche Abstützung und ohne Unterlegscheibe	

2.2 Anschluss

Elektrischer Anschluss	Einzellitzen	
Leitungslänge	L = 310 mm	
Toleranz	+/- 10,0 mm	



Litze	Farbe	Funktion	Litzenquerschnitt	Isolationsdurchmesser
1	rot	+ UB	AWG 24	1,55 mm
2	blau	- GND	AWG 24	1,55 mm
3	weiß	Tacho	AWG 24	1,55 mm

Die in der Anschlusszeichnung zusätzlich dargestellten und für den Gebrauch erforderlichen externen Bauteile sind nicht im Lieferumfang enthalten.

3 Betriebsdaten

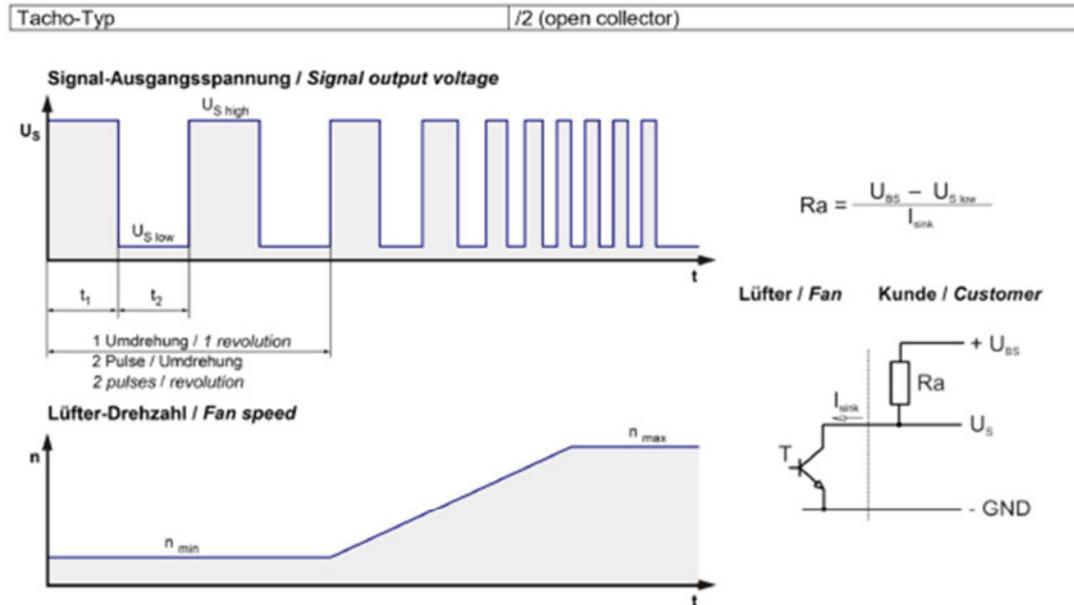
3.1 Elektrische Betriebsdaten

Messbedingungen: Normalluftdichte = 1,2 kg/m³; TU = 23°C +/- 3°C; Motorachse waagrecht; Einlaufzeit bei jeder Einstellung 5 Minuten (wenn nicht anders spezifiziert). Im Ansaug- und Ausblasbereich darf im Abstand von 0,5 m kein massives Hindernis angeordnet sein.

$\Delta p = 0$: entspricht freiblasend (siehe Kapitel Aerodynamik)
I: entspricht arithm. Strommittelwert

Merkmale	Bedingung	Symbol	Werte		
Spannungsbereich		U	8,0 V		15,0 V
Nennspannung		U_N		12,0 V	
Leistungsaufnahme	$\Delta p = 0$	P	0,2 W	0,45 W	0,7 W
Toleranz	0010		+/- 17,5 %	+/- 12,5 %	+/- 15,0 %
Stromaufnahme	$\Delta p = 0$	I	29 mA	37 mA	47 mA
Toleranz	0010		+/- 17,5 %	+/- 12,5 %	+/- 15,0 %
Drehzahl	$\Delta p = 0$	n	910 1/min	1.500 1/min	1.900 1/min
Toleranz	0010		+/- 12,5 %	+/- 10,0 %	+/- 10,0 %
Anlaufstrom				< 100 mA	

3.2 Elektrische Schnittstelle - Ausgang

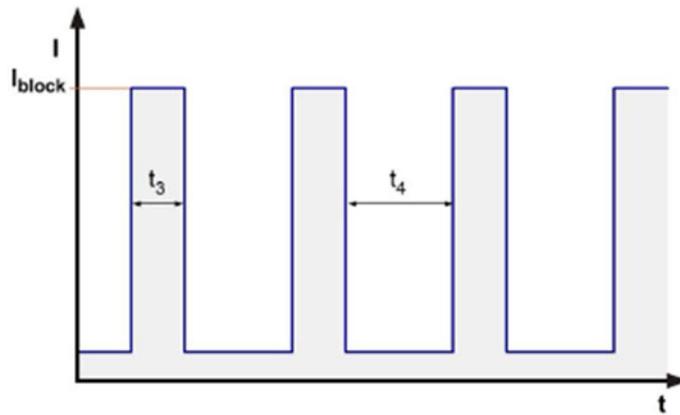


Merkmale	Bemerkung	Werte
Tachobetriebsspannung	U_{BS}	Min.: 4 V Max.: 30 V
Tachosignal Low	$U_{S,low}$	$\leq 0,4 \text{ V}$
Tachosignal High	$U_{S,high}$	30 V
Maximaler Sink-Strom	I_{sink}	$\leq 4 \text{ mA}$
Externer Arbeitswiderstand	Externer Arbeitswiderstand R_a von U_{BS} nach U_S erforderlich. Alle Spannungen gegen GND gemessen.	
Tachofrequenz	$(2 \times n) / 60$	
Galvanisch getrennter Tacho	Nein	
Flankensteilheit		$\Rightarrow 0,5 \text{ V/us}$

n = Drehzahl pro Minute (1/min)

3.3 Elektrische Merkmale

Elektronikfunktion	Keine	
Verpolschutz	Verpolschutzdiode	
Max. Falschpolstrom bei U_N	$I_F \leq 50 \text{ uA}$	
Blockierschutz	Elektronischer Wiederanlauf	
Blockierstrom bei U_N	I_{block} ca. 100 mA	
Blockiertakt	t_3 / t_4 typisch: 1,0 s / 5,0 s	



3.4 Aerodynamik

Messbedingungen: Gemessen mit einem saugseitigen Doppelkammerprüfstand nach DIN EN ISO 5801.
 Normalluftdichte = $1,2 \text{ kg/m}^3$; $T_U = 23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$;
 Im Ansaug- und Ausblasbereich darf im Abstand von $0,5 \text{ m}$ kein massives Hindernis angeordnet sein. Motorachse waagrecht.
 Die Angaben gelten nur unter den angegebenen Messbedingungen und können sich durch die Einbaubedingungen verändern. Bei Abweichungen zum Normaufbau sind die Kennwerte im eingebauten Zustand zu überprüfen.

a.) Betriebsbedingung:

1.500 1/min freiblasend	
Max. freiblasender Volumenstrom ($\Delta p = 0 / \dot{V} = \text{max.}$)	30,0 m ³ /h
Max. Staudruck ($\Delta p = \text{max.} / \dot{V} = 0$)	10 Pa

3.5 Akustik

Messbedingungen: Schalldruckpegel: Der Abstand des Mikrofons zur Ansaugöffnung beträgt 1 m.
Schalleistung: Nach DIN 45635 Teil 38 (ISO 10302)
Gemessen im reflektionsarmen Raum mit einem Grundschaallpegel von $L_p(A) < 5$ dB(A).
Weitere Messbedingungen siehe Kapitel Aerodynamik.

a.) Betriebsbedingung:

1.500 1/min freiblasend		
Optimaler Betriebspunkt	30,0 m ³ /h @ 0 Pa	
Schalleistung im optimalen Betriebspunkt	3,5 bel(A)	
Schalldruck in Gummiseilen freiblasend	12,0 dB(A)	

4 Umwelt

4.1 Allgemein

Minimal zulässige Umgebungstemperatur TU min.	-20 °C	
Maximal zulässige Umgebungstemperatur TU max.	85 °C	
Minimal zulässige Lagerungstemperatur TL min.	-40 °C	
Maximal zulässige Lagertemperatur TL max.	85 °C	

4.2 Klimatische Anforderungen

Feuchteanforderung	Feuchte Wärme, konstant; gemäß DIN EN 60068-2-78, 14 Tage	
Wasserbelastungen	Keine	
Staubanforderungen	Keine	
Salznebelanforderungen	Keine	

Zulässiger Einsatzbereich:

Das Produkt ist für den Einsatz in geschlossenen, wettergeschützten Räumen, mit kontrollierter Temperatur und Feuchte bestimmt. Direkte Wassereinwirkung ist zu vermeiden.

Verschmutzungsgrad 1 (gemäß DIN EN 60664-1)

Es tritt keine oder nur trockene, nicht leitfähige Verschmutzung auf. Die Verschmutzung hat keinen Einfluss.

Schärfgrade und Spezifikationswerte bei den zuständigen Entwicklungsabteilungen anfragen.

5 Sicherheit

5.1 Elektrische Sicherheit

Spannungsfestigkeit DIN EN 60950 (VDE 0805) und DIN EN 60335 (VDE 0700) A.) Typprüfung Messbedingungen: Nach 48h Lagerung bei 95% r.F. und 25°C. Hierbei darf kein Überschlag oder Durchschlag erfolgen. Alle Anschlüsse gemeinsam gegen Masse! B.) Stückprüfung Messbedingung: Bei Raumklima. Hierbei darf kein Überschlag oder Durchschlag erfolgen. Alle Anschlüsse gemeinsam gegen Masse!	Entfällt Entfällt	
Isolationswiderstand Messbedingung: Nach 48h Lagerung bei 95% r.F. und 25°C gemessen mit U=500 VDC/1 Min.	RI > 10 MOhm	
Luft und Kriechstecken	1,0 mm / 1,2 mm	
Schutzklasse	III	

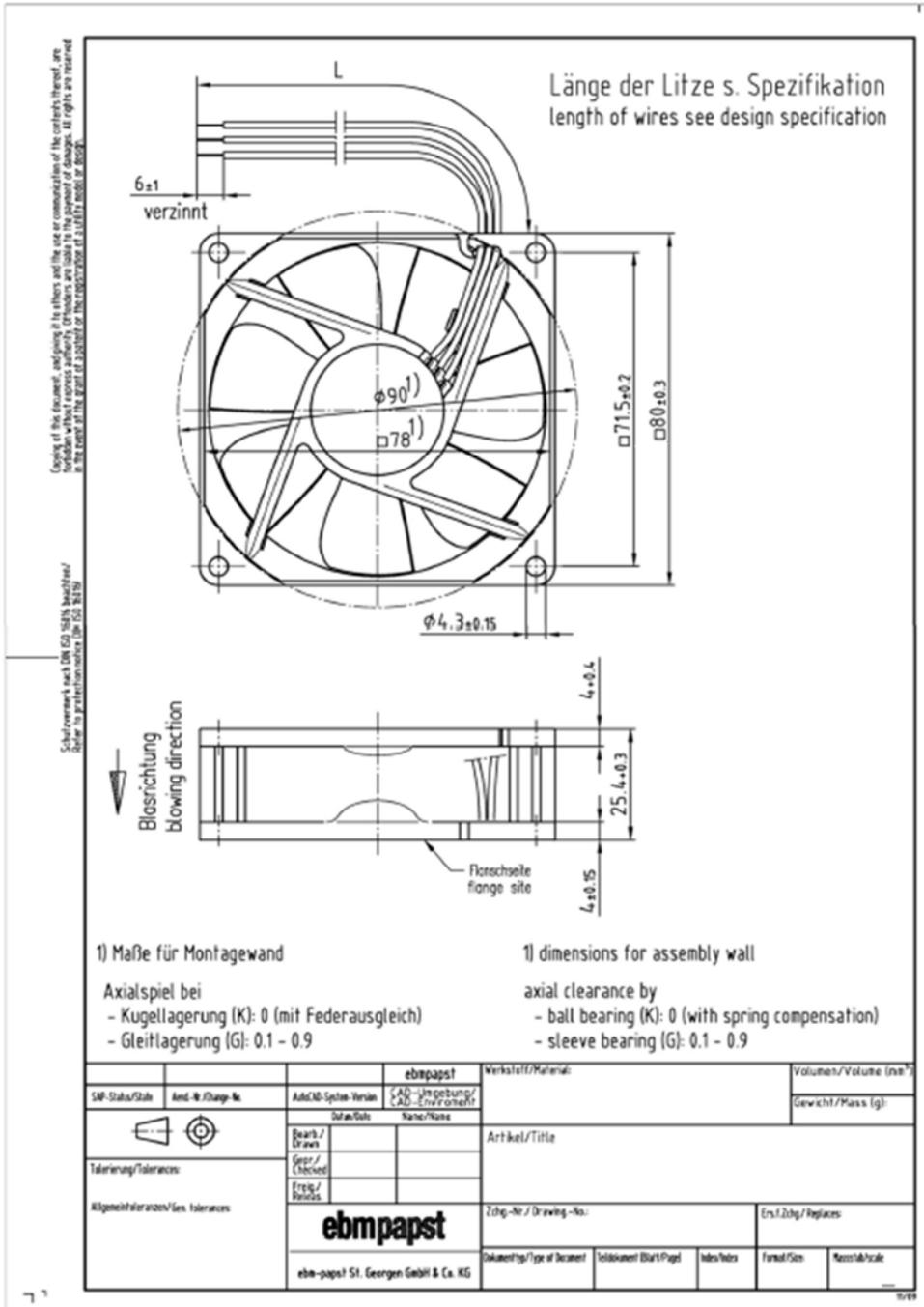
5.2 Sicherheitszulassung

CE	EG-Konformitätserklärung	Ja
EAC	Eurasische Konformität	Ja
UL	Underwriters Laboratories	Ja / UL507, Electric Fans
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik	Ja / Zulassung nach EN 60950 (VDE 0805) - Einrichtungen der Informationstechnik
CSA	Canadian Standards Association	Ja / C22.2 No. 113 Fans and Ventilators
CCC	China Compulsory Certification	Nicht gefordert

6 Zuverlässigkeit

6.1 Allgemein

Lebensdauer L10 bei TU = 40 °C	80.000 h	
Lebensdauer L10 bei TU max.	20.000 h	
Lebensdauer L10 nach IPC 9591 bei TU = 40 °C	135.000 h	





Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Mohrdick

Vorname: Jesse

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Simulation des dynamischen Verhaltens einer PEM-Brennstoffzelle unter Verwendung des Programmes LabVIEW®

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

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

16.05.2022

Datum


Unterschrift im Original