



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Konstantinos Psomas

**Konzeptionierung eines vorlesungsbegleitenden Labores zum
Modul “Electrochemical Energyconversion/ Fuel cell systems“
des Masterstudiengangs “Nachhaltige Energiesysteme im
Maschinenbau“**

Konstantinos Psomas

**Konzeptionierung eines
vorlesungsbegleitenden Labores zum Modul
“Electrochemical Energyconversion/ Fuel cell
systems“ des Masterstudiengangs
“Nachhaltige Energiesysteme im
Maschinenbau“**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

Erstprüfer: Professor Dr.-Ing Achim Schmidt
Zweitprüfer: Dipl.-Ing Alexander v. Stryk

Abgabedatum: 22.05.2017

1. Kurzfassung

Kurzfassung

Zur Vertiefung der theoretischen Grundlagen einer PEM Brennstoffzelle, ist im Rahmen des Moduls „Electro-chemical Energy Conversion - Fuel Cell Systems“ ein Laborpraktikum vorgesehen, welches den Studenten die elektrochemischen und thermodynamischen Vorgänge anhand selbst durchzuführender Versuche verdeutlichen soll. Diese Arbeit ist als Fortführung der Bachelorarbeit Peter Kuhns zur „Erarbeitung eines Brennstoffzellen-Versuchsstandes“, aus dem Jahr 2015, sowie auch der Studienarbeit von Stephen Holway mit dem Thema „Experimentelle Ermittlung von Kennwerten bei verschiedenen Betriebsparametern an der PEM Brennstoffzelle“ aus dem Jahr 2016 zu sehen. Ziel der Arbeit ist die Erstellung einer Versuchsbeschreibung für das vorlesungsbegleitende Labor. Das Labor soll aus mehreren Teilversuchen bestehen, welche den Studenten einen umfassenden Einblick in die Vorgänge einer Brennstoffzelle bieten. Bereits vorgeschlagene Versuche aus studentischen Vorarbeiten sollen dazu am Versuchstand umgesetzt werden und über thermodynamische Auswertungen auf Eignung zur Durchführung im Labor bewertet werden.

Abstract

In order to deepen the theoretical principles of a PEM fuel cell, there is provided a practical laboratory within the scope of the module „Electro-chemical Energy Conversion - Fuel Cell Systems“ to the students. The electrochemical and thermodynamic processes of a PEM fuel cell shall be clarified by means of experiments. This work is a continuation of the bachelor thesis of Peter Kuhn on the „Development of a Fuel Cell Test Station“, from the year 2015, as well as the study work of Stephen Holway with the topic „Experimental Determination of Parameters at Different operating parameters at the PEM fuel cell“ from 2016. The aim of the thesis is the preparation of an experiment description for the lecture accompanying laboratory. The laboratory will consist of several partial experiments, which give the students a comprehensive insight into the processes of a fuel cell. Already proposed experiments from student works have to be implemented on the test stand. The selection of the experiments will be based on the thermodynamic evaluation of the test results.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	I
	Abbildungsverzeichnis	V
	Tabellenverzeichnis	IX
	Formelzeichen, Symbole und Indizes	X
2	Einleitung	1
3	Grundlagen der Brennstoffzellentechnologie	2
3.1	Funktionsweise der Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle	3
3.1.1	Thermoneutrale Spannung	5
3.1.2	Standardpotential	6
3.1.3	Nernstspannung	7
3.1.4	Wirkungsgrade	8
4	Versuchsstand	11
4.1	Geräteaufbau	11
4.1.1	Bedienung	13
5	Einflussfaktoren und Betriebsparameter	17
5.1	Stromstärke	17
5.1.1	Theorie	17
5.1.1.1	Durchtrittsüberspannung	18
5.1.1.2	Ohmscher Bereich	19
5.1.1.3	Diffusionsüberspannung	19
5.1.2	Praxis	20
5.1.3	Vergleich Theorie/Praxis	22
5.1.3.1	Diffusionsüberspannung	25
5.1.3.2	Durchtrittsüberspannung	29
5.1.3.3	Ohmscher Bereich	30
5.1.3.4	Wirkungsgrade	31
5.1.4	Eignung zur Labordurchführung	38
5.2	Brennstoffzellenkühlung/Brennstoffzellentemperatur	39

5.2.1	Kühlung	39
5.2.2	Temperatur	39
5.2.3	Praxis	41
5.2.4	Vergleich Theorie und Praxis	46
5.2.4.1	Austauschstromdichte i_0	46
5.2.4.2	reversible Spannung	48
5.2.4.3	Membranfeuchte	48
5.2.5	Eignung zur Labordurchführung	52
5.3	Volumenstrom und Stöchiometrie	53
5.3.1	Theorie	53
5.3.1.1	Volumenstrom	53
5.3.1.2	Gasumsatz und Stöchiometrie	54
5.3.2	Praxis	55
5.3.3	Vergleich Theorie und Praxis	57
5.3.4	Eignung zur Labordurchführung	59
5.4	Bereitstellungsart der Brennstoffe	59
5.4.1	Theorie	60
5.4.2	Praxis	60
5.4.3	Vergleich Theorie und Praxis	63
5.4.3.1	Membranfeuchte	63
5.4.3.2	Partialdruck	64
5.4.3.3	Anodentemperatur	66
5.4.3.4	Leerlaufspannung	67
5.4.4	Eignung zur Labordurchführung	71
5.5	Befeuchtung	71
5.5.1	Theorie	71
5.5.1.1	Externe Gasbefeuchtung	72
5.5.1.2	Interne Befeuchtung	72
5.5.2	Praxis	73
5.5.3	Vergleich Theorie und Praxis	76
5.5.3.1	Temperatureinfluss	79
5.5.3.2	Zeitverlauf	80
5.5.4	Eignung zur Labordurchführung	81

6 Labor	82
6.1 zu untersuchende Effekte/Größen	82
6.1.1 Anfangsbedingungen	82
6.2 Laborskript	83
6.2.1 Einleitung	83
6.2.2 Theoretische Grundlagen	83
6.2.2.1 Leerlaufbetrieb der Brennstoffzelle	83
6.2.2.2 Strombetrieb der Brennstoffzelle	86
6.2.2.3 Kühlung	89
6.2.2.4 Temperatur	89
6.2.2.5 Eduktzufuhr	91
6.2.2.6 Befeuchtung	93
6.2.2.7 Wirkungsgrade	94
6.2.3 Versuchsaufbau	96
6.2.3.1 Versuchsstand	96
6.2.3.2 Bedienung	98
6.2.4 Versuchsvorbereitung	101
6.2.5 Versuchsdurchführung	101
6.2.5.1 U-I-Kennlinie	101
6.2.5.2 Brennstoffzusammensetzung	102
6.2.5.3 Eduktzufuhr	102
6.2.5.4 U-I-Kennlinie bei höherer Temperatur	103
6.2.5.5 U-I-Kennlinie unter Wasserstoffbefeuchtung	103
6.2.6 Versuchsauswertung	103
6.2.7 Versuchsergebnisse	105
6.2.7.1 U-I-Kennlinien	105
6.2.7.2 Brennstoffzellenkühlung	116
6.2.7.3 Wasserstoffzufuhr	123
7 Fazit	126
Literatur	127
Anhang	129
A Matlab-Codes	129

A.1 U-I-Kennlinien . . . . .	.129
A.2 U-I-Kennlinien Vergleich . . . . .	.132
A.3 dU/dI . . . . .	.136
A.4 $U(\lambda_{H_2})$ . . . . .	.138
A.5 $U(\lambda_{N_2})$ . . . . .	.139
A.6 $U(P_{Lüfter})$ . . . . .	.141
A.7 Zeitverläufe . . . . .	.143
A.8 Wirkungsgrade . . . . .	.144
A.9 Wirkungsgrade Vergleich . . . . .	.147
B.1 CD mit Text als .pdf-Datei . . . . .	.152
C.1 Selbstständigkeitserklärung . . . . .	.153

Abbildungsverzeichnis

3.1	Wirkprinzip einer PEM-Brennstoffzelle [6]	4
3.2	Wasserstoffoxidation unter Standardbedingungen [7]	7
4.1	Versuchsstand	11
4.2	Versuchsstand Draufsicht	11
4.3	Hauptfenster	14
4.4	Datenfenster	15
5.1	U-I-Kennlinie einer Brennstoffzelle [7]	17
5.2	$U(I, i_0)$ [2]	19
5.3	1. aufgenommene P-I-Kennlinie	21
5.4	1. aufgenommene U-I-Kennlinie	21
5.5	U-I- und dU/dI -Verlauf der 1. Messreihe	22
5.6	dU/dI ohmscher Bereich	23
5.7	$U(t)$ bei $I=7$ A	25
5.8	2. aufgenommene U-I-Kennlinie	26
5.9	U-I- und dU/dI -Verlauf der 2. Messreihe	26
5.10	3. aufgenommene U-I-Kennlinie	27
5.11	U-I- und dU/dI -Verlauf 3. Messreihe	27
5.12	U-I-Kennlinien Vergleich	28
5.13	T-I-Kennlinien Vergleich	30
5.14	Ohmsche Bereiche Vergleich	31
5.15	$\eta_U(I)$ der 1. Messreihe	32
5.16	$\eta_U(I)$ Vergleich	32
5.17	$\eta_I(I)$ der 1. Messreihe	33
5.18	$\eta_I(I)$ der 1. Messreihe in vergrößerter Ansicht	34
5.19	$\eta_I(I)$ mit und ohne Befeuchtung vergrößert	35
5.20	$\eta_I(I)$ Vergleich	36

5.21	$\eta_{FC}(I)$ der 1. Messreihe	37
5.22	$\eta_{FC}(I)$ Vergleich	38
5.23	$\eta(T)$ -Vergleich Brennstoffzelle/Wärme-Kraft-Prozess	40
5.24	$U(P_{Lüfter})$ bei $I=4$ A	42
5.25	$U(P_{Lüfter})$ bei $I=4$ A vergrößert	42
5.26	$T(P_{Lüfter})$ bei $I=4$ A	43
5.27	$T(P_{Lüfter})$ bei $I=4$ A vergrößert	43
5.28	$U(P_{Lüfter})$ bei $I=6$ A	44
5.29	$T(P_{Lüfter})$ bei $I=6$ A	44
5.30	2. $U(P_{Lüfter})$ bei $I=6$ A	45
5.31	2. $T(P_{Lüfter})$ bei $I=6$ A	46
5.32	relative Feuchte der Austrittsluft [2]	50
5.33	relative Austrittsluftfeuchte [2]	51
5.34	$U(t)$ bei konstanter Lüfterleistung	52
5.35	$U(\lambda_{H_2})$ bei $I=1$ A	55
5.36	$U(\lambda_{H_2})$ bei $I=1$ A vergrößert	56
5.37	$U(\lambda_{H_2})$ bei $I=2$ A	56
5.38	$U(\lambda_{H_2})$ bei $I=2$ A vergrößert	57
5.39	$\eta_{FC}(\lambda_{H_2})$	58
5.40	$\eta_U(\lambda_{H_2})$	58
5.41	$\eta_I(\lambda_{H_2})$	59
5.42	$U(\lambda_{N_2})$ bei $I=1A$	61
5.43	$U(\lambda_{N_2})$ bei $I=2A$	62
5.44	$T(\lambda_{N_2})$ bei $I=2A$	63
5.45	$U(t)$ bei $\lambda_{N_2}=4$	64
5.46	$\eta_{FC}(\lambda_{N_2})$	66
5.47	$U(\lambda_{N_2})$ bei $I=0A$	67
5.48	$T(\lambda_{N_2})$ bei $I=0$ A	68
5.49	$U_0(t)$ unter Stickstoffbeimischung	69
5.50	$U_0(t)$ bei Stickstoffabschaltung	70
5.51	Externe Eduktbefeuchtung [1]	72
5.52	U-I-Kennlinie bei Befeuchtung	73
5.53	U-I-Kennlinie ohne Befeuchtung	74
5.54	U-I-Kennlinie mit und ohne Befeuchtung	75

5.55	Ohmscher Bereich mit und ohne Befeuchtung	75
5.56	$\eta_U(I)$ mit und ohne Brennstoffbefeuchtung	76
5.57	$\eta_{FC}(I)$ mit und ohne Befeuchtung	77
5.58	$\eta_i(I)$ mit und ohne Befeuchtung	77
5.59	R_i ohne externe Wasserstoffbefeuchtung	78
5.60	R_i unter externer Wasserstoffbefeuchtung	78
5.61	T-I-Kennlinie mit und ohne Befeuchtung	80
5.62	U(t) unter Befeuchtung bei I=8 A	81
6.1	Wasserstoffoxidation unter Standardbedingungen [7]	85
6.2	U-I-Kennlinie einer Brennstoffzelle [7]	86
6.3	U(I, i_0) [2]	88
6.4	$\eta(T)$ -Vergleich Carnot/Wärme-Kraft-Prozess	90
6.5	Externe Eduktbefeuchtung [1]	93
6.6	Versuchsstand	96
6.7	Versuchsstand Draufsicht	96
6.8	Bedienfenster	99
6.9	Datenfenster	100
6.10	Austrittsluftfeuchte rH [2]	104
6.11	Luftfeuchte rH [2]	104
6.12	U-I-Kennlinie ohne externe Wasserstoffbefeuchtung	105
6.13	U-I-Kennlinie ohne externe Wasserstoffbefeuchtung unter höherer Temperatur	106
6.14	U-I-Kennlinie unter externer Wasserstoffbefeuchtung	106
6.15	U-I-Kennlinie bei unterschiedlichen Brennstoffzellentemperaturen	107
6.16	R_i ohne externe Wasserstoffbefeuchtung unter niedriger Temperatur	108
6.17	R_i ohne externe Wasserstoffbefeuchtung unter hoher Temperatur	108
6.18	T-I-Kennlinien	109
6.19	U-I-Kennlinie mit und ohne Befeuchtung (niedrige Temperatur)	110
6.20	R_i unter externer Wasserstoffbefeuchtung	110

6.21	U-I-Kennlinie mit und ohne Befeuchtung (hohe Temperatur)	.111
6.22	T-I-Verläufe Vergleich	.111
6.23	$\eta_U(I)$ mit und ohne Befeuchtung	.112
6.24	$\eta_I(I)$ mit und ohne Befeuchtung	.113
6.25	$\eta_I(I)$ mit und ohne Befeuchtung vergrößert	.113
6.26	$\eta_I(I)$ mit und ohne Befeuchtung vergrößert	.114
6.27	$\eta_{FC}(I)$ mit und ohne Befeuchtung	.115
6.28	U(P)	.117
6.29	U(P) vergrößert	.117
6.30	T(P)	.118
6.31	relative Feuchte der Austrittsluft [2]	.120
6.32	relative Austrittsluftfeuchte [2]	.120
6.33	U(t) nach Senkung der Lüfterleistung bei I=9 A	.122
6.34	P(t) nach Senkung der Lüfterleistung bei I=9 A	.122
6.35	$\eta_{FC}(t)$ nach Senkung der Lüfterleistung bei I=9 A	.123
6.36	$U(\lambda_{H_2})$	.123
6.37	$U(\lambda_{H_2})$ vergrößert	.124
6.38	$\eta_I(\lambda_{H_2})$	.125
6.39	$\eta_{FC}(\lambda_{H_2})$	.125

Tabellenverzeichnis

5.1	Spannungsänderung 1. U-I-Kennlinie	22
-----	----------------------------------------------	----

Formelzeichen, Symbole und Indizes

Formelzeichen, Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	$\frac{mol}{min}$	katalytische Aktivität
E	V	Elektrodenpotential
E^0	V	Standardelektrodenpotential
F	$\frac{C}{mol}$	Faraday-Konstante
H_o	$\frac{kJ}{mol}$	Brennwert, oberer Heizwert
H_u	$\frac{kJ}{mol}$	Heizwert, unterer Heizwert
I	A	Stromstärke
i	$\frac{A}{cm^2}$	Stromdichte
i_0	$\frac{A}{cm^2}$	Austauschstromdichte
\dot{n}	$\frac{mol}{s}$	Stoffstrom
\dot{m}	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
\dot{V}	$\frac{l}{s}$	Volumenstrom
P	W	Leistung
P_{el}	W	elektrische Leistung
p	Pa/bar	Druck
p_s	Pa/bar	Sättigungsdruck
Q	C	elektrische Ladung
\dot{Q}	W	Wärmeleistung
R	$\frac{J}{molK}$	universelle Gaskonstante
R	W	elektrischer Widerstand
R_i	W	Innenwiderstand
S	$\frac{J}{mol}$	Entropie
t	$^{\circ}C$	Temperatur
T	K	absolute Temperatur
u	$-/\%$	Gasumsatz
U_{Nernst}	V	Nernstspannung

U_{th}	V	thermoneutrale Spannung, Heizwertspannung
U_{rev}^0	V	reversible Zellspannung
U_Z	V	Zellspannung
V	m^3	Volumen
V_n	m^3	Normvolumen
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
z	–	Anzahl ausgetauschter Elektronen pro Molekül
ΔG	$\frac{kJ}{mol}$	Gibb'sche freie Reaktionsenthalpie
ΔH^0	$\frac{kJ}{mol}$	Reaktionsenthalpie
η_{el}	–/%	elektrischer Wirkungsgrad
η_{FC}	–/%	Brennstoffzellen-Wirkungsgrad
η_H	–/%	Heizwert-Wirkungsgrad
η_I	–/%	Stromwirkungsgrad
η_{th}	–/%	thermodynamischer Wirkungsgrad
η_U	–/%	Spannungswirkungsgrad
λ	–	stöchiometrischer Faktor
M	$\frac{kg}{mol}$	stöchiometrischer Faktor
c_p	$\frac{kJ}{kgK}$	Druckbeiwert
α	–	Durchtrittsfaktor
x	–/%	Stoffmengenanteil

2. Einleitung

Mit der wachsenden Bedeutung nachhaltiger Energieversorgung werden effiziente Speichermethoden nachhaltiger Energien unumgänglich. Eine dieser Technologien stellt die energetische Speicherung in Form von Wasserstoff dar. Eine vielversprechende Anwendungsmöglichkeit des Wasserstoffs, zur CO₂-neutralen Stromerzeugung, sowohl im stationären, als auch mobilen Bereich, stellen Brennstoffzellen dar.

Um Studierenden des Masterstudiengangs "Nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau" einen praktischen Einblick in diese Technologie zu ermöglichen, ist im Rahmen des Moduls "Electrochemical Energyconversion/Fuel cell systems" ein Laborpraktikum vorgesehen.

Diese Bachelorarbeit ist dabei als Fortführung der beiden studentischen Arbeiten "Erarbeitung eines Brennstoffzellen-Versuchsstandes" von Peter Kuhn aus dem Jahr 2015 und "Experimentelle Ermittlung von Kennwerten bei verschiedenen Betriebsparametern an der PEM Brennstoffzelle" von Stephen Holway aus dem Jahr 2016 zu sehen.

Im Rahmen der Bachelorarbeit soll die Umsetzung vorgeschlagener und ggf. auch modifizierter Versuche aus den beiden Vorarbeiten am momentan umgesetzten Brennstoffzellenversuchsstand überprüft werden.

Dabei soll am Ende, unter Berücksichtigung didaktischer und zeitlicher Aspekte, eine Zusammenstellung der wichtigsten Teilversuche zu einem oder mehreren Versuchen in Form eines Laborskriptes erfolgen.

3. Grundlagen der Brennstoffzellentechnologie

Sowohl im stationären, als auch im mobilen Sektor wird der Einsatz von Brennstoffzellen als Energieerzeuger untersucht und teilweise schon umgesetzt. Die größte Unterscheidung zwischen den einzelnen Brennstoffzellentypen liegt im Elektrolyteen und die damit verbundene Arbeitstemperatur der Brennstoffzelle. Der Arbeitstemperaturbereich der Brennstoffzellentypen erstreckt sich zwischen 55°C und bis zu 1000°C [4] und bietet somit viele Einsatzmöglichkeiten. Benannt nach dem eingesetzten Elektrolyten werden folgende Brennstoffzellentypen unterschieden:

- Alkalische Brennstoffzelle (AFC, Alkaline Fuel Cell, 150-220°C)
- Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, 10-100°C)
- Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC, Direct Methanol Fuel Cell, 60-130°C)
- Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell, 110-220°C)
- Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell, 550-700°C)
- Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell, 450-1000°C)

Weiterhin ist eine Untergliederung der Brennstoffzellentypen nach der Arbeitstemperatur üblich. Die AFC, PEMFC und DMFC werden dabei den Niedertemperatur-Brennstoffzellen, während die MCFC und die SOFC den Hochtemperatur-Brennstoffzellen zugeordnet werden. Da im Rahmen des Labors der Betrieb einer Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle untersucht werden soll, bezieht sich die Arbeit nur auf diesen Brennstoffzellentypen.

3.1. Funktionsweise der Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle

Die Besonderheit der Brennstoffzelle, durch die sie ihre "Attraktivität" gegenüber anderer konventioneller Energiewandler erlangt hat, ist die Unabhängigkeit vom Carnot'schen Gesetz (s. Gl. 3.1). Der Wirkungsgrad "üblicher" Energiewandler über einen Wärme-Kraft-Prozess wird durch das Carnot-Gesetz nach oben hin, abhängig von den beiden Temperaturen der Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr, begrenzt. Dieser Begrenzung unterliegt die Brennstoffzelle nicht, da die innere Energie des Brennstoffs ohne den Umweg über eine Verbrennung, direkt in Elektrizität und Wärme umgewandelt wird.

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (3.1)$$

Die Brennstoffzelle wurde im Jahre 1839 von Sir William Robert Grove "erfunden". Er experimentierte mit der Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff und stellte fest, dass sich dieser Prozess auch umkehren lässt [3].

Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Brennstoffzellentyp ist die Polymerelektrolyt-Membran.

Neben der Anode und der Kathode, an denen die Zellreaktion stattfindet, gehört der Elektrolyt zu den wichtigsten Komponenten der Brennstoffzelle. Die Aufgabe des Elektrolyts ist die räumliche Trennung der über die Elektroden zugeführten Reaktionsgase zur Verhinderung einer spontanen Reaktion unter starker Wärmeentwicklung.

Bei den Reaktionsgasen der PEM-Brennstoffzelle handelt es sich um wasserstoffhaltige und sauerstoffhaltige (meist Luft) Gase.

Als Elektrolyt wird eine Polymermembran eingesetzt, die die Gesamtreaktion in Gl. 3.2 in zwei Teilreaktionen aufspaltet. Anodenseitig wird dabei der zugeführte Wasserstoff mithilfe einer Katalysatorbeschichtung, meist Platin, oxidiert, d.h. in Elektronen und Wasserstoffionen aufgespalten (siehe Gl. 3.3). Die Protonen diffundieren durch die protonendurchlässige Zellmembran, während der einzige Transportweg der Elektronen, aufgrund der Elektronenundurchlässigkeit der Membran, über eine äußere elektrische Verbindung von der Anode zur Kathode führt.

Kathodenseitig wird der zugeführte Sauerstoff durch die Elektronen des

äußeren elektrischen Kreises reduziert und reagiert anschließend mit den Wasserstoffionen zu Wasser (siehe Gl. 3.4 und Gl. 3.5). Diese Vorgänge sind schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt.

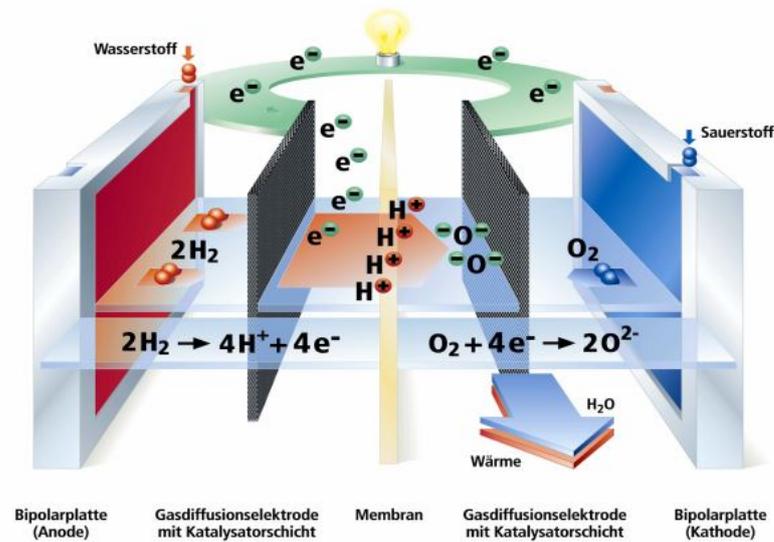


Abbildung 3.1.: Wirkprinzip einer PEM-Brennstoffzelle [6]



Die entscheidende Größe für die Energieentnahme in der Brennstoffzelle in Form von elektrischer Energie und Wärmeenergie ist die Reaktionsenthalpie. Sie ergibt sich aus der Differenz zwischen zwischen der Produktenthalpie und den Eduktenthalpien der Reaktion.

3.1.1. Thermoneutrale Spannung

Im Falle kompletter Umsetzung (Reversible Brennstoffzelle) der Reaktionsenthalpie in elektrische Energie würde sich die thermoneutrale Spannung in der Brennstoffzelle einstellen. Die thermoneutrale Spannung ist jedoch eine rein theoretische Größe, die in der Praxis aufgrund auftretender Entropieänderungen nicht erreicht werden kann. Bei der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser weist die Entropieänderung einen negativen Wert auf. Diese Entropieänderung verursacht einen Wärmestrom, wodurch die elektrische Energie und somit auch die Zellspannung reduziert wird.

Die thermoneutrale Spannung ist abhängig vom Aggregatzustand des Produktwassers. In Abbildung 3.2 sind die molaren Reaktionsenthalpien für den Fall flüssigen sowie auch dampfförmigen Produktwassers tabellarisch aufgelistet.

Aus den Reaktionsenthalpien können mithilfe des Gesetzes von Faraday (s. Gl. 3.6) die thermoneutralen Spannungen für beide Fälle ermittelt werden.

$$-U_{rev}^0 = \frac{\Delta G^0}{zF} \quad (3.6)$$

Dabei ist z die Anzahl ausgetauschter Elektronen pro Brennstoffmolekül und F die Faraday-Konstante. Beim Wasserstoff werden pro Molekül zwei Elektronen ausgetauscht also ist $z=2$.

Die Null deutet dabei auf die Standardbedingungen hin. Im Fall dampfförmigen Produktwassers wird der Heizwert des Brennstoffes energetisch genutzt. Die thermoneutrale Spannung, in dem Fall auch Heizwertspannung U_H genannt, ergibt sich zu:

$$U_H^0 = \frac{-\Delta H^0}{zF} = \frac{241,8 \frac{kJ}{mol}}{2 \cdot 96485,3 \frac{C}{mol}} = 1,253V \quad (3.7)$$

Im Fall flüssigen Produktwassers ergibt sich mit $\Delta H^0 = 286 \frac{kJ}{mol}$ die Brennwertspannung $U_B^0=1,482V$.

3.1.2. Standardpotential

Im realen Fall steht jedoch nicht die gesamte Reaktionsenthalpie zur Umwandlung in elektrischer Energie zur Verfügung, sondern die um die Brennstoffzellenabwärme reduzierte Reaktionsenthalpie. Diese Änderung der Gibbsenthalpie stellt ein Maß dafür dar, ob eine Reaktion „freiwillig“ ablaufen kann.

- $\Delta G < 0$ exergone Reaktion, läuft bevorzugt ab in Richtung der Produkte
- $\Delta G = 0$ Hin- und Rückreaktion stehen thermodynamisch im Gleichgewicht
- $\Delta G > 0$ endergone Reaktion, läuft bevorzugt ab in Richtung der Ausgangsstoffe

Die freie Enthalpiedifferenz ΔG ist laut Gibbs-Helmholtz-Gleichung (siehe Gl. 3.8) die um die übertragene Wärme $T\Delta S$ reduzierte Reaktionsenthalpie ΔH .

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.8)$$

Der PEM-Brennstoffzelle steht somit unter Standardbedingungen folgende freie Enthalpiedifferenz für flüssiges (s. Gl. 3.9) und dampfförmiges Produktwasser (s. Gl. 3.10) zur Verfügung:

$$\Delta G_{fl} = -286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 298,15\text{K} \cdot \left(-163,34 \frac{\text{J}}{\text{molK}}\right) = -237,3 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad (3.9)$$

$$\Delta G_g = -241,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} - 298,15\text{K} \cdot \left(-44,273 \frac{\text{J}}{\text{molK}}\right) = -228,6 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad (3.10)$$

Eingesetzt in Gl. 3.6 ergeben die freien Enthalpien das so genannte Standardpotential U^0_{rev} .

$$U^0_{rev,fl} = \frac{-\Delta G_{fl}}{zF} = \frac{237,3 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{2 \cdot 96485,3 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} = 1,229\text{V} \quad (3.11)$$

$$U_{rev,g}^0 = \frac{-\Delta G_g}{zF} = \frac{228,6 \frac{kJ}{mol}}{2 \cdot 96485,3 \frac{C}{mol}} = 1,185V \quad (3.12)$$

Reaktion	$-\Delta H^0$	U_B^0 bzw. U_H^0	$-\Delta G^0$	U^0	η_{th}
	kJ/mol	V	kJ/mol	V	-
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O_{liq}$	286,0	1,482	237,3	1,229	0,829
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O_{gas}$	241,8	1,253	228,6	1,185	0,946

Abbildung 3.2.: Wasserstoffoxidation unter Standardbedingungen [7]

Das Standardpotential ist die Leerlaufspannung, d.h. die Zellspannung ohne Speisung einer elektrischen Last unter Standardbedingungen. Diese Leerlaufspannung ist von der Temperatur und der Aktivität der Produkte und Edukte abhängig.

3.1.3. Nernstspannung

Bei von den Standardbedingungen abweichenden Betriebsparametern ergibt sich ein Spannungsabfall der Leerlaufspannung. Diese gegenüber dem Standardpotential reduzierte Leerlaufspannung wird als Nernstspannung bezeichnet und ist aus der Nernst-Gleichung berechenbar (s. Gl. 3.13). Dabei haben die Stöchiometrie-Faktoren der Produkte positive und die Stöchiometrie-Faktoren der Edukte negative Vorzeichen.

$$\Delta E_N = \Delta E_m^0 - \frac{R_m \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \prod_i a_i^{\gamma_i} \quad (3.13)$$

Für die PEM-Brennstoffzelle ergibt sich somit im Betrieb mit reinem Wasserstoff als Brennstoff und reinem Sauerstoff als Oxidationsmittel mit der auf die Brennstoffmenge normierte Reaktionsgleichung 3.2 folgende Nernst-

Spannung:

$$E_N = E_m^0 + \frac{R_m \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{a_{H_2O}^1}{a_{H_2}^1 \cdot a_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.14)$$

Die Leerlaufspannung stellt sich im Brennstoffzellenbetrieb ohne Stromfluss ein. Sobald die Zelle eine elektrische Last speist, d.h. ein Stromfluss erfolgt, verursacht die Überlagerung unterschiedlicher, von der Stromstärke abhängiger Verluste weitere Spannungsabfälle. Auf diese Verlustarten wird im Theorieteil von Abschnitt 5.1 genauer eingegangen.

3.1.4. Wirkungsgrade

Zur Bewertung der Effektivität des Brennstoffzellenbetriebs stehen mehrere Wirkungsgrade zur Verfügung.

Thermodynamischer Wirkungsgrad η_{th}

Der thermodynamische Wirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen dem Standardpotential und der thermoneutralen Spannung der Brennstoffzelle.

$$\eta_{th} = \frac{U_{rev}^0}{U_{th}^0} \quad (3.15)$$

Aufgrund des gleichen Nenners (s. Gl. 3.6 und 3.11) ist der thermodynamische Wirkungsgrad auch als Verhältnis zwischen freier Gibbscher Enthalpie und Reaktionsenthalpie definiert.

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} \quad (3.16)$$

Für niedrige Temperaturen gilt:

$$\Delta H \approx \Delta H^0 \text{ und}$$

$$\Delta G \approx \Delta G^0$$

Damit lässt sich der thermodynamische Wirkungsgrad folgendermaßen bestimmen:

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G^0}{\Delta H^0} = \frac{-237,13 \frac{kJ}{mol}}{-285,83 \frac{kJ}{mol}} \approx 83\% \quad (3.17)$$

Spannungswirkungsgrad η_U

$$\eta_U = \frac{U(I)}{U_{rev}} \quad (3.18)$$

Stromwirkungsgrad η_I

$$\eta_I = \frac{I}{I_{max}} \quad (3.19)$$

mit:

$$I_{max} = \dot{n}_{H_2} \cdot z \cdot F \quad (3.20)$$

Elektrischer Wirkungsgrad η_{el}

$$\eta_{el} = \eta_U \cdot \eta_I \quad (3.21)$$

Brenngasnutzungsgrad η_u

$$\eta_u = \frac{\text{umgesetzter Brennstoff}}{\text{eingespeister Brennstoff}} \quad (3.22)$$

Heizwertnutzungsgrad η_H

$$\eta_H = \frac{H_{u,H_2} \cdot x_{H_2}}{\sum H_{u,i} \cdot x_i} \quad (3.23)$$

Brennstoffzellen-Wirkungsgrad η_{FC}

$$\eta_{FC} = \eta_{rev} \cdot \eta_U \cdot \eta_I \cdot \eta_u \cdot \eta_H \quad (3.24)$$

bzw.

$$\eta_{FC} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_{H_2} \cdot \Delta H_u} \quad (3.25)$$

bei gasförmigem Produktwasser und

$$\eta_{FC} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_{H_2} \cdot \Delta H_o} \quad (3.26)$$

bei flüssigem Produktwasser.

4. Versuchsstand

4.1. Geräteaufbau

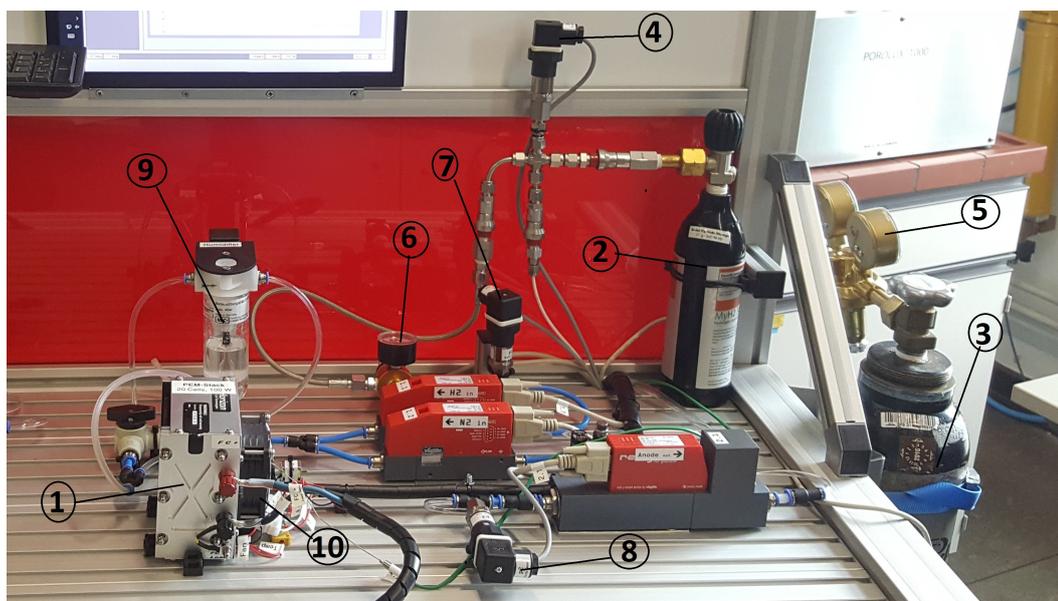


Abbildung 4.1.: Versuchsstand

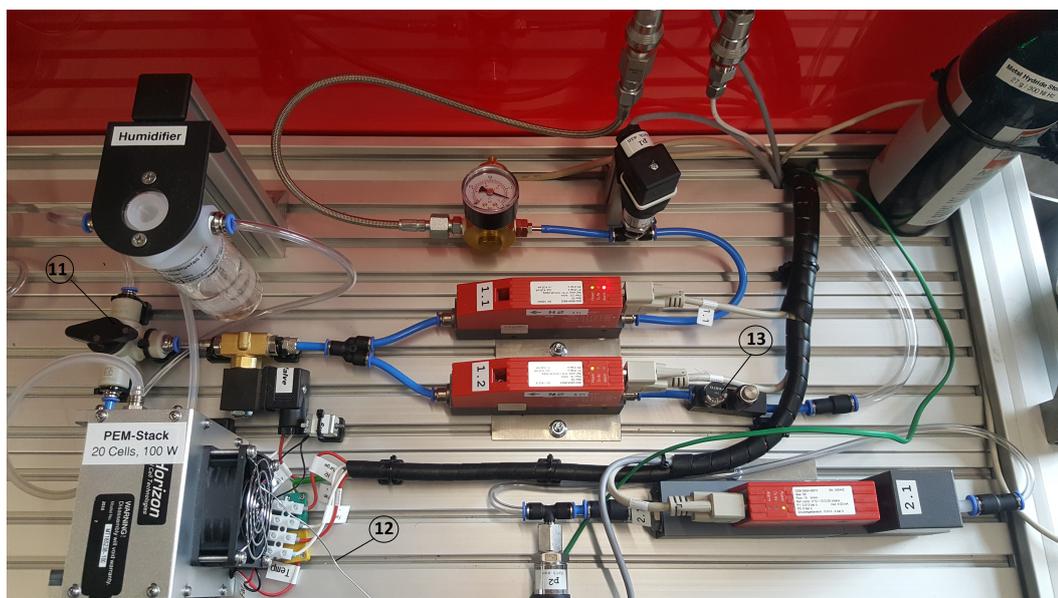


Abbildung 4.2.: Versuchsstand Draufsicht

- 1: PEM-Brennstoffzelle
- 2: Metallhydridspeicher
- 3: Stickstoffflasche
- 4: Druckregler
- 5: Druckminderer
- 6: Manometer
- 7: Druckregistrierer
- 8: Druckregler
- 9: Bubbler
- 10: Ventilator
- 11: Drei-Wege-Ventil
- 12: Temperatur-Fühler
- 13: Druckregler
- 1.1: Wasserstoff-MFC
- 1.2: Stickstoff-MFC
- 2.1: Luft-MFC

Das Kernstück des Versuchsstands ist der PEM-Brennstoffzellenstack bestehend aus 20 Einzelzellen (1). Als Brennstoff kommt Wasserstoff zum Einsatz, welcher in einem Metallhydridspeicher (2) unter einem Druck von bis zu 15 bar gespeichert werden kann. Als Wasserstofferzeuger zur Befüllung des Metallhydridspeichers kommt ein Elektrolyseur zum Einsatz. Die Oxidantenzufuhr in Form von Luft erfolgt mithilfe eines Ventilators (10), welcher auch für die Kühlung der Brennstoffzelle zuständig ist.

Der Volumenstrom der Wasserstoffzufuhr wird über einen Massendurchflussregler (MFC) geregelt (1.1). Er ist auf Wasserstoff kalibriert und arbeitet bis zu einem minimalen Volumenstrom von $50 \frac{\text{Nml}}{\text{min}}$. Unterhalb dieses Volumenstroms schaltet der MFC ab. Die Regelung des Eingangsdrucks des MFC erfolgt über einen Druckregler (4).

Dem Wasserstoff kann Stickstoff zugemischt werden, welcher in einer Druckflasche (3) gespeichert ist. Über einen Druckminderer (5) am Flaschenkopf und einem Druckregler vor dem MFC (1.1) lässt sich der Eingangsdruck regeln. Über den MFC wird der Volumenstrom des zugemischten Stickstoffs geregelt. Dieser arbeitet ab einem minimalen Volumenstrom von $400 \frac{\text{Nml}}{\text{min}}$. Bei niedrigeren Volumenströmen schaltet der MFC ab. Nach den MFC's werden die Brennstoffgase gemischt und zur Anode der Brennstoffzelle hinzugeführt.

Über ein Dreiwegeventil (11) lässt sich das Brenngas zur Befeuchtung durch einen Bubbler (9) führen. Dieser ist mit deionisiertem Wasser zu befüllen. Zur Temperaturmessung ist ein Temperaturfühler an der Austrittsseite der Luft, mittig am Brennstoffzellenstack angebracht.

4.1.1. Bedienung

Die Steuerung der Brennstoffzelle erfolgt über ein Simulink-Programm mithilfe eines am Versuchsstand angebrachten Touchscreen-Monitors. Die Eingaben können dabei direkt am Monitor oder über die beiliegende Tastatur und Maus erfolgen. Im Hauptfenster des Simulink-Programms (s. Abb. 4.3) werden die Betriebsparameter eingestellt. Es sind Spannungs- und Stromanzeigen verfügbar. Im unteren Fensterbereich wird der U-I-Verlauf graphisch dargestellt.

Im zweiten Bedienfenster (s. Abb. 4.4) können neue Datenreihen angelegt

werden, sowie auch Messpunkte manuell aufgenommen werden. Die aufgenommenen Messpunkte können unter Vorgabe der Ordinaten- und Abszissengröße graphisch dargestellt werden.

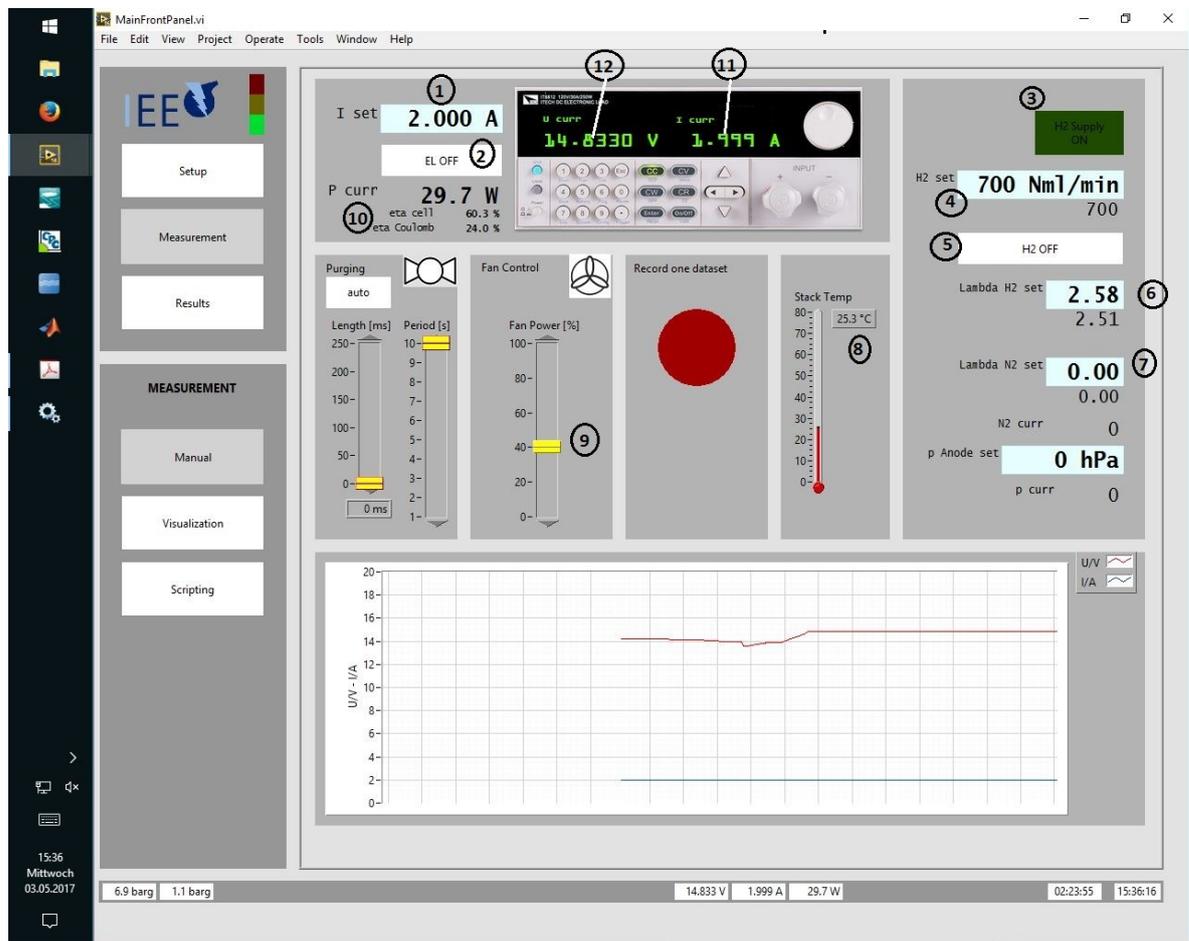


Abbildung 4.3.: Hauptfenster

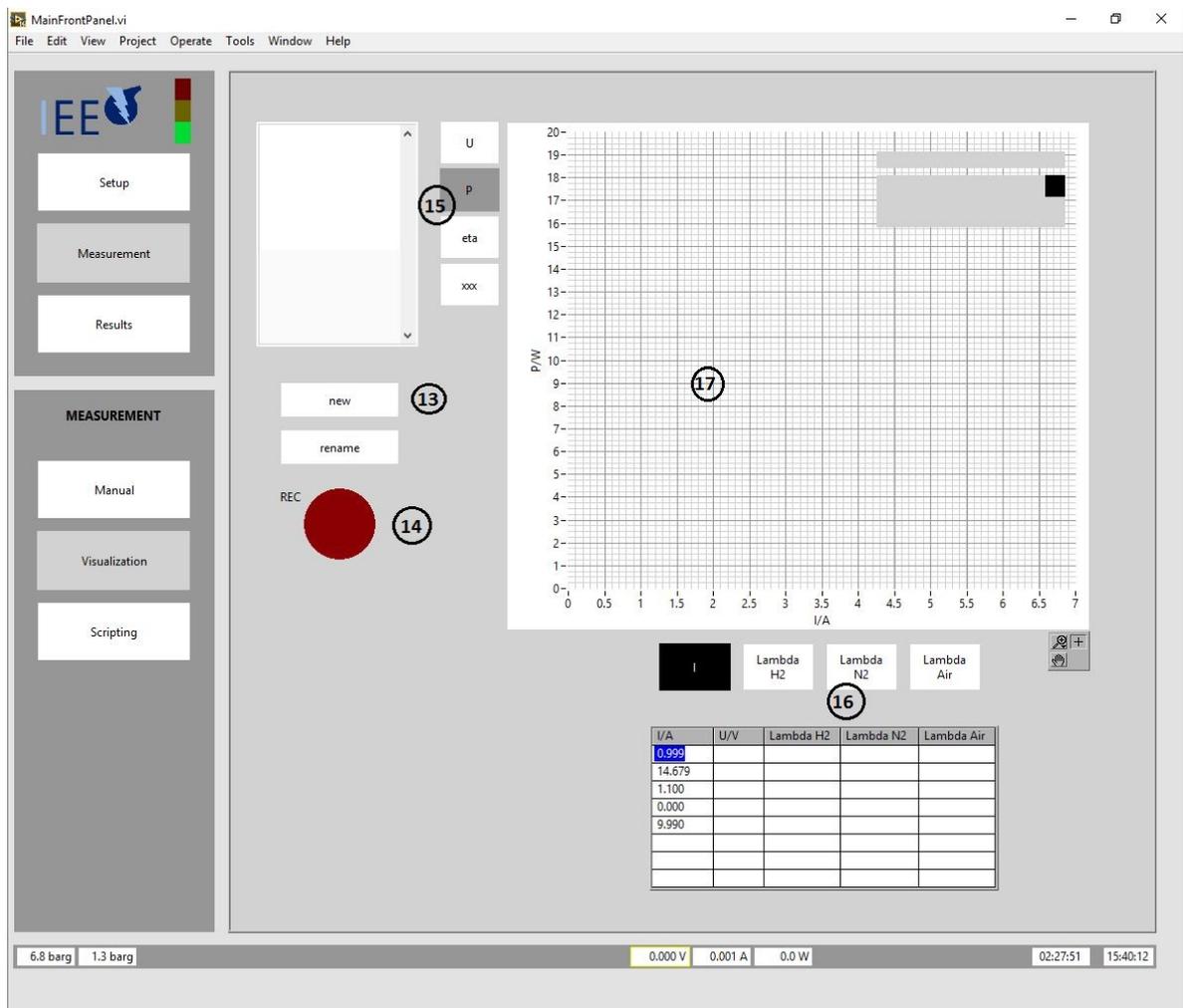


Abbildung 4.4.: Datenfenster

- 1: Eingabefeld Stromstärke
- 2: Deaktivierung Stromstärke (0 A)
- 3: Wasserstoffversorgung Aktivierung/Deaktivierung
- 4: Eingabefeld Wasserstoffvolumenstrom
- 5: Wasserstoffvolumenstrom Deaktivierung (0 Nml/min)
- 6: Eingabefeld λ_{H_2}
- 7: Eingabefeld λ_{N_2}
- 8: Temperatur-Anzeige
- 9: Lüfterleistung-Regler
- 10: Leistungs-, Wirkungsgradanzeige
- 11: Stromstärke-Anzeige
- 12: Spannungs-Anzeige

- 13: neue Datenreihe anlegen
- 14: manuelle Messpunktaufnahme
- 15: Einstellung der Ordinatengröße
- 16: Einstellung der Abszissenlänge
- 17: graphische Darstellung der Messpunkte

5. Einflussfaktoren und Betriebsparameter

5.1. Stromstärke

Dieser Abschnitt bezieht sich auf den Versuch zur Aufnahme der U/I- und P/I-Kennlinie unter schrittweiser Erhöhung der Stromstärke I und der Bestimmung diverser Wirkungsgrade des Brennstoffzellenbetriebs [12].

5.1.1. Theorie

Der Zusammenhang zwischen Zellspannung und Stromstärke ist an der U-I-Kennlinie in Abbildung 5.1 zu erkennen.

In der U-I-Kennlinie sind die drei charakteristischen Bereiche zu erkennen, welche nach den jeweilig dominanten Verlusten benannt sind. Dazu gehören der Reihenfolge nach mit steigender Stromstärke die Durchtrittsüberspannung, auch Aktivierungsüberspannung genannt, die ohmsche Überspannung und die Diffusionsüberspannung.

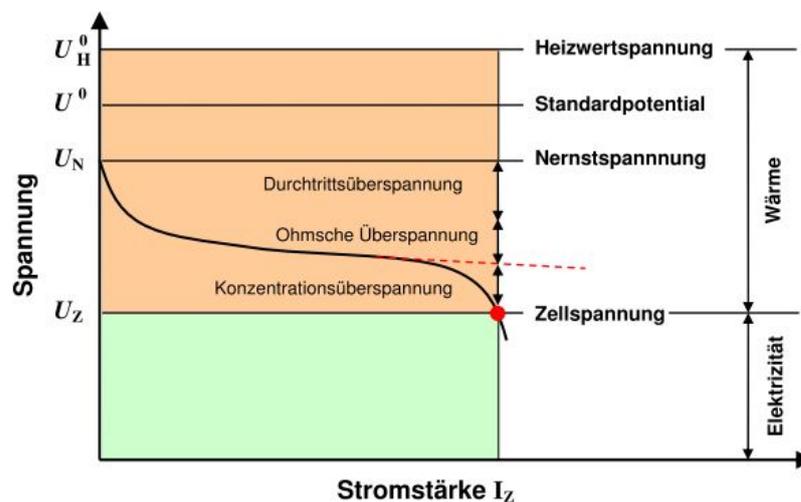


Abbildung 5.1.: U-I-Kennlinie einer Brennstoffzelle [7]

5.1.1.1. Durchtrittsüberspannung

Ausgehend von der Nernstspannung erfolgt im Bereich geringer Stromstärken, ein rapider Spannungsabfall, die sogenannte Durchtrittsüberspannung. In diesem ersten Bereich ist die Kennlinie durch katalytische Prozesse an den Elektroden bestimmt. Der Hauptfaktor ist dabei die Geschwindigkeit der katalytischen Umwandlung der Gase. Diese entspricht der Geschwindigkeit mit der die Elektronen die Kontaktfläche zwischen den Gasmolekülen und dem Platinkondensator (Phasengrenze Elektrode/Elektrolyt) überqueren. Der Zusammenhang zwischen dem Strom I und der Durchtrittsüberspannung wird dabei durch die Butler-Volmer-Gleichung beschrieben. Über eine Umstellung der Butler-Volmer-Gleichung ergibt sich Gleichung 5.1 zur Berechnung der Durchtrittsüberspannung.

$$\eta_{Durch} = \frac{RT}{z\alpha F} \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (5.1)$$

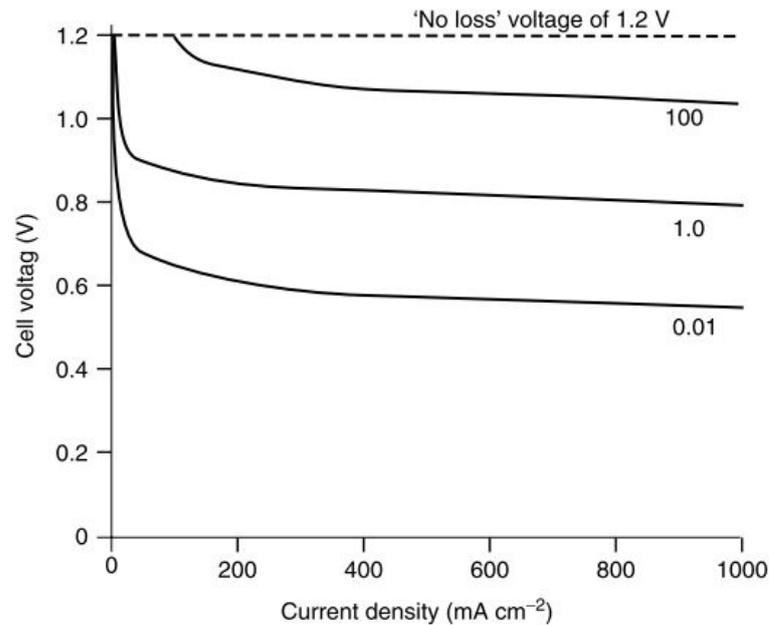
α ist der Durchtrittsfaktor. Er liegt zwischen 0 und 1 und gibt den Anteil der Durchtrittsüberspannung an, der durch die anodenseitige Durchtrittsreaktion anfällt. Der kathodenseitige Anteil ergibt sich aus $1-\alpha$.

Der Faktor T in Gl. 5.1 erweckt den Anschein, dass steigende Temperaturen zu einer erhöhten Durchtrittsüberspannung führen. Der Anstieg der Austauschstromdichte i_0 mit zunehmender Temperatur ist jedoch der dominierende Faktor in Gl. 5.1, wodurch insgesamt eine reduzierte Durchtrittsüberspannung die Folge eines Temperaturanstiegs ist.

Der Zusammenhang zwischen der Austauschstromdichte i_0 und der Zellspannung U_Z ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

Neben der Temperatur kann die Austauschstromdichte über die Wahl des Katalysatormaterials und die Rauheit der Elektrodenoberfläche beeinflusst werden.

Im Falle von Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen ist die Austauschstromdichte auf der Kathodenseite um den Faktor 10^5 geringer als auf der Anodenseite. Somit ist die Durchtrittsreaktion an der Anodenseite bestimmend für die gesamte Durchtrittsüberspannung [2].

Abbildung 5.2.: $U(I, i_0)$ [2]

5.1.1.2. Ohmscher Bereich

Im mittleren Stromstärkebereich tritt die ohmsche Überspannung auf, die gemäß des ohmschen Gesetzes $U=RI$ proportional zur Stromstärke ist. Der Widerstand der Brennstoffzelle ergibt sich dabei aus der Summe der Elektrodenwiderstände und des Elektrolytwiderstandes.

Charakteristisch für den ohmschen Überspannungsbereich ist ein vergleichsweise geringer Spannungsabfall in einem weiten Stromstärkebereich. Deshalb wird dieser Bereich der U-I-Kennlinie als Arbeitsbereich der Brennstoffzelle definiert.

5.1.1.3. Diffusionsüberspannung

An den linearen ohmschen Überspannungsbereich schließt bei hohen Stromstärken der Bereich der Diffusionsüberspannung an. Der limitierende Faktor des ohmschen Bereiches ist die maximale Diffusionsgeschwindigkeit der Gase durch die porösen Elektroden zum Katalysator und zum Elektrolyten. Ab einer gewissen Stromstärke reicht die maximale Geschwindigkeit des Edukttransportes in die Drei-Phasen-Grenze der Brennstoffzelle nicht aus, um die benötigte Leistung zu liefern. Der darauf folgende Bereich der Diffu-

sionsüberspannung ist an einem rapiden Spannungsabfall erkennbar.

5.1.2. Praxis

Die U-I-Kennlinie und P-I-Kennlinie der Brennstoffzelle wurden für den Stromstärkebereich zwischen 0 und 7,5 A aufgenommen. Dabei wurde der Lüfter mit 40 % der Maximalspannung gespeist.

Im Bereich zwischen 0 und 1 A wurde die Stromstärke im 30 s-Takt kontinuierlich um 0,05 A gesteigert um den Bereich der Durchtrittsüberspannung mit hoher Genauigkeit darstellen zu können. Zwischen 1 und 4 A wurde die Stromstärke um 0,2 A und zwischen 4 und 7,5 A alle 30 Sekunden um je 0,5 A erhöht.

Da der Wasserstoff-Durchflussregler unterhalb eines minimalen Volumenstroms von 50 Nml/min abschaltet, konnte die Aufnahme der U-I-Kennlinie nicht unter Einhaltung identischer Bedingungen erfolgen. Um den minimalen Volumenstrom des Wasserstoff-Durchflussreglers bei geringen Stromstärken nicht zu unterschreiten, wurde die Brennstoffzelle im Stromstärkebereich zwischen 0 und 0,3 A mit einem konstanten Wasserstoffvolumenstrom von 50 Nml/min versorgt. Dabei stellte sich $\lambda_{H_2} > 1,1$ ein.

Bei 0,35 A stellt sich mit dem konstanten Volumenstrom ein λ -Wert unter 1,1 für die Wasserstoffversorgung ein. Von dieser Stelle an wurde die Wasserstoffzufuhr über das konstante überstöchiometrische $\lambda = 1,1$ geregelt. Zur graphischen Darstellung wurden die aufgezeichneten Stackspannungs- und Leistungswerte bei der jeweiligen Stromstärke gemittelt.

Die aufgenommene P-I-Kennlinie ist in Abbildung 5.3 und die U-I-Kennlinie in Abbildung 5.4 dargestellt.

Zur Erstellung der Graphen wurde Matlab verwendet. Die verwendeten Programm-Codes sind dem Anhang beigelegt.

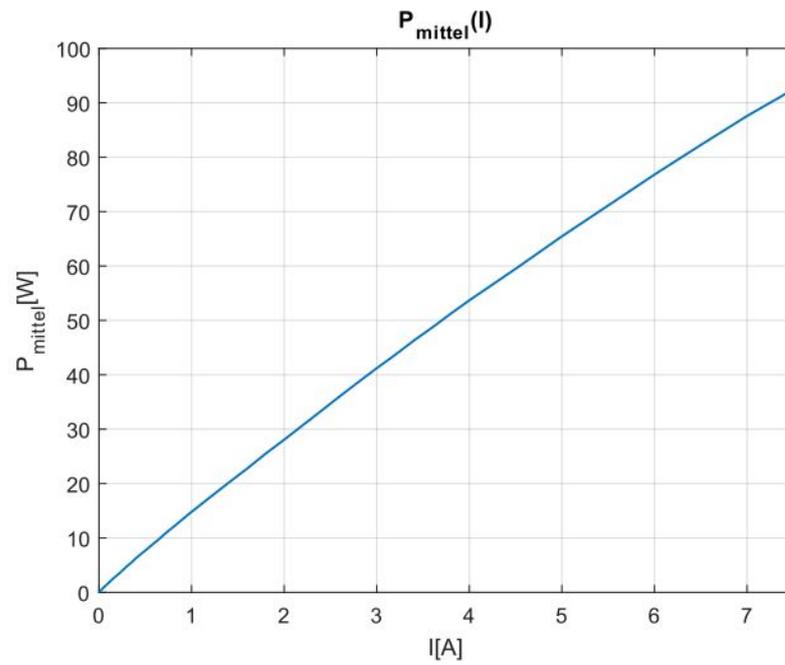


Abbildung 5.3.: 1. aufgenommene P-I-Kennlinie

Die P-I-Kennlinie wächst stetig mit steigender Stromstärke.

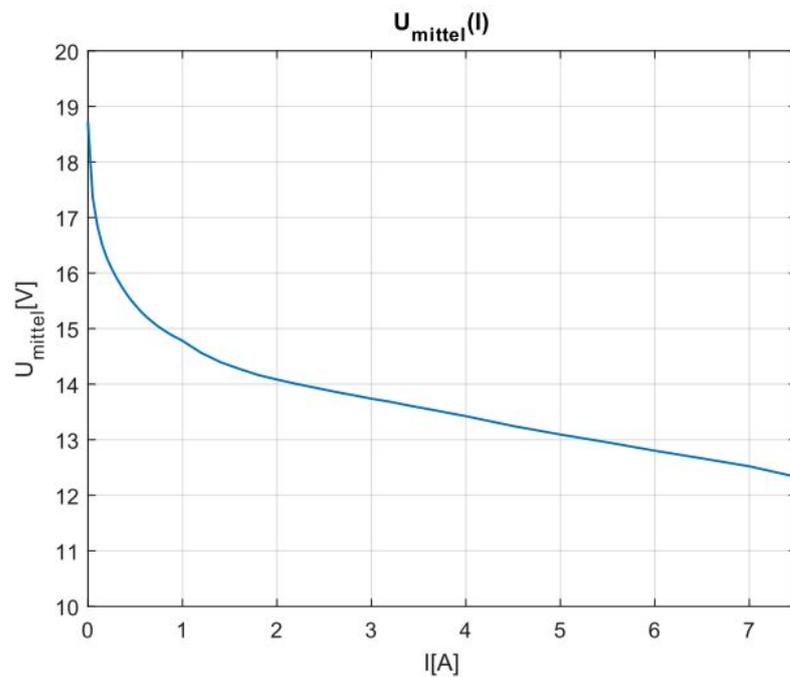


Abbildung 5.4.: 1. aufgenommene U-I-Kennlinie

In der U-I-Kennlinie ist ausgehend von der Leerlaufspannung von etwa 18,8V ein exponentieller Spannungsabfall im Bereich geringer Stromstär-

ken erkennbar. Mit zunehmender Stromstärke wird der Spannungsabfall $|dU/dI|$ geringer, bis sich ein annähernd linearer Verlauf zwischen 2 A und 7 A einstellt. Zwischen 7 A und 7,5 A ist wiederum ein erhöhter Spannungsabfall erkennbar.

In Abbildung 5.5 ist neben der U-I-Kennlinie die stromstärkeabhängige Steigung der Spannung dargestellt. Hier ist noch einmal das abnehmende Spannungsgefälle erkennbar, bis sich zwischen 2 und 7 A ein nahezu konstantes Spannungsgefälle einstellt (siehe auch Tabelle 5.1).

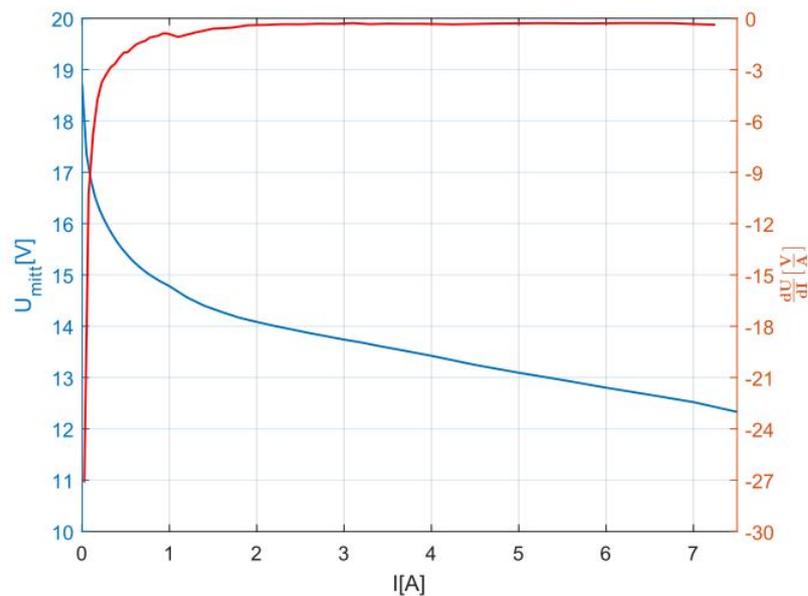


Abbildung 5.5.: U-I- und dU/dI -Verlauf der 1. Messreihe

Tabelle 5.1.: Spannungsänderung 1. U-I-Kennlinie

Stromstärkebereich [A]	dU/dI [V/A]
6-6,5	-0,277
6,5-7	-0,285
7-7,5	-0,381

5.1.3. Vergleich Theorie/Praxis

Die aus den Messungen generierte U-I-Kennlinie weist im betrachteten Stromstärkebereich den für Brennstoffzellen charakteristischen Verlauf auf. So-

wohl der Bereich der Durchtrittsüberspannung bei geringen Stromstärken, als auch der ohmsche Bereich für mittlere Stromstärken sind deutlich erkennbar.

Der Bereich der Diffusionsüberspannung wurde im Rahmen der Messreihe nicht genauer untersucht, da der maximale Nominalleistungsbereich der Brennstoffzelle nicht komplett ausgeschöpft wurde. Der Beginn dieses Überspannungsbereiches ist aber möglicherweise zwischen 7 und 7,5 A in Abbildung 5.4 erkennbar. In diesem Stromstärkebereich ist $\frac{dU}{dI} \approx -0,38 \frac{V}{A}$, während die mittlere Steigung im ohmschen Bereich $\frac{dU}{dI} \approx -0,318 \frac{V}{A}$ beträgt (s. Abb. 5.6). Dieses erhöhte Spannungsgefälle könnte durch die Diffusionsüberspannung verursacht worden sein.

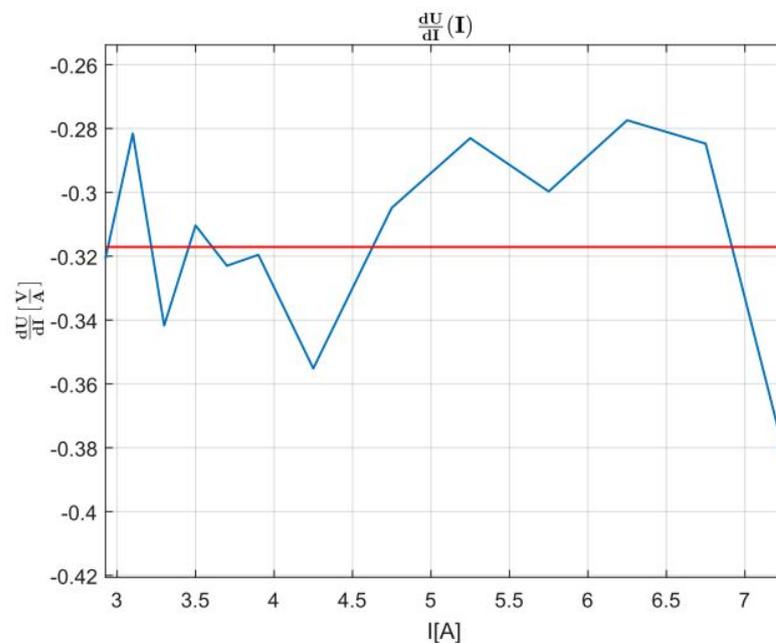


Abbildung 5.6.: dU/dI ohmscher Bereich

Brennstoffzellen werden aber üblicherweise so ausgelegt werden, dass die maximale Nominalleistung zum Betriebsbereich der Brennstoffzelle (ohmscher Bereich) gehört [14]. Daher ist mit großer Wahrscheinlichkeit ein anderer Effekt für den erhöhten Spannungsabfall zuständig.

Die naheliegendste Erklärung liegt an der konstanten Ventilatorspannung von 40 % der Maximalspannung. Diese hat eine begrenzt hohe Wärmeabfuhr zur Folge, wodurch eine Temperaturerhöhung der Brennstoffzelle mit

zunehmender Stromstärke einhergeht. Darüber wird die Stackspannung sicherlich auch beeinflusst (siehe Abschnitt 5.2).

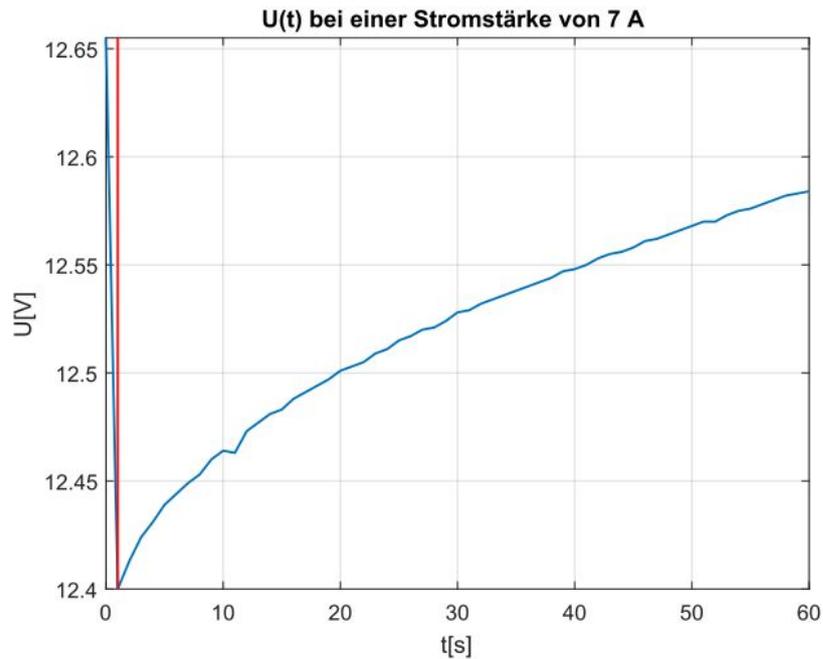
Für den erhöhten Spannungsabfall bei den hohen Stromstärken dürfte hier jedoch die begrenzte Oxidantenzufuhr zuständig sein. Der konstante Luftvolumenstrom könnte bei den hohen Stromstärken, an denen sehr hohe Umsetzungsraten sowohl des Brennstoffs, als auch des Oxidationsmittels vorliegen, zu gering sein, um die Brennstoffzelle mit dem benötigten Sauerstoff zu versorgen. Möglicherweise ist die Luftzufuhr bei hohen Stromstärken sogar unterstöchiometrisch.

Desweiteren ist am Zeitverlauf der Spannung bei konstanter Stromstärke möglicherweise der Effekt von Quereinflüssen zu erkennen.

In Bild 5.7 ist der zeitliche Spannungsverlauf bei der konstanten Stromstärke von 7 A dargestellt. Dabei bezieht sich der Spannungswert der 0. Sekunde noch auf die den 7A vorgeschaltete Stromstärke von 6,5 A. Auf den Sprung der Stromstärke von 6,5 auf 7 A folgt die unmittelbar "Antwort" der Stackspannung.

In der kurzen Zeit von einer Sekunde kann keine starke Änderung der restlichen Betriebsparameter wie Temperatur und Membranfeuchte erfolgt sein (System ist nicht masselos), so dass der Spannungssprung zwischen der 0. und 1. Sekunde ausschließlich auf die Erhöhung der Stromstärke zurückzuführen ist.

Im Anschluss erfolgt zwischen der 1. und 60. Sekunde ein mit der Zeit abnehmender Spannungsanstieg. Mit zunehmend verstrichener Zeit scheint sich die Brennstoffzelle einem stationären Zustand konstanter Stackspannung zu nähern. Dieser stationäre Zustand könnte auf die konstante Membranfeuchte zurückzuführen sein, welche die Membran mit zunehmender Zeit annimmt. Der in der Abbildung beobachtete Anstieg der Stackspannung lässt vermuten, dass insgesamt eine Befeuchtung der Brennstoffzelle erfolgt ist.

Abbildung 5.7.: $U(t)$ bei $I=7$ A

Die Auswirkung der unerwünschten Quereinflüsse auf den zu untersuchenden Zusammenhang zwischen Stackspannung und Stromstärke erhöht sich mit zunehmender Zeitdauer. Um die Abhängigkeit von den Quereinflüssen zu reduzieren, sollte versucht werden alle Betriebsparameter, außer die Stackspannung, die Stromstärke und die direkt damit verbundenen (z. B. Wasserstoffvolumenstrom), möglichst konstant zu halten. Dazu müssten die Betriebspunkte schnellstmöglich angefahren werden, bestenfalls automatisiert und in Sekundentakt.

5.1.3.1. Diffusionsüberspannung

Zur Überprüfung der Ursache des Spannungsabfalls bei hohen Stromstärken wurden zwei weitere Messreihen bei der Ventilatorleistung von 55 % aufgenommen.

Zur Reduzierung der Quereinflüsse wurde die erste Messreihe im 10 s-Takt und im Anschluss die zweite Messreihe im 5 s-Takt durchlaufen. Der Strombereich wurde dabei auf bis zu 9 A erweitert um den kompletten Nominalleistungsbereich zu durchlaufen. Folgende U-I-Kennlinien und Steigungen ergaben sich mit der neuen Ventilatorleistung:

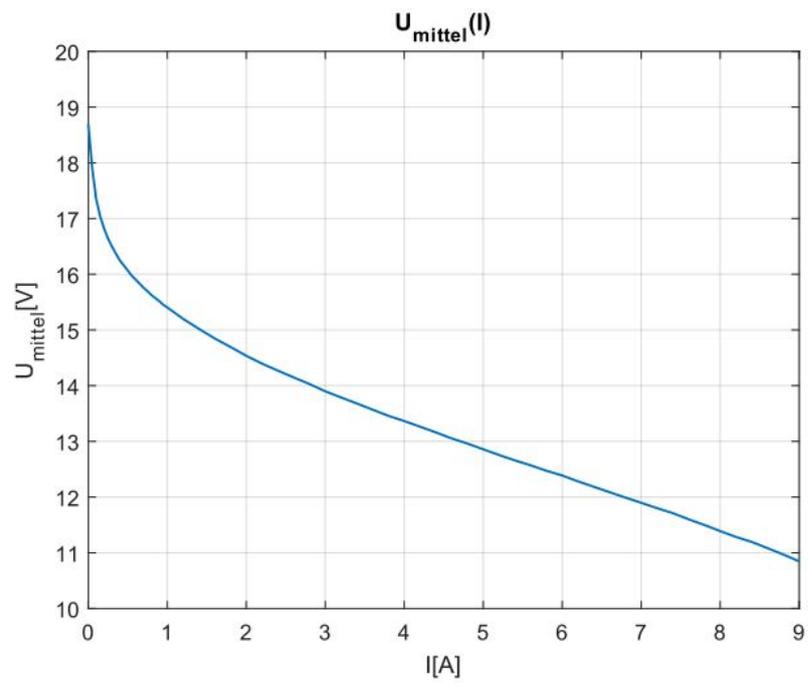
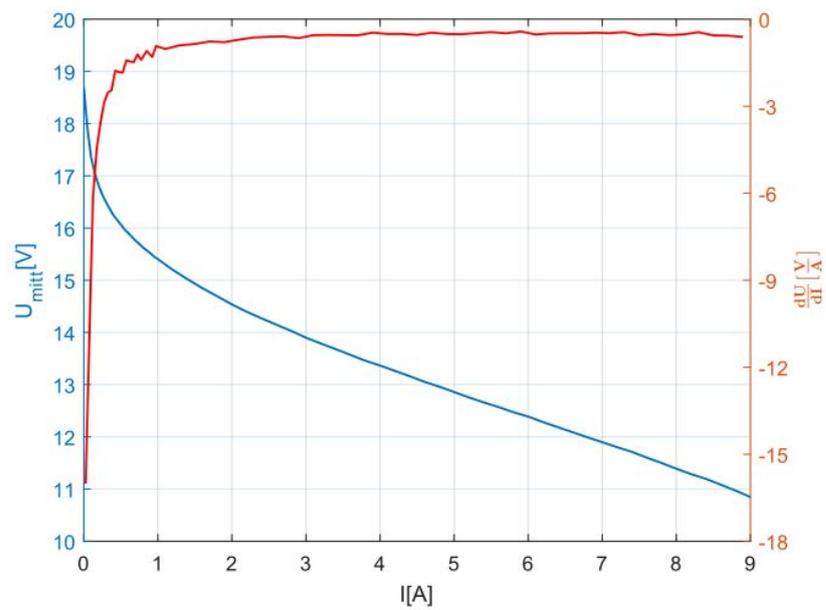


Abbildung 5.8.: 2. aufgenommene U-I-Kennlinie

Abbildung 5.9.: U-I- und dU/dI -Verlauf der 2. Messreihe

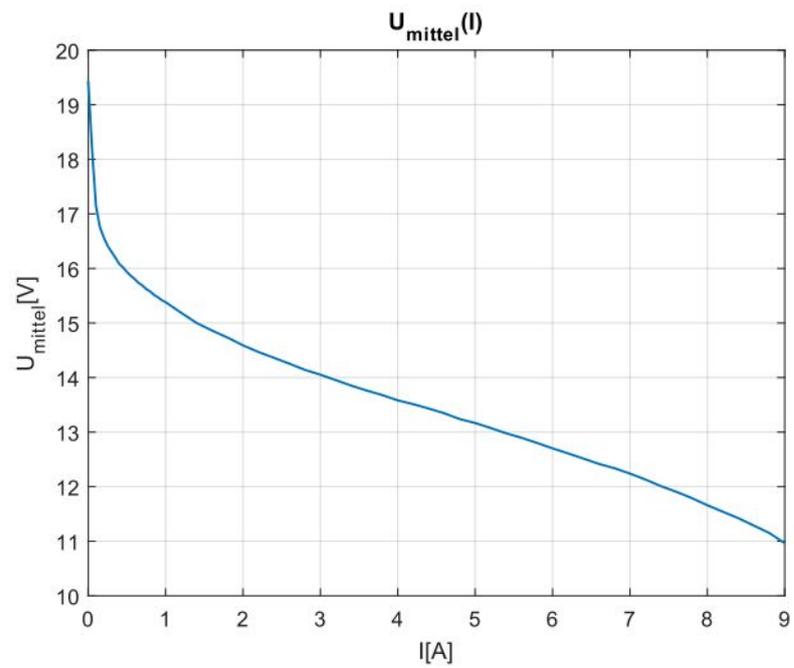
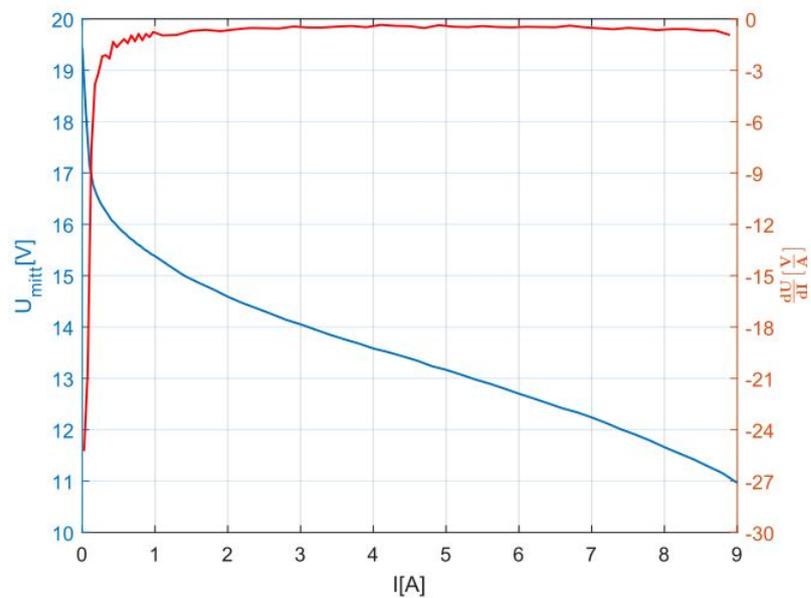


Abbildung 5.10.: 3. aufgenommene U-I-Kennlinie

Abbildung 5.11.: U-I- und dU/dI -Verlauf 3. Messreihe

In Abbildung 5.12 sind die U-I-Kennlinien der drei aufgenommenen Messreihen in einem gemeinsamen Graphen dargestellt.

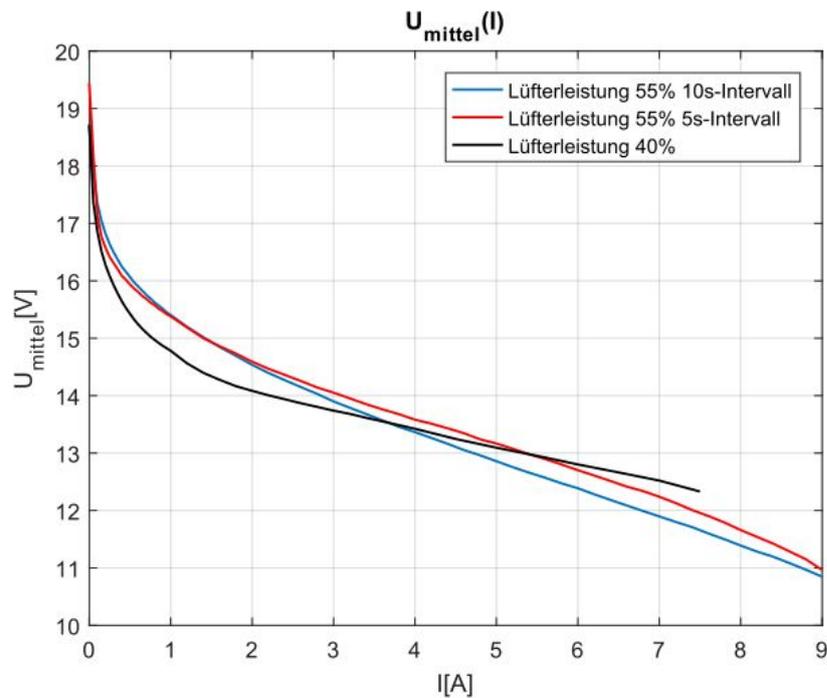


Abbildung 5.12.: U-I-Kennlinien Vergleich

Die zweite Messreihe scheint die Annahme zu bestätigen, dass der beobachtete Spannungsabfall der ersten Messreihe im Bereich hoher Stromstärken auf die geringe Oxidantenzufuhr zurückzuführen ist. Sowohl aus Abbildung 5.8, als auch aus Abbildung 5.9 geht ein annähernd konstanter Spannungsabfall im Bereich hoher Stromstärken hervor. Der Diffusionsüberspannungsbereich wird gemäß der zweiten Messreihe bei 55 % Lüfterleistung im gesamten Leistungsbereich der Brennstoffzelle nicht erreicht. Die dritte Messreihe jedoch, die im Anschluss an die zweite, bei gleicher Lüfterleistung (angelegter Lüfterspannung) aufgenommen wurde, widerlegt die Annahme. In der dritten Messreihe ist nicht nur ein höheres Spannungsgefälle im ohmschen Bereich, sondern auch ein rapider Spannungsabfall im Bereich hoher Stromstärken, möglicherweise der Diffusionsüberspannungsbereich, erkennbar.

Die Aufnahme der Messreihen unter erhöhter Ventilatorleistung lieferte somit kein eindeutiges Ergebnis. Der Verlauf der U-I-Kennlinie scheint vom Anfangszustand (Temperatur, Feuchte), sowie auch von der Einstelldauer der Stromstärken maßgeblich abzuhängen.

Die Aufnahme der U-I-Kennlinie im Rahmen des Laborpraktikums ist vor al-

lem aufgrund ihrer praktischen Wichtigkeit unerlässlich. Um eine zufriedenstellende Vergleichbarkeit der Laborergebnisse zu garantieren, muss dazu ein vordefinierter annähernd einheitlicher Betriebszustand der Brennstoffzelle vor der Kennlinienaufnahme eingestellt werden.

5.1.3.2. Durchtrittsüberspannung

In Abbildung 5.12 ist deutlich erkennbar, dass die Durchtrittsüberspannung bei der Lüfterleistung von 40 % am höchsten ist. Die Lüfterleistung von 55 % führt zur annähernd identischen Durchtrittsüberspannung in beiden Messreihen.

Bei Betrachtung der T-I-Verläufe der drei Messreihen (s. Abb. 5.13) wird ein möglicher Zusammenhang zwischen der Brennstoffzellentemperatur und der Durchtrittsüberspannung festgestellt. Höhere Temperaturen scheinen eine geringere Durchtrittsüberspannung zur Folge zu haben.

Ein Grund könnte der Anstieg der Reaktionskinetik der Gase mit steigender Betriebstemperatur der Brennstoffzelle sein.

Möglicherweise wird die Durchtrittsüberspannung aber auch über weitere Betriebsfaktoren, wie die Membranfeuchte beeinflusst.

Zur genaueren Untersuchung der Temperaturabhängigkeit wären lokale Temperaturmessungen an den Elektroden notwendig.

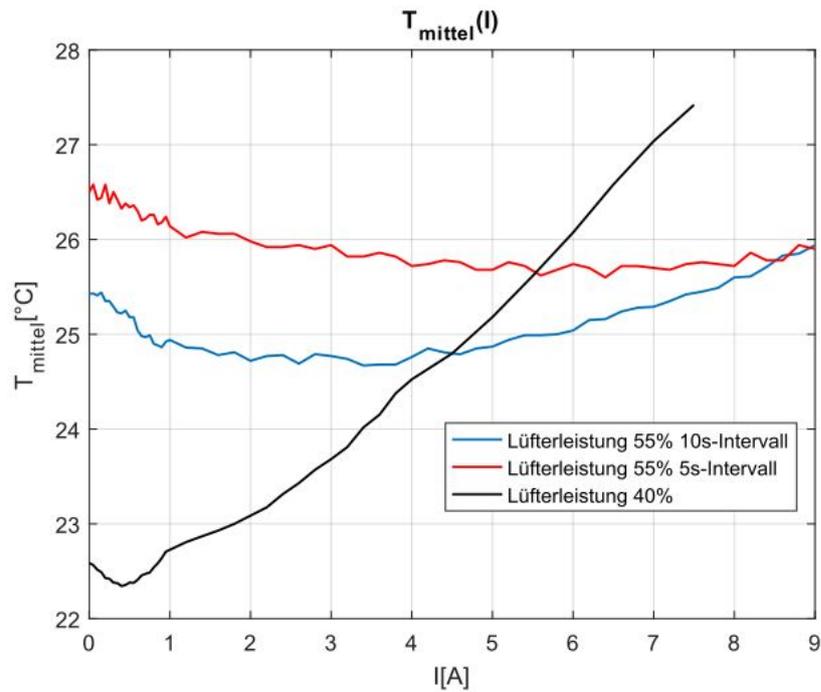


Abbildung 5.13.: T-I-Kennlinien Vergleich

5.1.3.3. Ohmscher Bereich

In Abbildung 5.14 sind die ohmschen Bereiche der drei Messreihen in vergrößerter Ansicht dargestellt. Aus den Steigungen geht hervor, dass sich der niedrigste innere Widerstand R_i unter einer Lüfterleistung von 40 % ergibt. Die ohmschen Bereich bei der Lüfterleistung von 55 % verlaufen annähernd parallel zueinander, somit sind die inneren Widerstände betragsmäßig ähnlich (0,51 und 0,55 Ω).

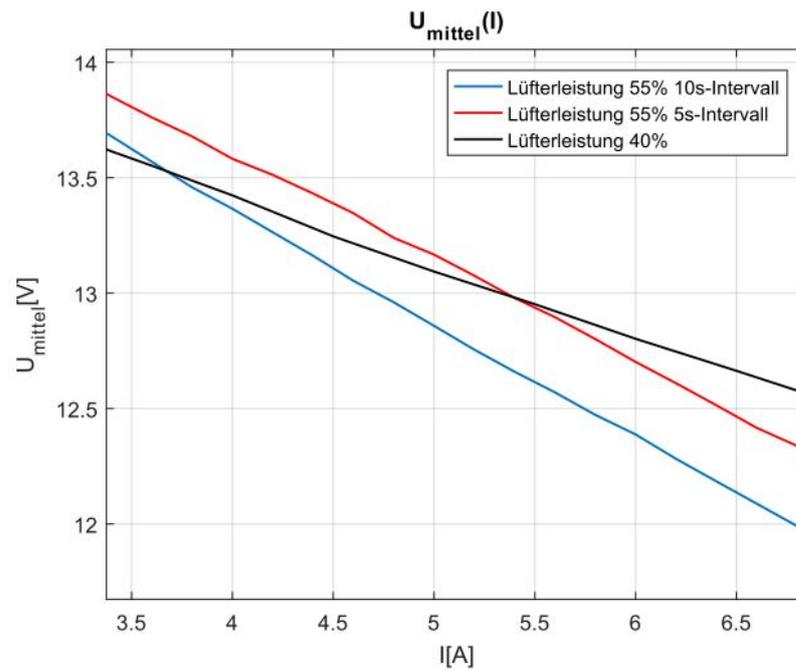


Abbildung 5.14.: Ohmsche Bereiche Vergleich

5.1.3.4. Wirkungsgrade

Im Folgenden sind die Verläufe unterschiedlicher Wirkungsgrade des Brennstoffzellenbetriebs in Abhängigkeit von der Stromstärke dargestellt.

Spannungswirkungsgrad η_U

Gemäß Gleichung 3.18 ist der Spannungswirkungsgrad proportional zur Stackspannung.

In Abbildung 5.15 ist der Spannungswirkungsgrad in Abhängigkeit der Stromstärke für die 1. Messreihe dargestellt. In Abbildung 5.16 sind die Verläufe der drei durchgeführten Messreihen in einem gemeinsamen Graphen abgebildet.

Mit zunehmender Stromstärke fallen die Spannungswirkungsgrade, wie auch die Stackspannungen (s. Abb. 5.12). Der maximale Spannungswirkungsgrad $\eta_{U,\max}=79,02\%$ wird in der dritten Messreihe bei Leerlaufspannung erzielt.

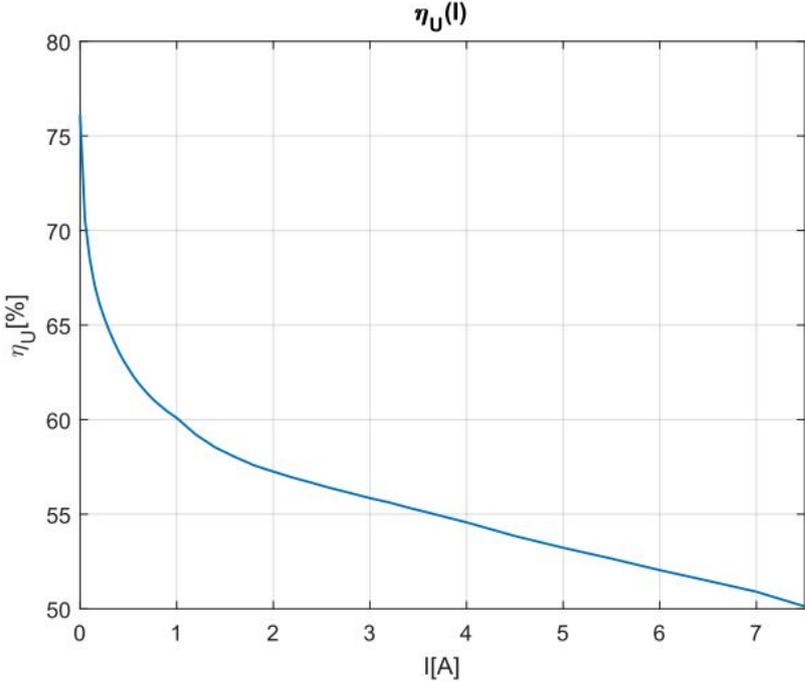


Abbildung 5.15.: $\eta_U(I)$ der 1. Messreihe

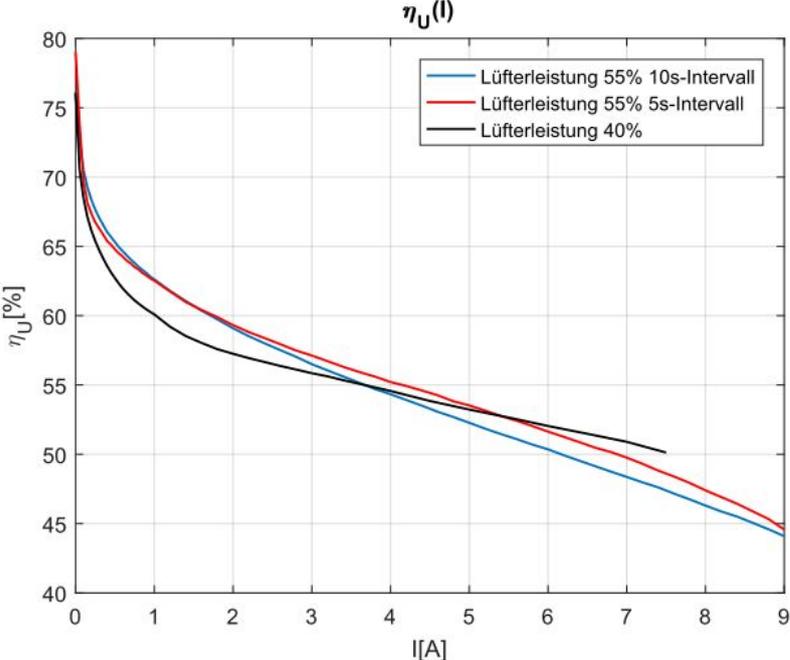


Abbildung 5.16.: $\eta_U(I)$ Vergleich

Stromwirkungsgrad η_I

In Abbildung 5.17 ist der Stromwirkungsgrad η_I der 1. Messreihe in Abhängigkeit von der Stromstärke abgebildet. In Abbildung 5.18 ist der Zusammenhang vergrößert dargestellt.

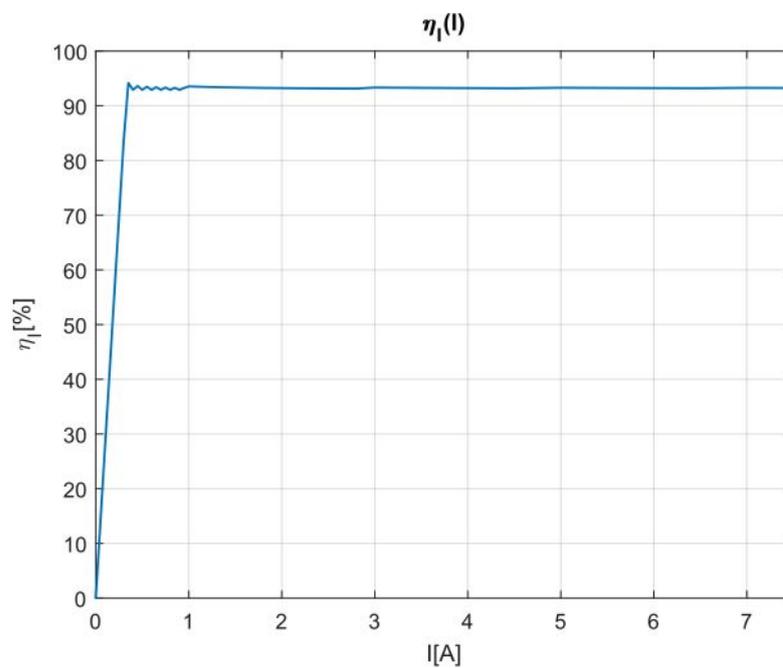
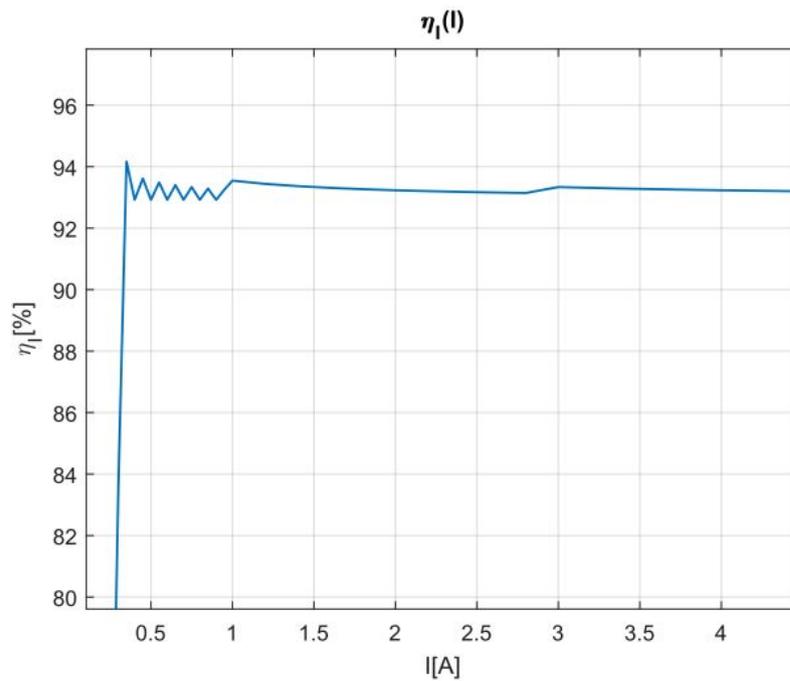


Abbildung 5.17.: $\eta_I(I)$ der 1. Messreihe

Abbildung 5.18.: $\eta_I(I)$ der 1. Messreihe in vergrößerter Ansicht

Der Stromwirkungsgrad η_I steigt zwischen 0 A und 0,35 A von 0 % auf etwa 94 % (s. Abb. 5.17 und 5.18) und beträgt im restlichen Stromstärkebereich etwa 93,3 %. Die anfängliche Steigung des Stromwirkungsgrads wird dabei durch die sich ergebenden Stöchiometriefaktoren $\lambda > 1,1$ beim eingestellten konstanten Stickstoffvolumenstrom von 50 Nml/min verursacht.

$$\eta_I = \frac{I}{I_{max}} = \frac{I}{\lambda_{H_2} \cdot \dot{n}_{H_2, \lambda=1} \cdot z \cdot F} \quad (5.2)$$

mit

$$\dot{n}_{H_2, \lambda=1} = \frac{I}{z \cdot F} \quad (5.3)$$

Gleichung 6.36 eingesetzt in Gleichung 6.35 ergibt Gleichung 6.37:

$$\eta_I = \frac{I}{\lambda_{H_2} \cdot \frac{I}{z \cdot F} \cdot z \cdot F} = \frac{1}{\lambda_{H_2}} \quad (5.4)$$

Der Stromwirkungsgrad η_I ist also der umgekehrt proportional zum stöchiometrischen Faktor der Wasserstoffzufuhr λ_{H_2} . Mit abnehmendem Stöchiometriefaktor nimmt der Stromwirkungsgrad zu. Dies begründet den anfänglichen Anstieg des Wirkungsgrads bis zu einer Stromstärke von 0,35 A in

Abbildung 5.58. Bei 0,35 A wird der konstante Stöchiometriefaktor der Wasserstoffzufuhr $\lambda_{\text{H}_2}=1,1$ eingestellt, wodurch sich der annähernd konstante Stromwirkungsgrad von 93,3 % ergibt.

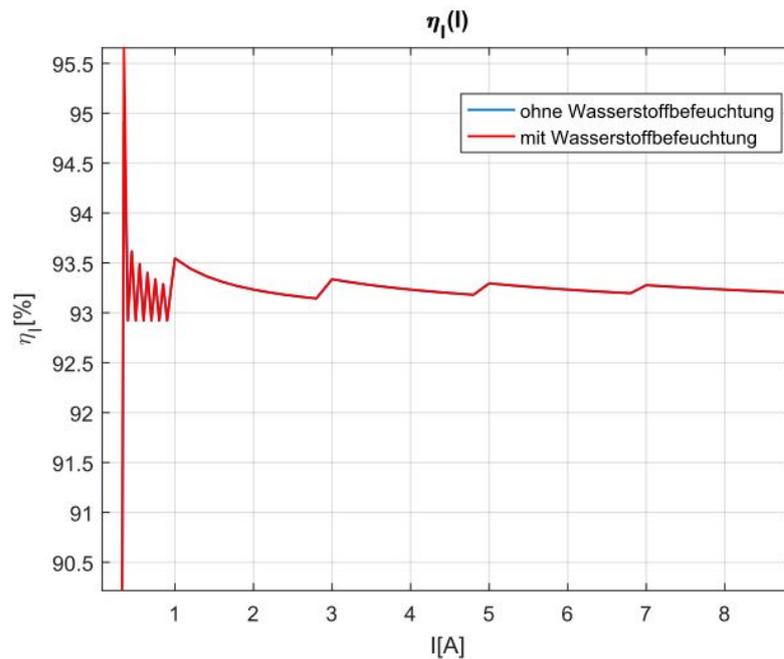
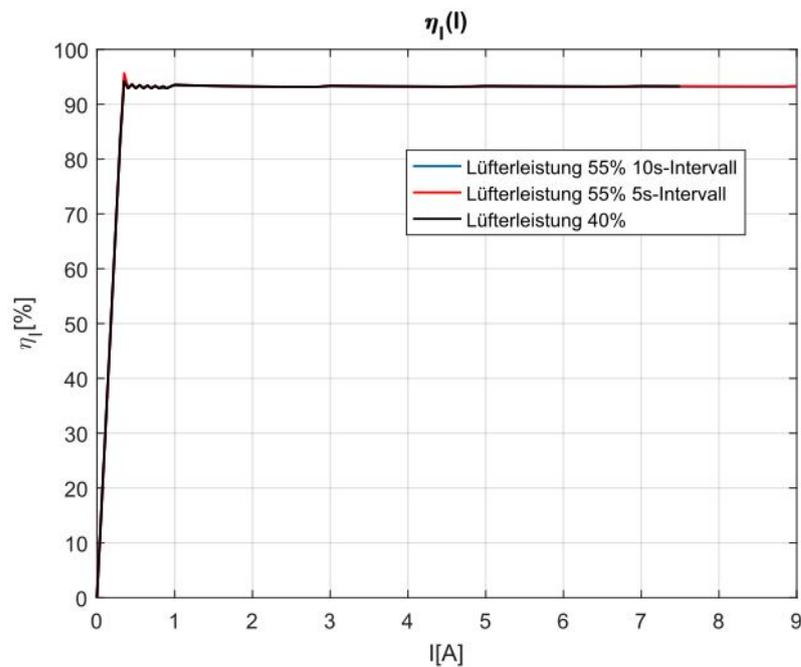


Abbildung 5.19.: $\eta_I(I)$ mit und ohne Befeuchtung vergrößert

Entsprechend Gl. 6.37 müsste sich für den gesamten Stromstärkebereich $I > 0,35$ A ein konstanter Stromwirkungsgrad ergeben. In Abbildung 6.26 sind ausgehend von einer Stromstärke von 1 A im 2 A-Takt abklingende Schwingungen des Wirkungsgrads erkennbar. Für diese variierenden Stromwirkungsgrade sind wahrscheinlich variierende Stöchiometriefaktoren aufgrund von Ungenauigkeiten in der Regelung der Wasserstoffzufuhr zuständig.

In Abbildung 5.20 sind die Stromwirkungsgrade der drei Messreihen in einem gemeinsamen Graphen dargestellt. Aufgrund der alleinigen Abhängigkeit des Stromwirkungsgrads von λ_{H_2} sind die Wirkungsgradverläufe aller drei Messreihen identisch.

Abbildung 5.20.: $\eta_I(I)$ Vergleich

Brennstoffzellen-Wirkungsgrad η_{FC}

Der Brennstoffzellen-Wirkungsgrad setzt sich gemäß Gleichung 3.24 aus dem Produkt mehrerer Teilwirkungsgrade zusammen. Da die Brennstoffzelle mit reinem Wasserstoff betrieben wird ist der Heizwertwirkungsgrad $\eta_H = 1$. Aufgrund niedriger Betriebstemperaturen der Brennstoffzelle kann $\eta_{th} \approx 0,83 = \text{konst}$ angenommen werden.

Der Gesamtwirkungsgrad wird also durch den Spannungs-, Strom- und Brenngaswirkungsgrad bestimmt.

Mit den Teilwirkungsgraden

$$\eta_I(5 \text{ A}) = 93,3 \%$$

$$\eta_U(5 \text{ A}) = 53 \%$$

$$\eta_{th}(5 \text{ A}) = 83 \%$$

ergibt sich folgender Gesamtwirkungsgrad für die 1. Messreihe (vgl. Abb. 5.21):

$$\eta_{FC} = \eta_U \cdot \eta_I \cdot \eta_{th} = 0,53 \cdot 0,93 \cdot 0,83 = 0,41 \hat{=} 41 \% \quad (5.5)$$

Alternativ lässt sich der Gesamtwirkungsgrad auch nach Gleichung 3.26 berechnen. Die Leistung der Brennstoffzelle wird auf den zugeführten Brenn-

wert des Wasserstoffs $H_0=141,8 \frac{MJ}{kg}$ bezogen, da das Produktwasser der Brennstoffzellenreaktion flüssig ist.

Demnach ergibt sich für die erste Messreihe bei $I=5 \text{ A}$ folgender Wirkungsgrad:

$$\eta_{FC} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_{H_2} \cdot H_{o,H_2}} = \frac{P_{el}}{\frac{\dot{V}_{H_2}}{60 \frac{s}{min}} \cdot \frac{1}{V_N} \cdot M_{H_2} \cdot H_{o,H_2}} \quad (5.6)$$

$$= \frac{65,5 \text{ W}}{\frac{0,747 \frac{NL}{min}}{22,414 \frac{NL}{mol} \cdot \frac{60 s}{min}} \cdot \frac{2 \text{ kg}}{1000 \text{ mol}} \cdot 141,8 \frac{MJ}{kg}} = 0,4158 \hat{=} 41,58 \%$$

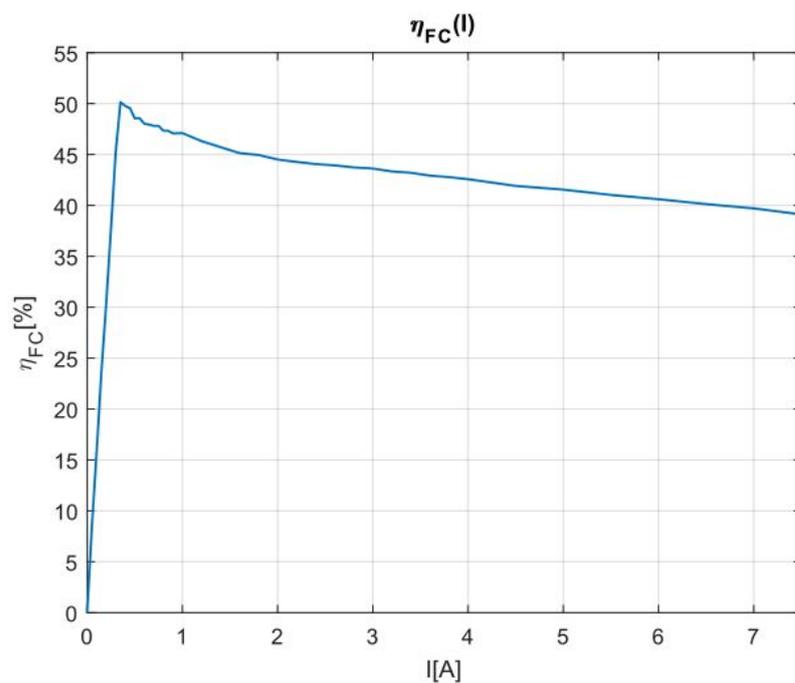
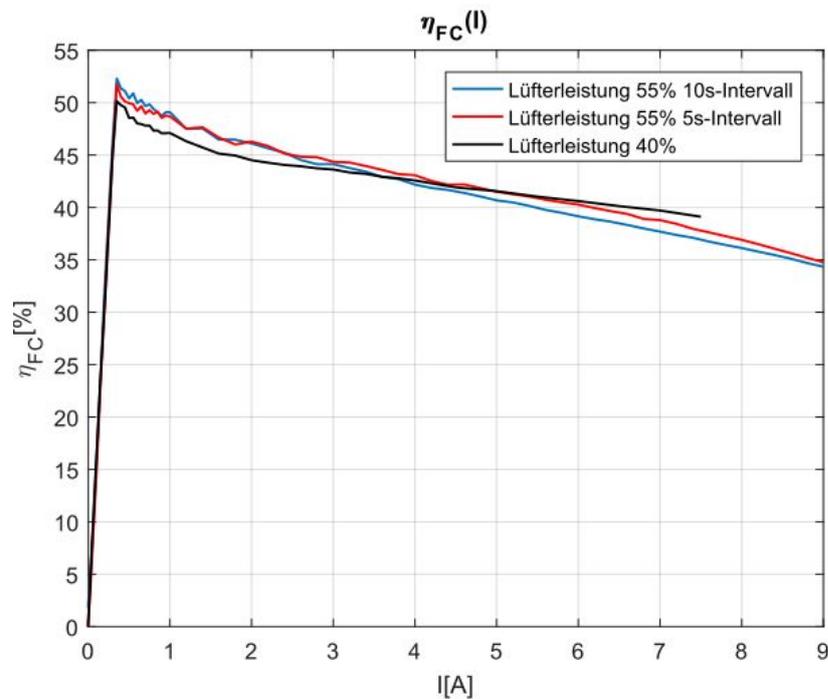


Abbildung 5.21.: $\eta_{FC}(I)$ der 1. Messreihe

In Abbildung 5.22 sind noch einmal die η_{FC} -Verläufe der drei Messreihen in einem gemeinsamen Graphen dargestellt.

Abbildung 5.22.: $\eta_{FC}(I)$ Vergleich

5.1.4. Eignung zur Labordurchführung

Die Aufnahme der U-I-Kennlinie ist vermutlich der wichtigste Versuchsablauf zur Untersuchung des Brennstoffzellenbetriebs. Im Rahmen der Versuchsauswertung lassen sich sämtliche Wirkungsgrade abhängig von der Stromstärke, sowie auch der Innenwiderstand R_i der Brennstoffzelle ermitteln.

Die Untersuchung der Überspannungsbereiche kann dabei unter Variation von Betriebsparametern (z. B. Lüfterleistung) und unter verschiedenen Startbedingungen (z. B. Brennstoffzellentemperatur) erfolgen.

5.2. Brennstoffzellenkühlung/Brennstoffzellentemperatur

5.2.1. Kühlung

Neben der erwünschten elektrischen Energie entsteht während des Brennstoffzellenbetriebs thermische Energie in Form von latenter und sensibler Wärme, die aus der Brennstoffzelle abgeführt werden muss, um diese im gewünschten Temperaturbereich zu halten. Der sensible Wärmeanteil wird dabei über Wärmeleitung und abhängig von der Brennstoffzellengröße, entweder durch natürliche Konvektion oder einer Kombination von natürlicher und erzwungener Konvektion abgeführt.

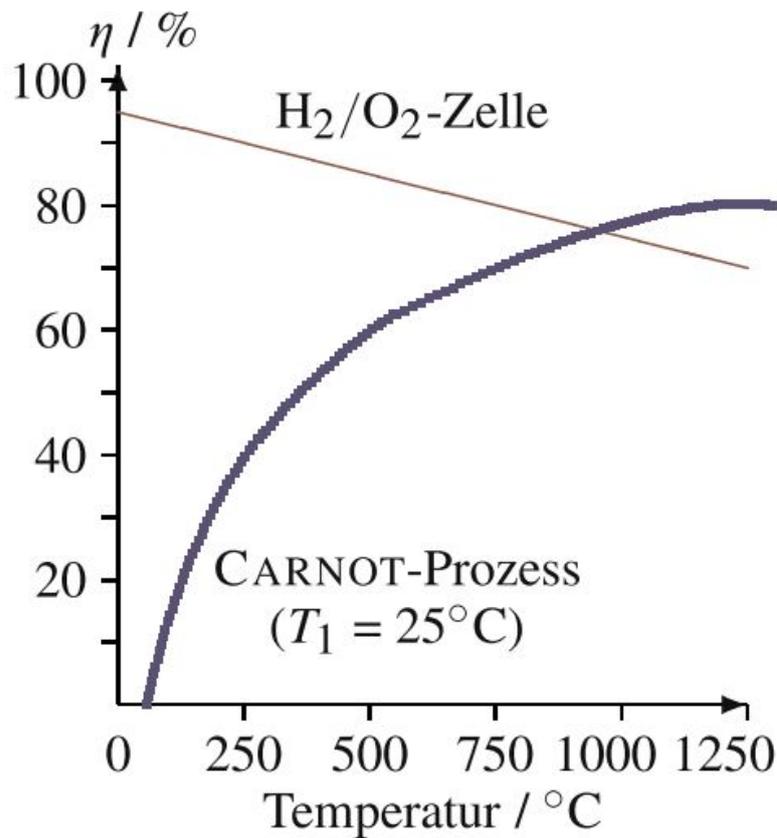
Erfahrungsgemäß wird erst bei Nennleistungen von über 100 W ein Lüfter zur Brennstoffzellenkühlung erforderlich [2]. Die natürliche Konvektion erfolgt über das Brennstoffzellengehäuse, aufgrund der induzierten Luftzirkulation durch den Temperaturgradienten in der Umgebungsluft. Der Wärmeeintrag der Brennstoffzelle lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$\dot{Q} = I \cdot (U_{rev} - U_Z) = P_{el} \cdot \left(\frac{U_{rev}}{U_Z} - 1 \right) \quad (5.7)$$

5.2.2. Temperatur

Aus der Formel des thermodynamischen Wirkungsgrades (s. 3.16) wird ersichtlich, dass sich ein Temperaturanstieg negativ auf den Brennstoffzellenbetrieb auswirkt. Es sind höhere thermodynamische Wirkungsgrade bei niedrigeren Zelltemperaturen zu erwarten (s. Gl. 3.16). Anders als Wärme-Kraft-Maschinen ist die Brennstoffzelle nicht an das Carnot-Gesetz gebunden, laut dessen höhere Betriebstemperaturen höhere Wirkungsgrade zur Folge haben.

Die Temperaturabhängigkeiten des Carnot-Wirkungsgrades und des thermodynamischen Wirkungsgrades sind in Abbildung 5.23 dargestellt.

Abbildung 5.23.: $\eta(T)$ -Vergleich Brennstoffzelle/Wärme-Kraft-Prozess

Weiterhin wirkt sich eine Temperaturänderung auch über die Aktivierungsspannung auf die Stackspannung und somit über den Spannungswirkungsgrad auf den Brennstoffzellen-Wirkungsgrad aus. Die Aktivierungsspannung lässt sich anhand der Tafel-Gleichung

$$U_{akt} = A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (5.8)$$

berechnen.

Dabei sind sowohl die Konstante

$$A = \frac{RT}{2\alpha} \quad (5.9)$$

sowie auch die Austauschstromdichte i_0 temperaturabhängig. Die Austauschstromdichte i_0 ist dabei der dominierende Faktor und bewirkt durch Er-

höhung bei einer Temperaturzunahme den Abfall der Aktivierungsspannung [2].

Der Zusammenhang zwischen Austauschstromdichte i_0 und Zellspannung ist in Abb. 5.2 dargestellt. Mit zunehmender Austauschstromdichte wird auch die Differenz zwischen der reversiblen Spannung und der Operationsspannung geringer.

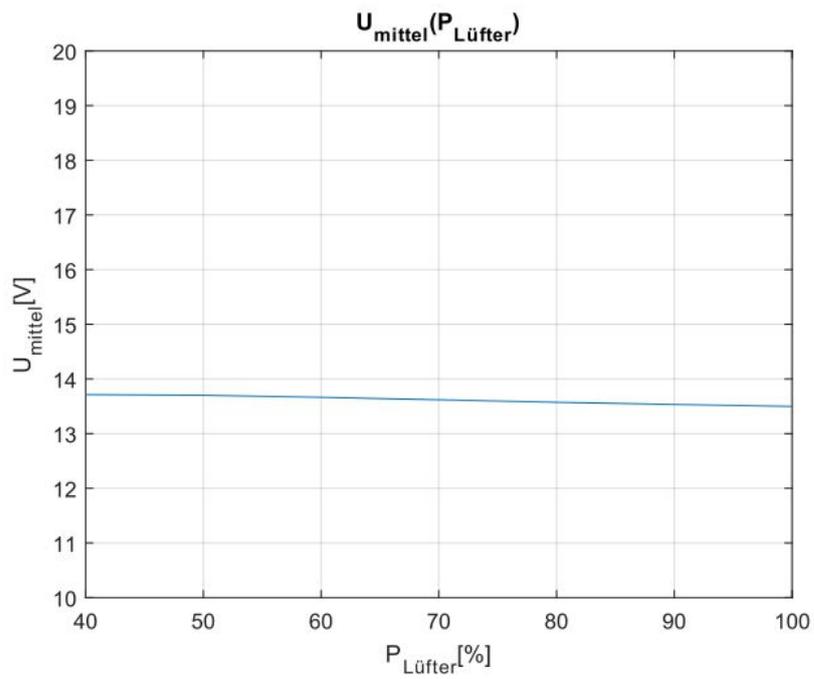
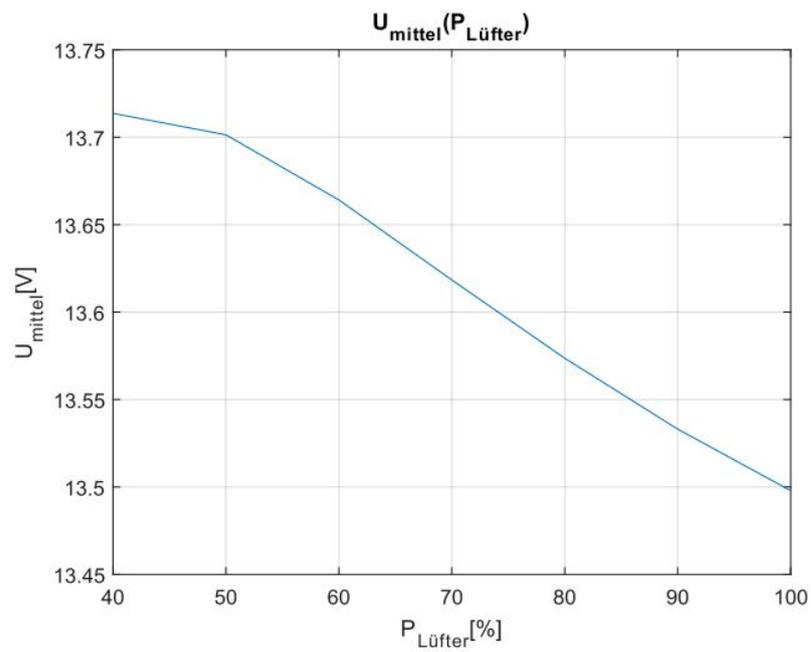
5.2.3. Praxis

Zur Untersuchung des Kühlungseinflusses wurden die Spannungsverläufe bei unterschiedlichen Stromstärken unter Variation der angelegten Lüfterspannung (Lüfterleistung) aufgenommen.

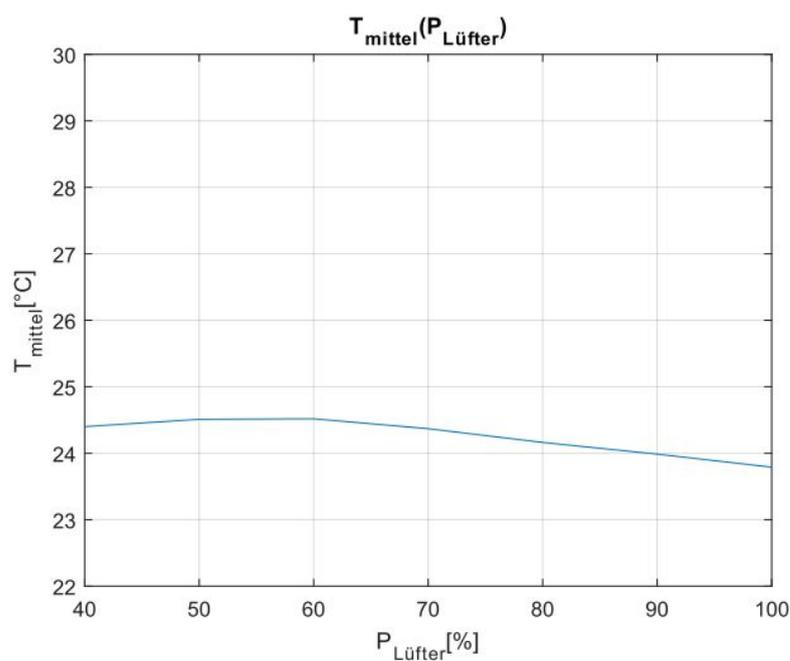
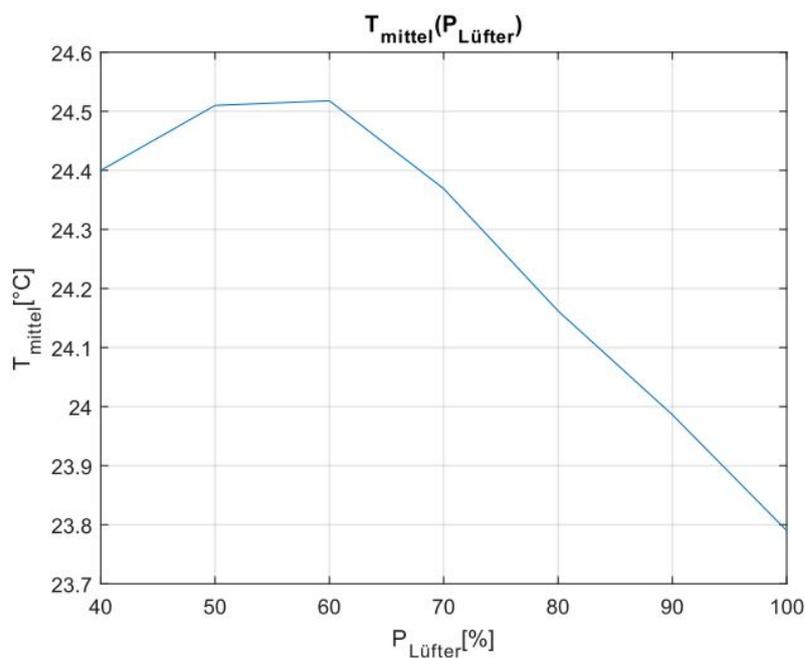
Aufgrund fehlender Informationen zum Betriebsverhalten des Lüfters kann aus der anliegenden Versorgungsspannung weder auf die Lüfterdrehzahl noch auf den angesaugten Luftvolumenstrom oder die Lüfterleistung geschlossen werden.

Zur Untersuchung der Brennstoffzellenkühlung wurden die Temperatur- und Spannungsänderungen der Brennstoffzelle herangezogen. Dazu wurde die jeweilige Lüfterspannung im 30 s-Takt variiert und der Mittelwert der Stackspannung und der Temperatur gebildet.

Folgender Zusammenhang zwischen Brennstoffzellenspannung und Lüfterleistung stellte sich bei der konstanten Stromstärke von 4 A unter Erhöhung der Lüfterspannung um 10 % im Bereich zwischen 40 und 100 % ein:

Abbildung 5.24.: $U(P_{\text{Lüfter}})$ bei $I=4$ AAbbildung 5.25.: $U(P_{\text{Lüfter}})$ bei $I=4$ A vergrößert

Folgender Temperaturverlauf wurde dabei verzeichnet:

Abbildung 5.26.: $T(P_{\text{Lüfter}})$ bei $I=4$ AAbbildung 5.27.: $T(P_{\text{Lüfter}})$ bei $I=4$ A vergrößert

Wie in den Abbildungen 5.24 und 5.26 zu erkennen ist, nimmt die Stackspannung mit zunehmender Ventilatorspannung ab, während die Brennstoffzellentemperatur nach einem anfänglichen Anstieg, im Bereich zwischen 40 und 60 % der maximalen Ventilatorspannung, sinkt.

Bei der zweiten aufgenommenen Messreihe mit der konstanten Stromstärke von 6 A ergab sich folgender Stackspannungsverlauf:

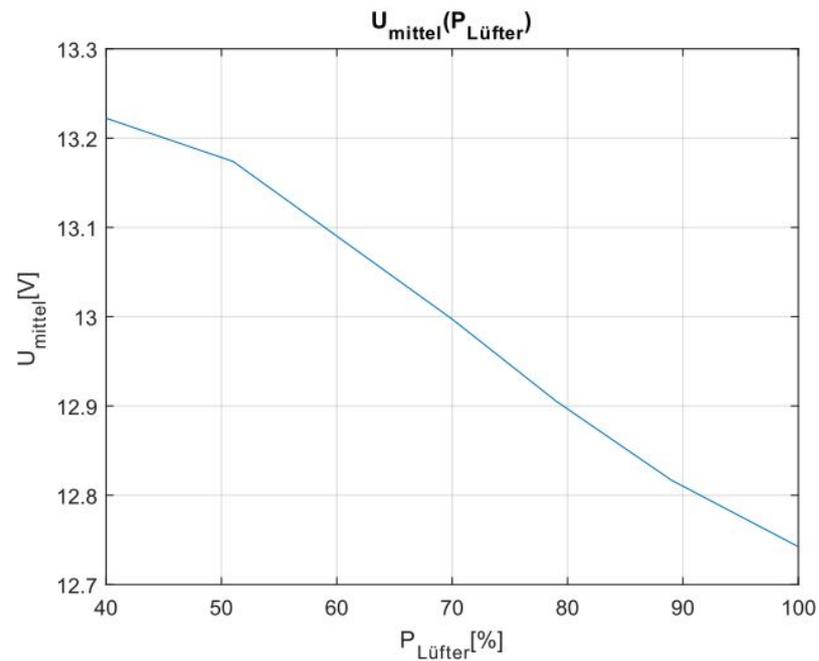


Abbildung 5.28.: $U(P_{\text{Lüfter}})$ bei $I=6$ A

Folgender Temperaturverlauf stellte sich dabei ein:

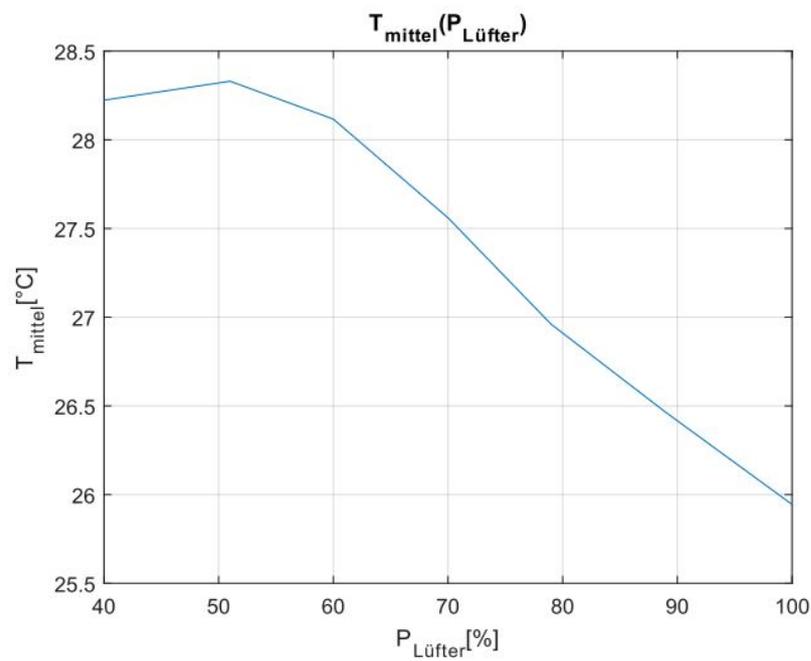


Abbildung 5.29.: $T(P_{\text{Lüfter}})$ bei $I=6$ A

Wie schon in der ersten Messreihe erfolgt auch hier bei der Erhöhung der Ventilatorspannung zunächst einmal ein Temperaturanstieg, im Bereich zwischen 40 und 50 %, gefolgt von einem Temperaturabfall im restlichen Ventilatorspannungsbereich. Die Stackspannung ist im betrachteten Spannungsbereich des Ventilators monoton fallend.

Bei erneutem Durchlauf der Messung bei der Stromstärke von 6 A in einer dritten Messreihe wurden folgender Stackspannungs- und Temperaturverlauf beobachtet:

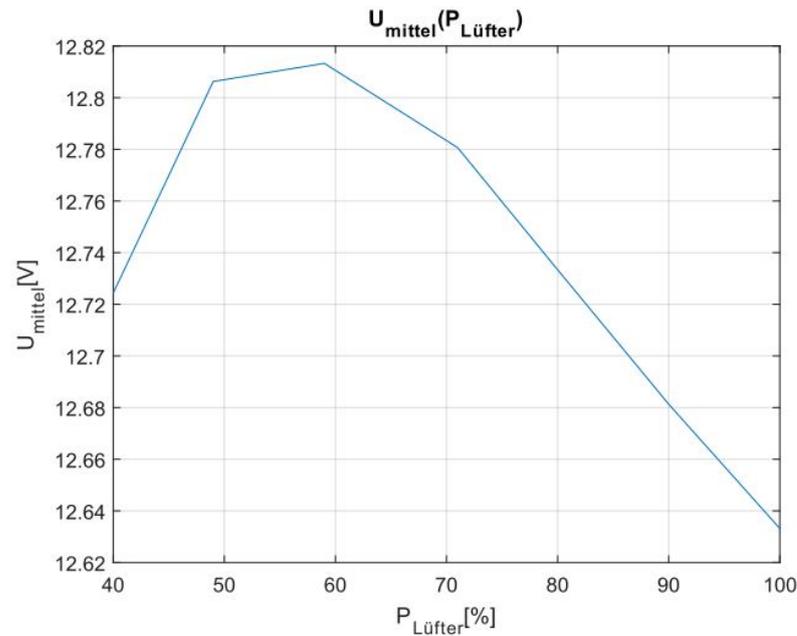
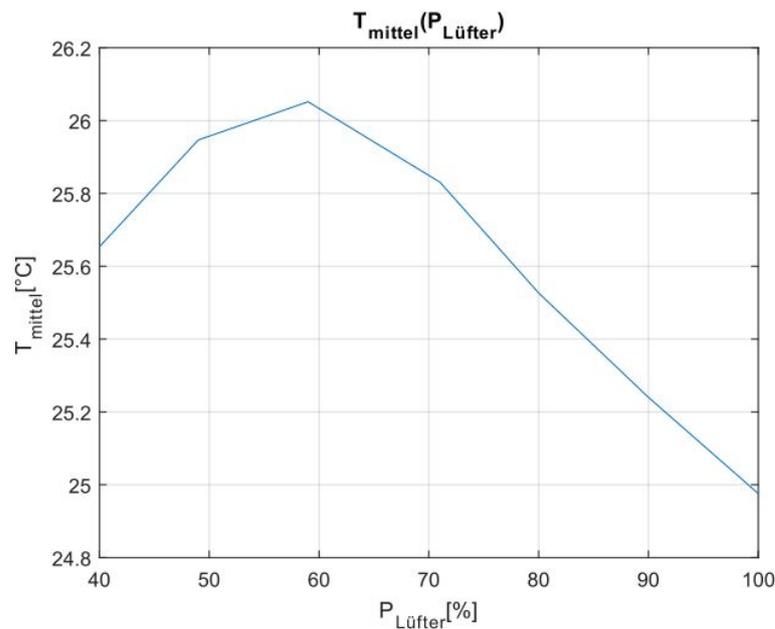


Abbildung 5.30.: 2. $U(P_{\text{Lüfter}})$ bei $I=6$ A

Abbildung 5.31.: 2. $T(P_{\text{Lüfter}})$ bei $I=6$ A

Erneut ist mit zunehmender Lüfterspannung ein anfänglicher Temperaturanstieg (40-60 %), gefolgt von einem Temperaturabfall (60-100 %) zu verzeichnen. Anders als in den bisherigen Messreihen ist hier im Bereich zwischen 40 und 60 % der maximalen Ventilatorspannung ein Spannungsanstieg erfolgt.

5.2.4. Vergleich Theorie und Praxis

Bei Betrachtung der Versuchsergebnisse fällt vor allem der Spannungsabfall, der sich insgesamt mit zunehmendem Kühlluftvolumenstrom und damit verbundener sinkender Temperatur ergibt. Anders als durch die Gleichung des thermodynamischen Wirkungsgrades vorhergesagt, ist also in der Praxis ein Spannungsabfall und nicht eine Spannungszunahme die Folge sinkender Brennstoffzelltemperatur.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Temperatureinflüsse auf die Stackspannung untersucht.

5.2.4.1. Austauschstromdichte i_0

Beginnend mit der Austauschstromdichte i_0 lässt sich sagen, dass die Temperaturabsenkung eine Verringerung der Austauschstromstärke und somit

eine Erhöhung der Durchtrittsüberspannung bewirkt. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen von bis zu 10 K (Temperaturdifferenz im Brennstoffzellenbetrieb) ist die Austauschstromdichte aber wahrscheinlich nicht der alleinige Grund des Spannungsabfalls.

Anhand der folgenden Berechnung für die 1. Messreihe mit $I=6$ A (s. Abb. 5.29) unter der Lüfterleistung von 60 % (Temperatursenkung wird erreicht) wird der Einfluss der Austauschstromdichte genauer untersucht:

Mit einer Elektrodenfläche von $26,25 \text{ cm}^2$, dem typischen Wert $A=0,06 \text{ V}$ [2] und einem $i_0 = 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ (Platin) erhält man folgende Durchtrittsüberspannung:

$$\Delta U = A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) = 0,06 \text{ V} \cdot \ln\left(\frac{\frac{6 \text{ A}}{26,25 \text{ cm}^2}}{5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}}\right) = 0,367 \text{ V} \quad (5.10)$$

Erfolgt ein Spannungsabfall um beispielsweise 0,2 V ausschließlich aufgrund des Anstiegs der Austauschstromdichte, so müsste diese bei der konstanten Stromstärke von 6 A

$$i_0 = \frac{i}{e^{\frac{\Delta U}{A}}} = \frac{\frac{6 \text{ A}}{26,25 \text{ cm}^2}}{e^{\frac{0,567 \text{ V}}{0,06 \text{ V}}}} = 1,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \quad (5.11)$$

betragen.

Es müsste dazu also eine um mehr als um den Faktor 10 verminderte Austauschstromstärke i_0 durch die Temperaturreduzierung erfolgen. Die Annahme, dies wäre durch eine Temperaturdifferenz von bis zu 2,3 K erreichbar, erscheint sehr unrealistisch.

Aufgrund fehlender Informationen zur Temperaturabhängigkeit der Austauschstromdichte, wird angenommen, dass durch den vorliegenden Temperaturabfall eine Reduzierung der Austauschstromdichte um 10 % erfolgt. Daraus würde sich folgende Durchtrittsüberspannung ergeben:

$$\Delta U = 0,06 \text{ V} \cdot \ln\left(\frac{\frac{6 \text{ A}}{26,25 \text{ cm}^2}}{5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 0,1)}\right) = 0,374 \text{ V} \quad (5.12)$$

Es erfolgt somit ein Spannungsabfall um $0,374 \text{ V} - 0,367 \text{ V} = 0,007 \text{ V}$. Die Spannungsänderung durch die reduzierte Durchtrittsüberspannung ist also bei den hier auftretenden, niedrigen Temperaturdifferenzen sehr gering. Sie trägt zu einem geringen Anteil zum in den Messreihen beobachteten Spannungsabfall bei, ist jedoch nicht die ausschlaggebende Größe.

5.2.4.2. reversible Spannung

Bei der Untersuchung der reversiblen Spannungsgleichung kommt man auf folgende temperaturabhängige Spannungsänderung:

$$\Delta U = - \frac{[\Delta H_B(T_2) - \Delta H_B(T_1)] - [T_2 \cdot \Delta S_B(T_2) - T_1 \cdot \Delta S_B(T_1)]}{zF} \quad (5.13)$$

mit $\Delta S_B(T_1) \approx \Delta S_B(T_2) = \Delta S_B(T_0)$

und $\Delta H_B(T_1) \approx \Delta H_B(T_2) = \Delta H_B(T_0)$

für kleine Temperaturdifferenzen folgt folgende Spannungserhöhung:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{(T_2 - T_1) \cdot \Delta S_B(T_0)}{z \cdot F} = \frac{\Delta T \cdot (H_{H_2O,m} - \frac{1}{2} \cdot H_{H_2,m} - H_{O_2,m})}{z \cdot F} = \\ &= \frac{-2,3 \text{ K} \cdot (69,942 - \frac{1}{2} \cdot 130,681 - 205,149) \frac{\text{J}}{\text{molK}}}{2 \cdot 96485,332 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} = 2,39 \cdot 10^{-3} \text{ V} \end{aligned} \quad (5.14)$$

5.2.4.3. Membranfeuchte

Insgesamt würde sich beim betrachteten Temperaturabfall von 2,3 K durch die Kombination der bisher betrachteten Spannungsänderungen ein Spannungsabfall von etwa 0,005 V ergeben. In Abbildung 5.28 ist jedoch insgesamt ein Spannungsabfall von fast 0,5 V zu erkennen.

Daraus kann geschlossen werden, dass mindestens ein weiterer, noch nicht berücksichtigter Effekt auftritt, über den die Stackspannung massiv beeinflusst wird.

Der naheliegendste Grund für den Spannungsabfall findet sich in der Realisierung der Brennstoffzellenkühlung wieder. Und zwar erfolgt sowohl die Brennstoffzellenkühlung als auch die Oxidantenzufuhr in Form von Umgebungsluft über den gleichen Luftvolumenstrom durch einen Ventilator.

Dies hat zum einen eine Erhöhung der Oxidantenzufuhr bei höherer Brennstoffzellenkühlung zur Folge, was aufgrund des höheren Drucks der Förderluft und des somit erhöhten Partialdrucks des Luftsauerstoffs, laut Nernst-Gleichung einen Spannungsanstieg zur Folge hätte.

Zum anderen aber könnte der höhere Luftvolumenstrom über eine Entfeuchtung die Protonenleitfähigkeit (proportional zum Wassergehalt der Membran) der Membran reduzieren. Dies würde sich negativ auf die Zellspannung auswirken und somit eine mögliche Erklärung für den beobachteten Spannungsabfall darstellen.

Anhand nachfolgender Rechnung wird eine mögliche Membranentfeuchtung überschlägig überprüft.

Dazu wird zunächst die unrealistische Annahme getroffen, dass lediglich 40 % der in der Brennstoffzelle erzeugten Wärme konvektiv über die Kühlluft abgeführt werden. Für die Umgebungsluft wird dabei eine Temperatur von 20°C und eine relative Feuchte von 70 % angenommen. Die Rechnung bezieht sich auf die Lüfterleistung von 55 % der 2. Messreihe, da in diesem Bereich der vorhandene Wärmestrom hoch genug ist, um eine Temperaturabnahme zu bewirken.

Die gesamte Wärmeproduktion der Brennstoffzelle ist dabei:

$$\dot{Q} = P_e \cdot \left(\frac{1,25V}{U_z} - 1 \right) \quad (5.15)$$

Die durch die Luft abgeführte Wärme soll 40 % der gesamten Wärmeerzeugung in der Brennstoffzelle betragen. Daher gilt:

$$0,4 \cdot P_e \cdot \left(\frac{1,25V}{U_z} - 1 \right) = \dot{m}_{kuehlung} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5.16)$$

Der benötigte Luftmassenstrom in Abhängigkeit von der Leistung berechnet sich folgendermaßen (s. Abschnitt 5.3):

$$\dot{m}_{Luft,Oxidant} = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_e}{U_z} \quad (5.17)$$

Da die Brennstoffzellenkühlung und die Oxidantenzufuhr über den gleichen Ventilator erfolgen gilt:

$$\dot{m}_{Kuehlung} = \dot{m}_{Luft,Oxidant} \quad (5.18)$$

Somit folgt:

$$\lambda = \frac{0,4 \cdot (1,25V - U_z)}{c_p \cdot \Delta T \cdot 3,57 \cdot 10^{-7}} = \frac{0,4 \cdot (1,25V - \frac{13,62V}{20})}{1004 \frac{J}{kgK} \cdot (28,3 - 20)K \cdot 3,57 \cdot 10^{-7}} = 76,51 \quad (5.19)$$

Temp (°C)	$\lambda = 1.5$	$\lambda = 2$	$\lambda = 3$	$\lambda = 6$	$\lambda = 12$	$\lambda = 24$
20					213	142
30				194	117	78
40		273	195	112	68	45
50	208	164	118	67	40	26
60	129	101	72	41		
70	82	65	46			
80	54	43	30			
90	37	28				

Abbildung 5.32.: relative Feuchte der Austrittsluft [2]

Wie man in Abbildung 5.32 erkennt, erreicht die Austrittsluft mit der Temperatur von 30°C bei einer Luftzufuhr mit $\lambda=24$ eine relative Feuchte von 78 %.

Die Tabelle ist zwar nur bis $\lambda=24$ aufgetragen, dennoch kann man mit größter Sicherheit davon ausgehen, dass sich bei der Temperatur von 28,3°C mit $\lambda=76,51$ eine relative Luftfeuchtigkeit der Abluft von weit unter 80 % ergeben wird. Die eindeutig zu trockene Kühlluft (siehe Abb. 5.33) führt somit zu einer starken Trocknung der Membran.

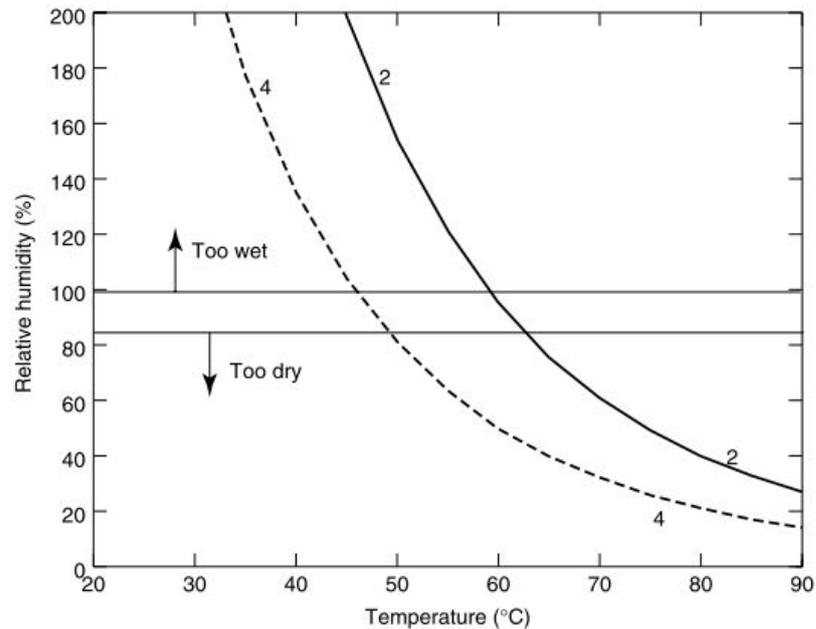


Abbildung 5.33.: relative Austrittsluftfeuchte [2]

Dabei muss hier noch einmal angemerkt werden, dass für die vereinfachte Berechnung des λ der Kühlluftzufuhr angenommen wurde, dass nur 40 % der durch die Brennstoffzelle produzierten Wärme über die Kühlluft abgeführt werden. Im hier vorliegenden Praxisfall sind Werte weit höher als 40 % realistischer, wodurch sich ein noch höheres λ ergibt.

Außerdem wurde in der Rechnung ein Betriebspunkt ausgewählt, der zu einem Temperaturabfall der Brennstoffzelle führt. Der insgesamt abgeführte Wärmestrom ist also größer als der in der Berechnung berücksichtigte Wärmestrom, der die Brennstoffzellentemperatur konstant halten würde. Im vorliegenden Fall ist die Membrantrocknung somit noch höher, als durch die Rechnung nachgewiesen.

Der Einfluss der Membrantrocknung kann auch anhand des zeitlichen Verlaufs der Stackspannung bei konstanter Lüfterleistung erkannt werden, wie hier beispielsweise bei der dritten Messreihe und der Lüfterleistung von 71 %.

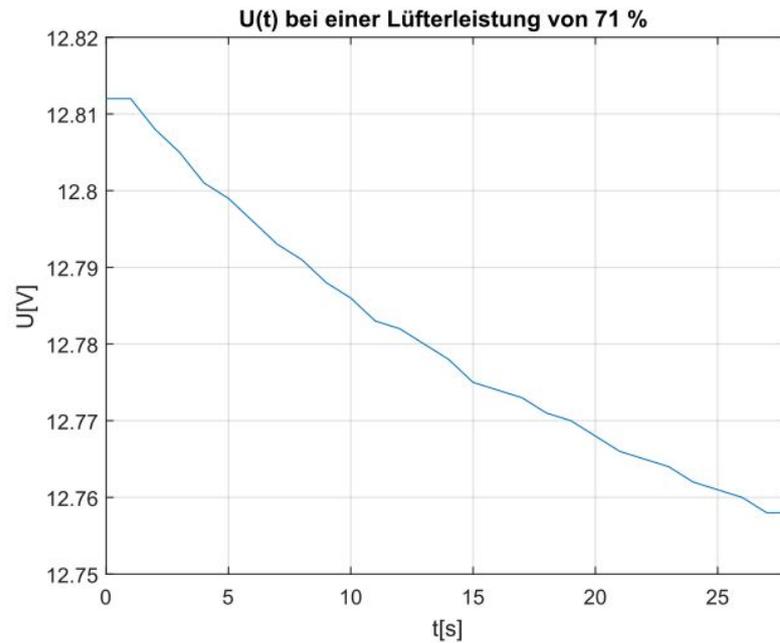


Abbildung 5.34.: $U(t)$ bei konstanter Lüfterleistung

Der in der Abbildung erkennbare exponentielle Abfall der Stackspannung ist charakteristisch für den vorliegenden Stoffübergang des Wassers von der Brennstoffzellenmembran an die Kühlluft. Mit fortschreitender Zeit wird die treibende Größe der Membrantrocknung, nämlich das Konzentrationsgefälle an Wasser zwischen der Membran und der Kühlluft, immer geringer. Aufgrund dessen wird die zeitliche Spannungsänderung betragsmäßig immer geringer.

5.2.5. Eignung zur Labordurchführung

Aus den vorangegangenen Abschnitten ist hervorgegangen, dass der Einfluss der Kühlung und somit der Brennstoffzellentemperatur auf das Betriebsverhalten der Brennstoffzelle aufgrund unterschiedlicher Nebeneinflüssen, beispielsweise der Membranfeuchte, stark verfälscht wird.

Durch die Regelung sowohl der Oxidantenzufuhr als auch der Kühlung über denselben Ventilator kommt es zu einer massiven Beeinflussung sämtlicher Betriebsparameter. Dadurch wird die Bewertung des Temperatureinflusses erschwert.

Hinzu kommt, dass aufgrund einer einzigen Temperaturmessstelle keine

Informationen zur Temperaturverteilung innerhalb der Brennstoffzelle vorhanden sind.

Über die Aufnahme der Stackspannung in Abhängigkeit von der Lüfterleistung könnte rechnerisch eine mögliche Entfeuchtung der Brennstoffzellenmembran nachgewiesen werden (s. Abschnitt 5.2.4.3).

Die Bewertung des Temperatureinflusses auf den Brennstoffzellenbetrieb kann über einen Vergleich von U-I-Kennlinien mit unterschiedlichen Anfangstemperaturen erfolgen (s. Abbildung 5.12 und 5.13).

5.3. Volumenstrom und Stöchiometrie

5.3.1. Theorie

5.3.1.1. Volumenstrom

Nach dem Faraday'schen Gesetz ($n = Q/zF$) lässt sich der Gasbedarf einer Einzelzelle als Molenstrom \dot{n} berechnen:

$$\dot{n} = \frac{1}{z \cdot F} \quad (5.20)$$

Mit Wasserstoff als Brennstoff erhält man:

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{1}{z \cdot F} = \frac{1}{2 \cdot 96485,332 \frac{C}{mol}} = 5,182 \cdot 10^{-6} \frac{mol}{As} \quad (5.21)$$

Sinnvoller als die Angabe der molaren Größe ist die Angabe als Volumenstrom in Normliter pro Ampere und Minute (Nl/A min). Die Umrechnung erfolgt dabei über das Molvolumen eines idealen Gases ($V_{mol} = V/n = RT/p = 22,414$ Nl/mol) unter Normbedingungen.

$$\dot{V} = \dot{n} \cdot V_{mol} \cdot 60 \frac{s}{min} \quad (5.22)$$

Insgesamt erhält man folgende Werte für Wasserstoff- und Sauerstoffvolumenstrom pro Einzelzelle:

$$\dot{V}_{H_2} = 7 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (5.23)$$

$$\dot{V}_{O_2} = 3,5 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (5.24)$$

Bei Brennstoffzellenbetrieb mit Luft als Oxidationsmittel ergibt sich der benötigte Volumenstrom unter Division des Molanteils Sauerstoff der Luft $x=0,21$ zu:

$$\dot{V}_{Luft} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin}}{0,21} = 16,6 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (5.25)$$

5.3.1.2. Gasumsatz und Stöchiometrie

Die benötigten Volumenströme aus dem vorigen Abschnitt entsprechen einer Stöchiometrie von $\lambda=1$ bzw. einem Gasumsatz von 100 %. Der Gasumsatz ist dabei der Kehrwert der Stöchiometrie.

$$u = \frac{1}{\lambda} \quad (5.26)$$

In der Praxis kann die Brennstoffzelle die Reaktionsgase nicht vollständig umsetzen. Daher ist die Stöchiometrie $\lambda>1$ bzw. der Gasumsatz $u<100$ %. Es müssen der Brennstoffzelle also höhere Volumenströme zugeführt werden, als die theoretisch berechneten [10].

Der Gasbedarf einer Einzelzelle berechnet sich folgendermaßen:

$$\dot{V}_{H_2} = \lambda_{H_2} \cdot 7 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (5.27)$$

$$\dot{V}_{O_2} = \lambda_{O_2} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (5.28)$$

Bzw. im Betrieb mit Luft als Oxidationsmittel:

$$\dot{V}_{Luft} = \lambda_{Luft} \cdot 16,6 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (5.29)$$

Der Stromwirkungsgrad und damit der Gesamtwirkungsgrad der Brennstoffzelle ist umgekehrt proportional zum stöchiometrischen Faktor λ der Anodenreaktion (s. Gl. 6.37). Zur Maximierung des Wirkungsgrads sollte λ_{Anode} daher möglichst nah beim Wert 1 liegen. Realistisch sind Werte $\lambda_{\text{Anode}} \leq 1,5$ und $1,5 \leq \lambda_{\text{Kathode}} \leq 4$.

5.3.2. Praxis

Die Abhängigkeit der Stackspannung vom Wasserstoffvolumenstrom wurde bei den zwei Stromstärken 1 A und 2 A untersucht. Dazu wurde bei beiden Stromstärken der stöchiometrische Faktor der Wasserstoffzufuhr λ_{H_2} zwischen 1,05 und 3 erhöht.

Der Spannungsverlauf bei der Stromstärke von $I=1$ A ist in Abbildung 5.35 und bei der Stromstärke von $I=2$ A in Abbildung 5.37 dargestellt. In Abbildung 5.36 und 5.38 sind die beiden Graphen vergrößert dargestellt.

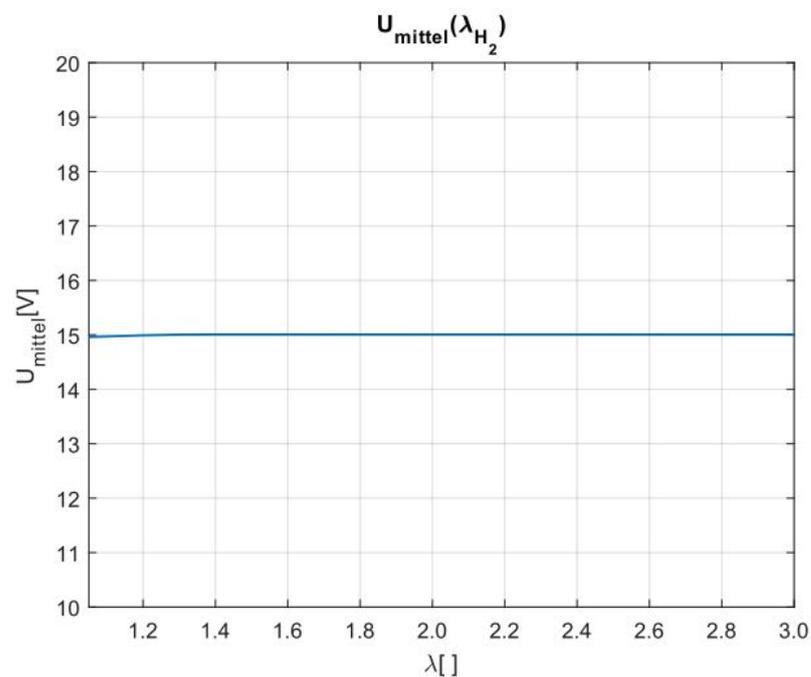
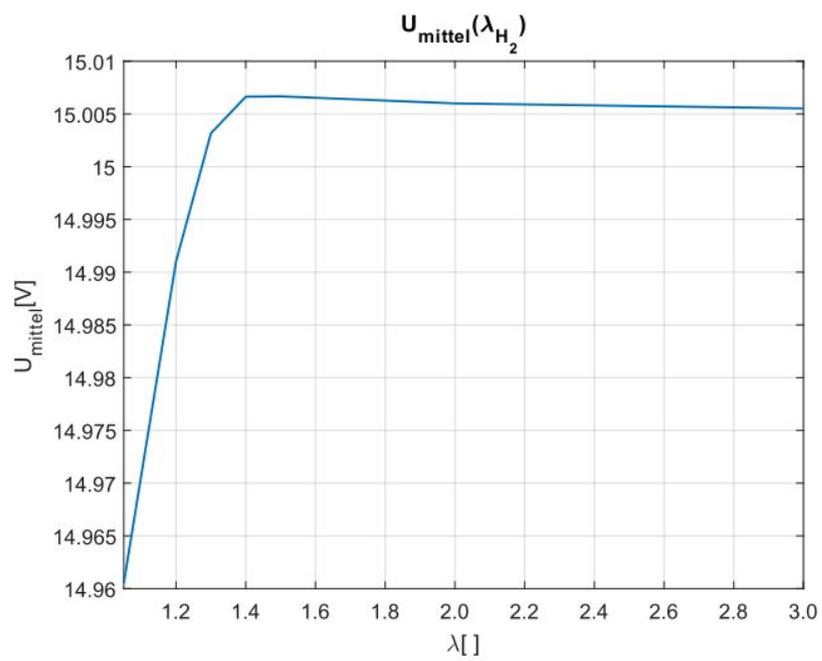
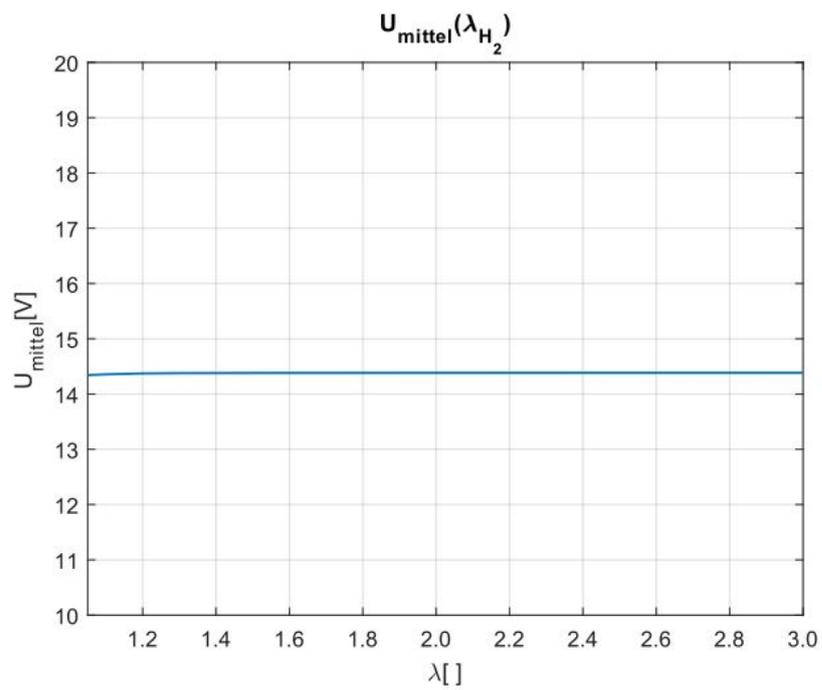
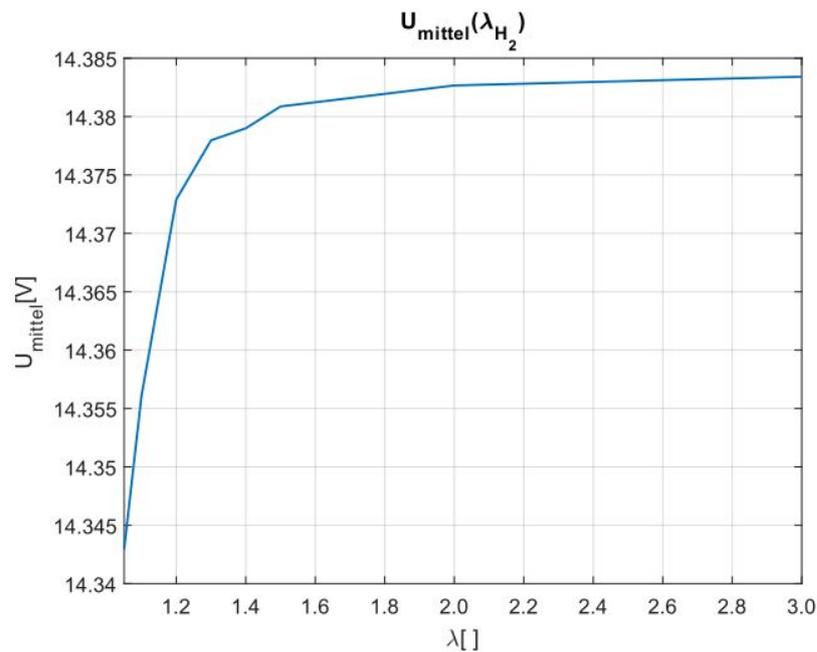


Abbildung 5.35.: $U(\lambda_{\text{H}_2})$ bei $I=1$ A

Abbildung 5.36.: $U(\lambda_{H_2})$ bei $I=1$ A vergrößertAbbildung 5.37.: $U(\lambda_{H_2})$ bei $I=2$ A

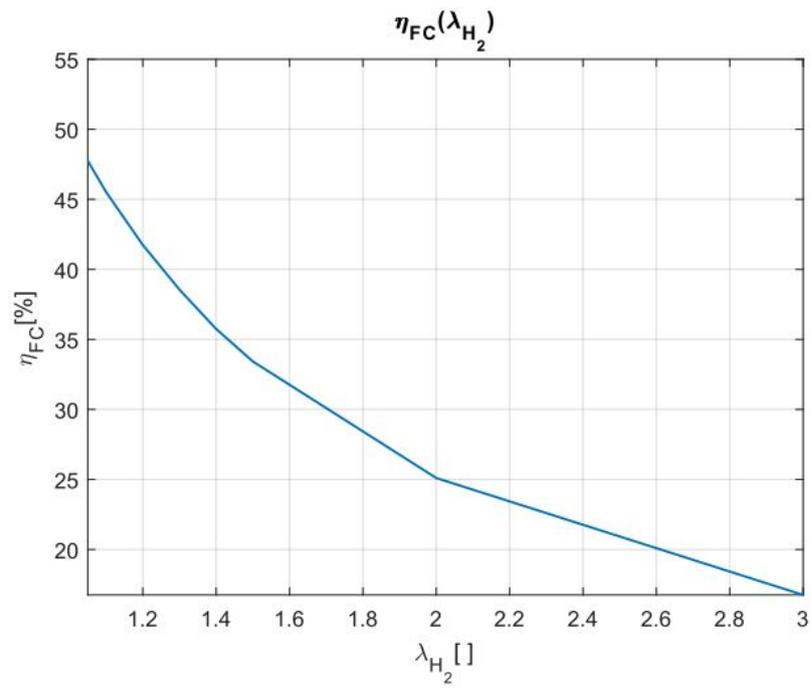
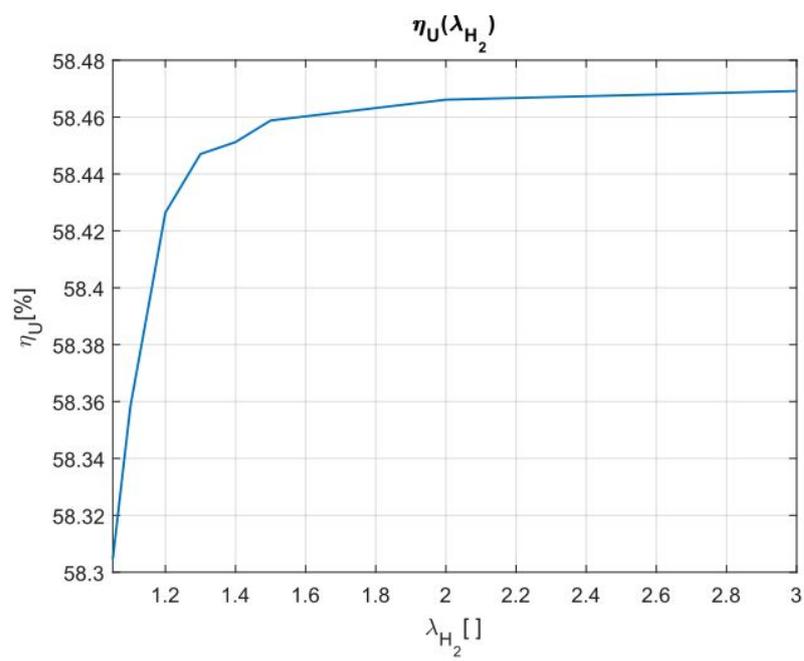
Abbildung 5.38.: $U(\lambda_{\text{H}_2})$ bei $I=2$ A vergrößert

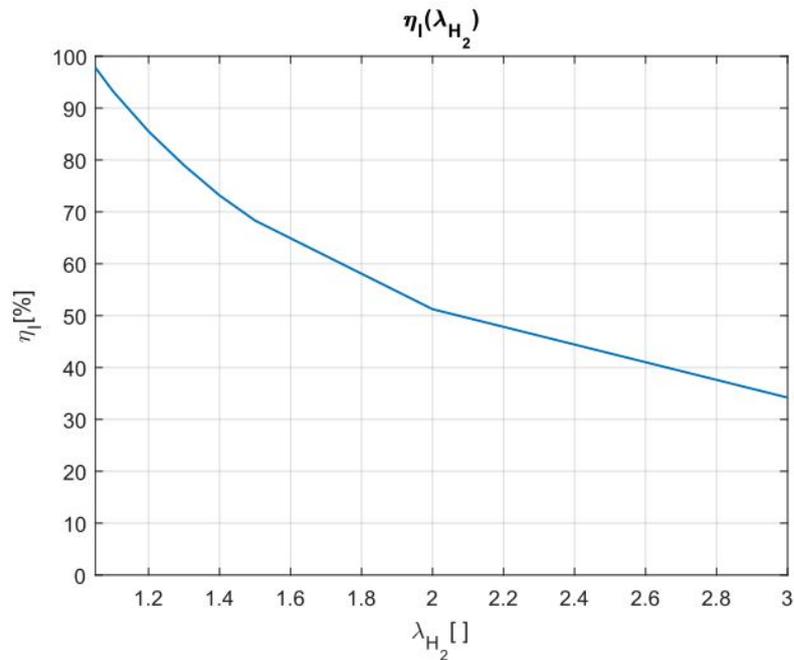
Für beide Stromstärken ergibt sich bei überstöchiometrischer Wasserstoffzufuhr mit $\lambda_{\text{H}_2} > 1$, verglichen mit der stöchiometrischen Wasserstoffzufuhr ($\lambda = 1$), ein sehr geringer Spannungsanstieg. Bei hohen λ_{H_2} -Werten stellt sich eine nahezu konstante Stackspannung ein.

5.3.3. Vergleich Theorie und Praxis

In Abbildung 5.39 ist der Brennstoffzellen-Wirkungsgrad η_{FC} und in den Abbildungen 5.40 und 5.41 der Spannungs- und Stromwirkungsgrad in Abhängigkeit des Stöchiometriefaktors der Wasserstoffzufuhr λ_{H_2} dargestellt. Bei Erhöhung des zugeführten Wasserstoffvolumenstroms kommt es zu einer anfänglichen, geringen Erhöhung der Stackspannung und damit auch des Spannungswirkungsgrads. Bei $\lambda_{\text{H}_2} > 1,4$ bleiben die Spannung, sowie auch der Spannungswirkungsgrad annähernd konstant.

Durch die Reduzierung des Stromwirkungsgrads mit zunehmendem λ_{H_2} erfolgt insgesamt ein Abfall des Gesamtwirkungsgrads η_{FC} der Brennstoffzelle. Der maximale Wirkungsgrad wird bei $\lambda_{\text{H}_2} = 1$ erreicht.

Abbildung 5.39.: $\eta_{FC}(\lambda_{H_2})$ Abbildung 5.40.: $\eta_U(\lambda_{H_2})$

Abbildung 5.41.: $\eta_I(\lambda_{H_2})$

5.3.4. Eignung zur Labordurchführung

Sowohl der Verlauf der Stackspannung, als auch des Brennstoffzellenwirkungsgrads η_{FC} können in Abhängigkeit vom stöchiometrischen Faktor der Wasserstoffzufuhr λ_{H_2} untersucht werden. Vor allem die Untersuchung des Brennstoffzellenwirkungsgrads in Abhängigkeit von λ_{H_2} sollte Teil der Versuchsauswertung sein.

Der Einfluss des Wasserstoffvolumenstroms auf den Brennstoffzellenbetrieb scheint dabei kaum durch Nebeneinflüsse verfälscht zu werden. Außerdem ist die Zeitdauer zur Versuchsdurchführung ziemlich gering. Daher sollte im Rahmen des Labors die Abhängigkeit des Brennstoffzellenbetriebs vom Wasserstoffvolumenstrom bei mindestens einer Stromstärke untersucht werden.

5.4. Bereitstellungsart der Brennstoffe

Dieser Abschnitt bezieht sich auf den vorgeschlagenen Versuch zur Untersuchung des Unterschiedes zwischen dem Brennstoffzellenbetrieb unter reinem Wasserstoff und dem Betrieb unter Verwendung eines Wasserstoff-Inertgas-Gemisches [12].

5.4.1. Theorie

In den theoretischen Grundlagen wurde die Nernstgleichung (s. Gl. 3.14) vorgestellt, anhand derer die maximale Zellspannung (Leerlaufspannung) aus den vorhandenen Betriebsparametern ermittelt werden kann.

Diese Nernstspannung ist von der Reaktionstemperatur (Brennstoffzellentemperatur) und den Aktivitäten der Reaktanten abhängig. Höhere Spannungen und somit auch Wirkungsgrade sind im Betrieb der Brennstoffzelle mit reinem Wasserstoff als Brennstoff und reinem Sauerstoff als Oxidationsmittel erreichbar.

Mit zunehmendem Inertgasanteil sowohl des Brennstoffs als auch des Oxidationsmittels ist somit aufgrund des abnehmenden Partialdrucks der reaktionsfähigen Gase eine Verringerung der Aktivität und somit ein Spannungsabfall zu erwarten.

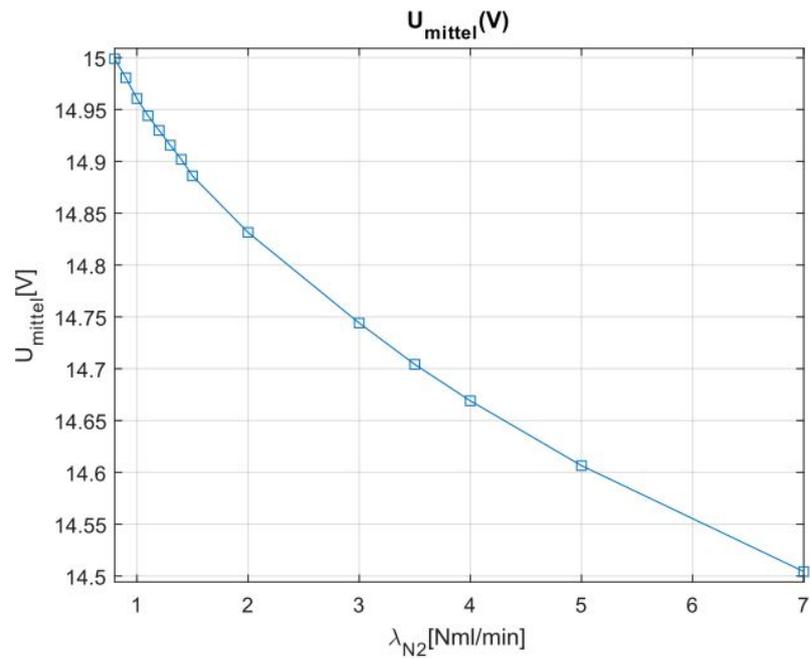
5.4.2. Praxis

Die Abhängigkeit der Stackspannung von der Brennstoffzusammensetzung wurde zunächst bei einer konstanten Stromstärke von $I=1$ A und einem konstanten Wasserstoffvolumenstrom von $\dot{V}_{H_2}=500$ Nml/min untersucht. Es wurde Stickstoff im Volumestrombereich $\dot{V}_{N_2}=500 \dots 3500$ Nml/min beigemischt. Lambda der Stickstoffzufuhr lag also bei $\lambda_{N_2}=1 \dots 7$.

Zwischen $\lambda_{N_2}=1$ und $\lambda_{N_2}=1,5$ wurde λ jeweils um 0,1 gesteigert. Die restlichen Schrittweiten des lambda-Werts können aus Abbildung 5.42 entnommen werden. Die Betriebspunkte wurden für je 60 Sekunden eingestellt.

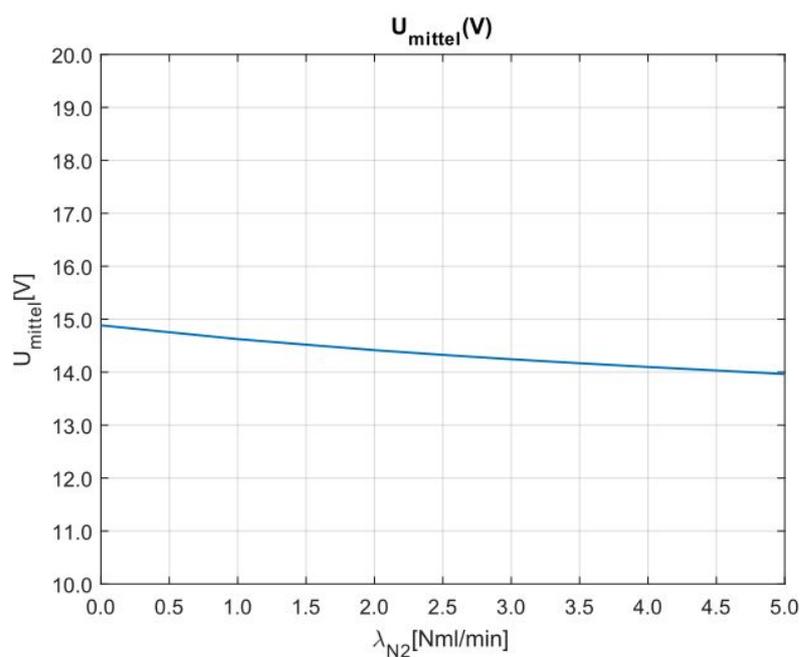
Aufgrund der Trägheit des Stickstoffdurchflussreglers wird das angeforderte λ_{N_2} mit einer starken Verzögerung in den resultierenden Volumenstrom umgesetzt, weshalb für die Auswertung nur die Messpunkte im Toleranzbereich von ± 1 Nml/min zum eingestellten Volumenstrom herangezogen wurden.

Folgender Zusammenhang zwischen Stackspannung und Stickstoffbeimischung wurde dabei verzeichnet:

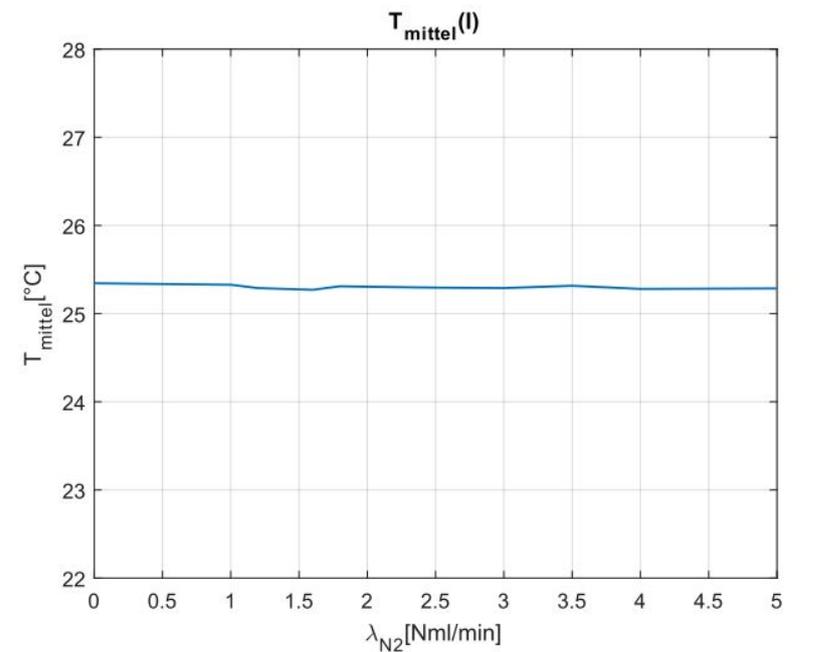
Abbildung 5.42.: $U(\lambda_{N_2})$ bei $I=1A$

Wie in der obigen Abbildung zu sehen ist, erfolgt mit zunehmender Stickstoffbeimischung ein Abfall der Stackspannung. Das Spannungsgefälle wird dabei mit zunehmendem λ_{N_2} geringer.

Eine zweite Messreihe wurde bei der Stromstärke von 2 A aufgenommen. Folgender Verläufe der Stackspannung und der Temperatur konnten hier mit zunehmendem λ_{N_2} beobachtet werden:

Abbildung 5.43.: $U(\lambda_{\text{N}_2})$ bei $I=2\text{A}$

Genau wie bei der Stromstärke $I=1\text{ A}$ erfolgt bei der Stromstärke $I=2\text{ A}$ mit zunehmender Stickstoffbeimischung ein Abfall der Stackspannung. Auch hier wird das Spannungsgefälle zunehmendem λ_{N_2} geringer. Die gemessene Brennstoffzellentemperatur (s. Abb. 5.44) bleibt mit zunehmendem λ_{H_2} nahezu konstant.

Abbildung 5.44.: $T(\lambda_{\text{N}_2})$ bei $I=2\text{A}$

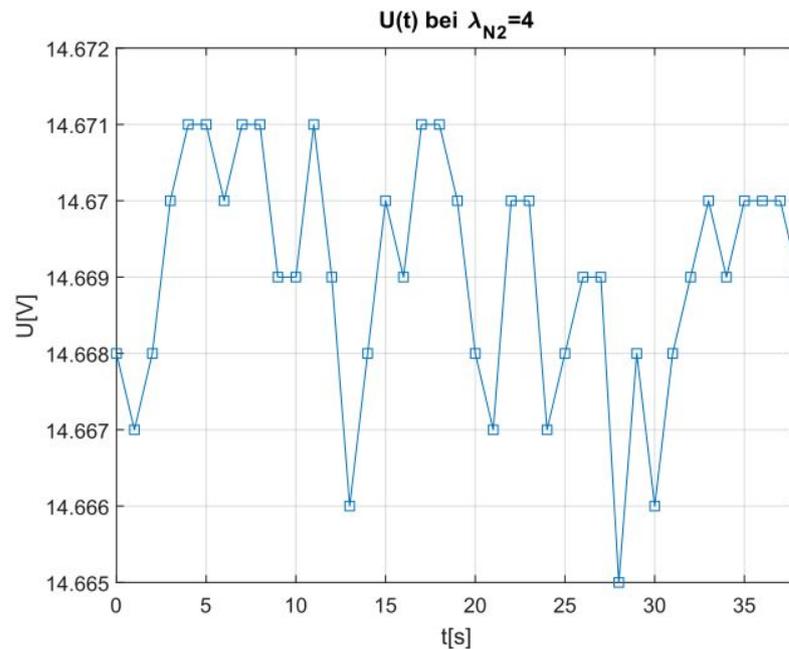
5.4.3. Vergleich Theorie und Praxis

5.4.3.1. Membranfeuchte

Aufgrund des abnehmenden Wasserstoffpartialdrucks mit zunehmendem Stickstoffanteil des Brennstoffs, war ein Spannungsabfall zu erwarten.

Der exponentielle Spannungsabfall mit zunehmender Stickstoffbeimischung, lässt jedoch vermuten, dass möglicherweise wieder die Membranfeuchte eine entscheidende Rolle im Spannungsabfall spielt (s. Abschnitt 5.5). Durch die Erhöhung des Stickstoffvolumenstroms und somit des gesamten Brennstoffvolumenstroms erfolgt möglicherweise eine anodenseitige Entfeuchtung der Zellmembran, die die Leitfähigkeit reduziert.

Zur Überprüfung dieser Vermutung wurde der in Abbildung 5.45 dargestellte Zeitverlauf der Stackspannung bei $\lambda=4$ untersucht.

Abbildung 5.45.: U(t) bei $\lambda_{N_2}=4$

Der Zeitverlauf der Stackspannung bringt keine eindeutigen Erkenntnisse zum Verhalten der Brennstoffzelle hervor. Die angenommene Entfeuchtung der Brennstoffzellenmembran wäre mit zunehmender Zeitdauer über einen zunehmenden Spannungsabfall erkennbar. In Abb. 5.45 ist jedoch kein effektiver Spannungsabfall erkennbar. Somit wird auch noch nach 30 Sekunden der Anfangswert der Spannung von 14,668V erreicht.

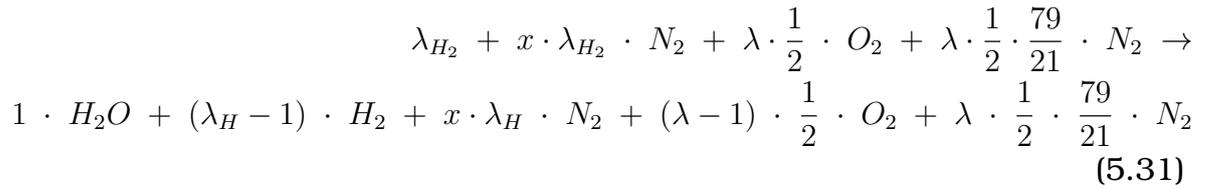
Mit größter Wahrscheinlichkeit sind die schwankenden Stackspannungswerte auf die nicht ideale Durchmischung der Brennstoffgase (H_2 , N_2) oder auf Messungenauigkeiten und Störungen zurückzuführen.

5.4.3.2. Partialdruck

Möglicherweise wird der exponentielle Spannungsabfall also doch hauptsächlich durch den abnehmenden Partialdruck des Wasserstoffs unter Stickstoffbeimischung verursacht. Zur Überprüfung dieser Annahme erfolgt eine genauere Untersuchung der Nernst-Gleichung genauer.

$$\Delta E_N = \Delta E_m^0 - \frac{R_m \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \prod_i a_i^{\gamma_i} \quad (5.30)$$

Mit der vorliegenden Reaktionsgleichung



ergibt sich also folgende Nernstspannung:

$$E_N = E_m^0 - \frac{R_m \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{a_{H_2O}^1 \cdot a_{N_2}^{\frac{\lambda}{2} \cdot \frac{79}{21}} \cdot a_{O_2}^{\frac{\lambda-1}{2}} \cdot a_{N_2}^{\lambda_H \cdot x} \cdot a_{H_2}^{\lambda_H-1}}{a_{H_2}^{\lambda_H} \cdot a_{O_2}^{\frac{\lambda}{2}} \cdot a_{N_2}^{\frac{\lambda}{2} \cdot \frac{79}{21}} \cdot a_{N_2}^{\lambda_H \cdot x}} =$$

$$E_m^0 - \frac{R_m \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{a_{H_2O}^1}{a_{H_2}^1 \cdot a_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \quad (5.32)$$

Unter der Annahme, dass es sich beim Wasserstoff und Stickstoff um ideale Gase handelt, kann die Aktivität des Wasserstoffs folgendermaßen bestimmt werden:

$$a_{H_2} = \frac{p_{H_2}}{p_{ges}} = \frac{n_{H_2}}{n_{ges}} = \frac{\dot{n}_{H_2}}{\dot{n}_{ges}} = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot \rho_{H_2} \cdot \frac{1}{M_{H_2}}}{\dot{V}_{H_2} \cdot \rho_{H_2} \cdot \frac{1}{M_{H_2}} + \dot{V}_{N_2} \cdot \rho_{N_2} \cdot \frac{1}{M_{N_2}}} \quad (5.33)$$

Gleichung 5.33 eingesetzt in 5.31 liefert Gleichung 5.34.

$$E_N = E_m^0 - \frac{R_m \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{a_{H_2O}^1}{\frac{\dot{V}_{H_2} \cdot \rho_{H_2} \cdot \frac{1}{M_{H_2}}}{\dot{V}_{H_2} \cdot \rho_{H_2} \cdot \frac{1}{M_{H_2}} + \dot{V}_{N_2} \cdot \rho_{N_2} \cdot \frac{1}{M_{N_2}}} \cdot a_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \quad (5.34)$$

Gleichung 5.34 abgeleitet nach dem Stickstoffvolumenstrom ergibt Gleichung 5.35.

$$\frac{dE_N}{d\dot{V}_{N_2}} = -\frac{R_m \cdot T}{z \cdot F} \cdot \frac{\rho_{N_2} \cdot \frac{1}{M_{N_2}}}{\dot{V}_{H_2} \cdot \rho_{H_2} \cdot \frac{1}{M_{H_2}} + \dot{V}_{N_2} \cdot \rho_{N_2} \cdot \frac{1}{M_{N_2}}} \quad (5.35)$$

Aus Gleichung 5.35 wird ersichtlich, dass das Spannungsgefälle bei geringen Stickstoffvolumenströmen größer als bei hohen Stickstoffvolumenströmen ist. Dieser Zusammenhang zwischen Stickstoffvolumenstrom und Stackspannung konnte auch in der Messreihe beobachtet werden (s. Abb. 5.42).

Die Spannungsänderung ist ebenso vom konstanten Volumenstrom des Wasserstoffs abhängig. Bei höheren Wasserstoffvolumenströmen macht sich eine Erhöhung des Stickstoffvolumenstroms weniger deutlich als bei geringen Wasserstoffvolumenströmen bemerkbar. Somit sollte bei der experimentellen Untersuchung der "Brennstoffverunreinigung" darauf geachtet werden, dass der Wasserstoffvolumenstrom nicht zu hoch eingestellt wird.

In Abbildung 5.46 ist die Abhängigkeit des Brennstoffzellenwirkungsgrads η_{FC} vom stöchiometrischen Faktor der Stickstoffzufuhr λ_{N_2} dargestellt. Insgesamt erfolgt mit zunehmendem Stickstoffanteil des Brennstoffs ein Wirkungsgradabfall.

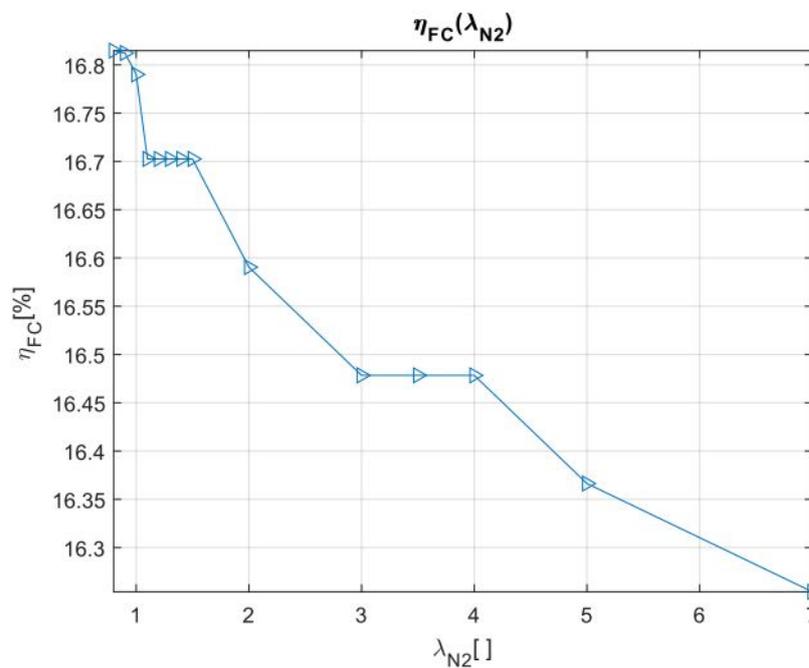


Abbildung 5.46.: $\eta_{FC}(\lambda_{N_2})$

5.4.3.3. Anodentemperatur

Durch die momentane Umsetzung der Temperaturmessung ist nur eine ungenaue lokale Messung der Brennstoffzellentemperatur möglich.

Mit steigendem Volumenstrom des Brennstoffs erfolgt möglicherweise ein Temperaturabfall an der Anode, welcher über die verminderte Reaktivität des Brennstoffs zum beobachteten Spannungsabfall beiträgt. Zur Überprüfung dieser Vermutung wären zusätzliche Temperaturmessungen an den

Elektroden des Brennstoffzellen-Stacks erforderlich.

Aufgrund der niedrigen Betriebstemperatur der Brennstoffzelle von maximal bis zu 30 °C, sind aber keine großen lokalen Temperaturänderungen der Brennstoffzelle zu erwarten. Somit sollte die abnehmende Anodentemperatur nicht nennenswert zum beobachteten Spannungsabfalls beitragen.

5.4.3.4. Leerlaufspannung

Die Untersuchung der Abhängigkeit der Leerlaufspannung vom Stickstoffanteil erfolgte unter schrittweiser Erhöhung der Stickstoffzufuhr im Bereich zwischen $\lambda_{N_2}=1$ und $\lambda_{N_2}=7$, bei einem konstanten Wasserstoffvolumenstrom von 250 Nml/min. Der Spannungsverlauf in Abhängigkeit von λ_{N_2} ist in Abbildung 5.47 graphisch dargestellt.

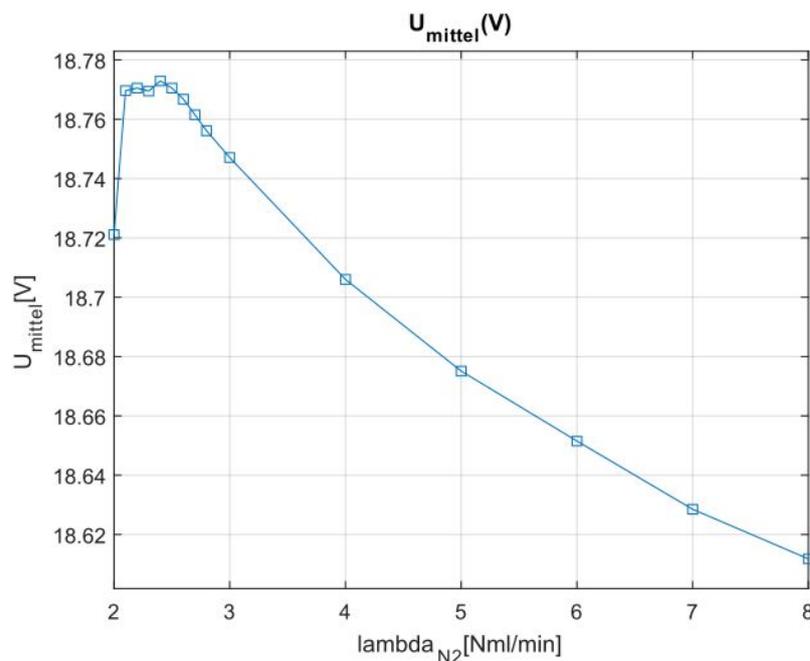


Abbildung 5.47.: $U(\lambda_{N_2})$ bei $I=0A$

Unter hoher Stickstoffbeimischung verhält sich die Brennstoffzelle erwartungsgemäß. Die Spannung sinkt exponentiell. Im Bereich geringer Stickstoffbeimischung hingegen erfolgt entgegen der Erwartungen mit zunehmendem Stickstoffanteil zunächst ein Spannungsanstieg, bevor der Spannungsabfall einsetzt.

Aus den theoretischen Grundlagen ist kein direkter Effekt der Stickstoff-

zumischung zu finden, der den beobachteten Spannungsanstieg erklären könnte.

Der Spannungsanstieg wird möglicherweise erneut über Quereinflüsse herbeigeführt. Insgesamt erfolgt ein Temperaturabfall in der Brennstoffzelle (s. Abb. 5.48), der zum einen auf die im Leerlauf fall vernachlässigbar geringe Wärmeerzeugung in der Brennstoffzelle und zum anderen auf den steigenden Brennstoffvolumenstrom und die damit verbundene Erhöhung der anodenseitigen Kühlung zurückzuführen ist. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Temperaturverlauf und dem anfänglichen Spannungsanstieg scheint aber nicht vorzuliegen.

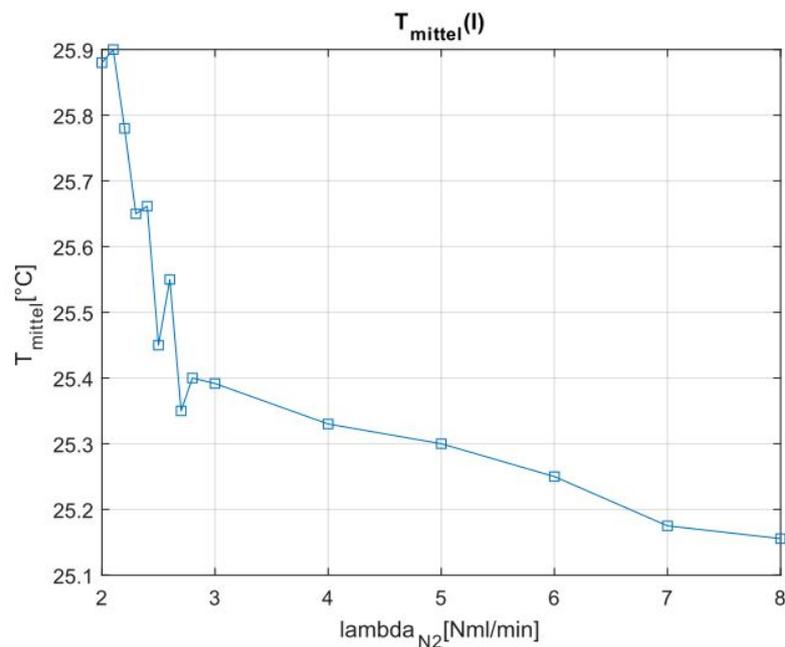


Abbildung 5.48.: $T(\lambda_{\text{N}_2})$ bei $I=0$ A

Somit ist erneut zu überprüfen, ob eine Änderung der Membranfeuchte für den unerklärbaren anfänglichen Spannungsanstieg zuständig sein könnte. Zur näheren Untersuchung dieses Spannungsanstiegs wurde abwechselnd die Leerlaufspannung unter Stickstoffzufuhr mit dem stöchiometrischen Faktor $\lambda=1$ und ohne Stickstoffzufuhr aufgenommen.

Bei Aktivierung der Stickstoffzufuhr (s. Abb. 5.49) erfolgt zunächst ein Spannungsabfall, wahrscheinlich aufgrund der Abnahme des Wasserstoff-Partialdrucks im Brenngasgemisch. Der Verlauf des Spannungsabfalls wird dabei durch das träge Verhalten der Volumenstromregelung bestimmt. Kurz nachdem

der Sollvolumenstrom und somit das Spannungsminimum aufgrund des minimalen Wasserstoffpartialdrucks erreicht wurde erfolgt ein begrenzter Spannungsanstieg, welcher ein Hinweis für die Annäherung an einen Sättigungszustand ist.

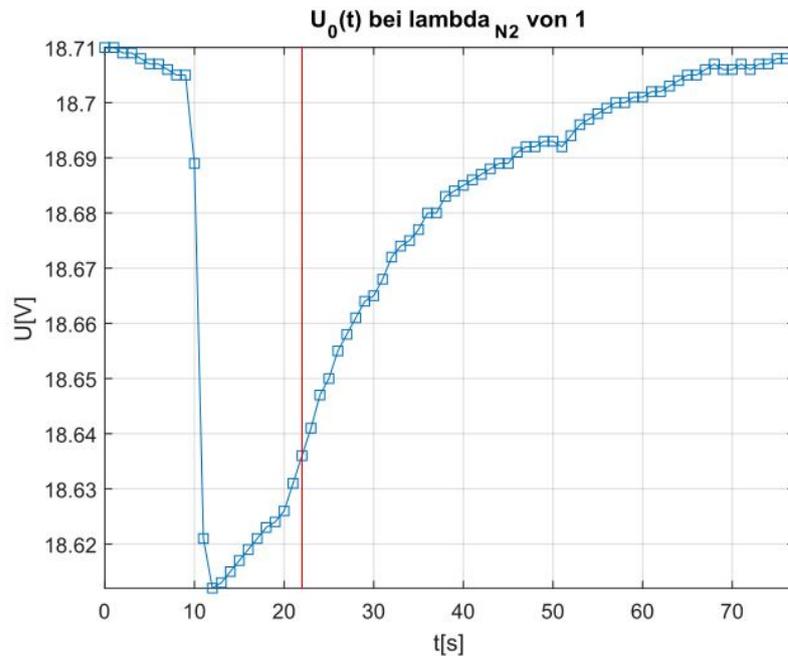
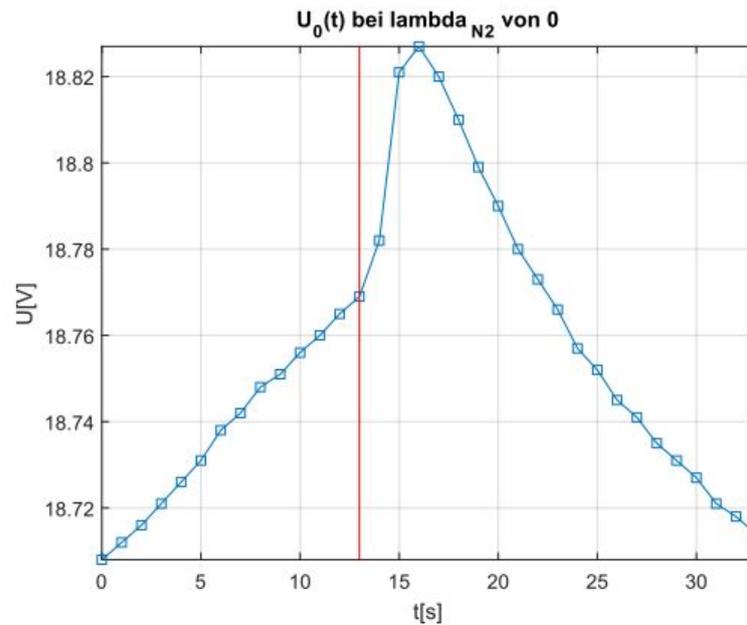


Abbildung 5.49.: $U_0(t)$ unter Stickstoffbeimischung

Nach Abschaltung der Stickstoffzufuhr (s. Abb. 5.50) erfolgt zunächst ein Spannungsanstieg, der möglicherweise auf die Zunahme des Wasserstoff-Partialdrucks an der Anode zurückzuführen ist. Kurz nachdem der Stickstoffvolumenstrom auf 0 Nml/min geregelt wurde und somit aufgrund des maximalen Wasserstoffpartialdrucks der maximale Spannungswert erreicht wurde erfolgt ein exponentieller Spannungsabfall, der ebenso ein Anzeichen für die Annäherung an einen Sättigungszustand ist.

Der maximale Spannungswert wird möglicherweise nicht direkt mit dem Erreichen des Stickstoffvolumenstroms von 0 Nml/min erreicht, da geringe Stickstoffreste an der Anode vorhanden sind, die im Anschluss durch den reinen Wasserstoff weggespült werden.

Abbildung 5.50.: $U_0(t)$ bei Stickstoffabschaltung

Sowohl der beobachtete beschränkte Spannungsanstieg (scheint sich einem oberen Grenzwert anzunähern), als auch der exponentielle Spannungsabfall deuten auf eine Änderung der Membranfeuchte hin. Die Leerlaufspannung sollte aufgrund des nicht vorhandenen Stromflusses eigentlich unabhängig von der Membranfeuchte und somit dem Zellwiderstand sein.

Der ideale Leerlauf scheint jedoch am Versuchsstand nicht realisierbar zu sein. Selbst im eingestellten Leerlauf ist eine Stromstärke von $I=0,001$ A vorhanden, wodurch sich Änderungen der Membranfeuchte durch Spannungsänderungen bemerkbar machen könnten.

Die Ursache des Spannungsanstiegs bei Stickstoffzufuhr könnte somit eine Membranbefeuchtung und des Spannungsabfalls unter reiner Wasserstoffzufuhr eine Membranentfeuchtung sein.

Die einzige mögliche Feuchtequelle stellt dabei der Stickstoff dar. Aufgrund sehr geringer Feuchtegehalte des Stickstoffs erscheint dies jedoch sehr unrealistisch.

5.4.4. Eignung zur Labordurchführung

Insgesamt konnte in diesem Abschnitt beobachtet werden, dass der Stickstoffanteil des zugeführten Brennstoffs keinen allzu großen Einfluss auf die Stackspannung hat. Selbst bei übermäßig hohen Stickstoffbeimischungen kommt es nur zu einer verhältnismäßig geringen Reduzierung des Brennstoffzellenwirkungsgrads.

Die Untersuchung der Brenngaszusammensetzung im Rahmen des Labors ist dennoch sehr empfehlenswert und sollte bei einer oder mehreren Stromstärken durchgeführt werden. Die Auswertung der Versuchsergebnisse kann zum Verständnis der Nernst-Gleichung beitragen. Zusätzlich könnte noch die Abhängigkeit des thermodynamischen Wirkungsgrads von der Stickstoffbeimischung ausgewertet werden.

Die Laboruntersuchungen sollten bei Stromstärken größer als 0 A erfolgen. Der nicht genau erklärbare, anfängliche Spannungsanstieg der Leerlaufspannung mit zunehmendem Stickstoffanteil würde im Rahmen des Labors wahrscheinlich zu Verwirrungen führen.

5.5. Befeuchtung

5.5.1. Theorie

Die Protonenleitfähigkeit und die damit verbundene Brennstoffzellenleistung hängen von der Feuchte der Zellmembran ab. Daher ist die Befeuchtung der Membran für den Brennstoffzellenbetrieb von besonderer Wichtigkeit.

Bei einer zu geringen Feuchtezufuhr erfolgt aufgrund der reduzierten Protonenleitfähigkeit ein Abfall der Zelleistung. Bei übermäßiger Zellbefeuchtung kommt es bei Ablagerung von Wasser an den Elektroden zu einem Leistungsabfall aufgrund der verringerten Reaktionsfläche. Das Wassermanagement der Brennstoffzelle ist von den Betriebsbedingungen der Brennstoffzelle wie Druck und Temperatur abhängig.

5.5.1.1. Externe Gasbefeuchtung

Üblicherweise erfolgt die Membranbefeuchtung über die externe Befeuchtung der Eduktgase. Das Konzept der externen Befeuchtung ist in Abbildung 6.5 schematisch dargestellt. Die besten Ergebnisse werden bei einer Befeuchtung auf 100 % der relativen Feuchte des Brenngases und zwischen 70 und 80 % der relativen Feuchte der Luft erzielt [1].

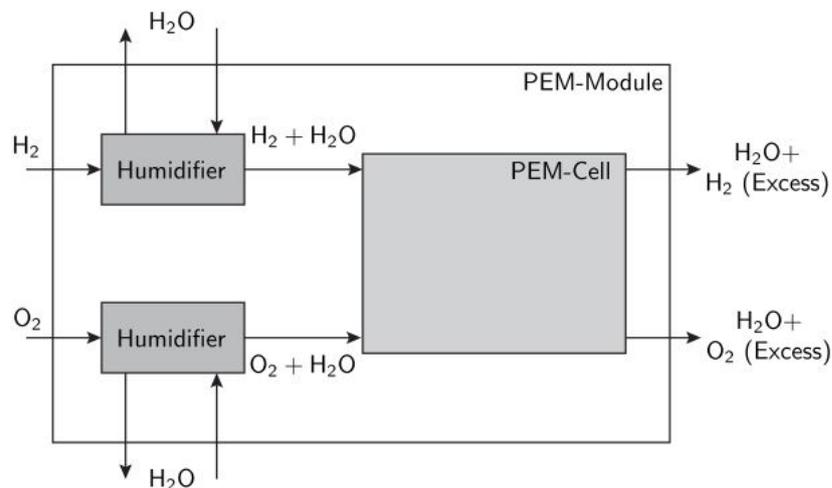


Abbildung 5.51.: Externe Eduktbefeuchtung [1]

5.5.1.2. Interne Befeuchtung

Durch die kathodenseitige Reaktion der Wasserstoffionen mit den Elektronen und dem zugeführten Sauerstoff entsteht Wasser als Abfallprodukt. Aufgrund des Konzentrationsunterschiedes an Wasser zwischen der Kathode und der restlichen Brennstoffzelle (Membran, Anode) erfolgt ein Wasserstofftransport über Diffusion [13].

Die kathodenseitige Wasserproduktion ist proportional zur Stromstärke. Damit steigen auch die Konzentrationsunterschiede und der Stofftransport über Diffusion.

Mit steigender Stromstärke werden aber durch den Protonentransport durch die Membran mehr Wasserteilchen zur Kathode abtransportiert (elektroosmotischer Zug). Eine anodenseitige Trocknung ist die Folge. Der anodenseitigen Trocknung kann über eine externe Befeuchtung des Anodengases entgegengewirkt werden.

5.5.2. Praxis

Die Untersuchung des Feuchteinflusses auf den Brennstoffzellenbetrieb kann momentan, aufgrund fehlender Ausstattung zur Luftbefeuchtung, nur über Änderung der Wasserstofffeuchte erfolgen. Die Wasserstoffbefeuchtung erfolgt dabei in einem Bubbler.

Zunächst wurde die U-I-Kennlinie der Brennstoffzelle unter Befeuchtung des Wasserstoffs (s. Abb. 5.52) und anschließend ohne Befeuchtung (s. Abb. 5.53) aufgenommen.

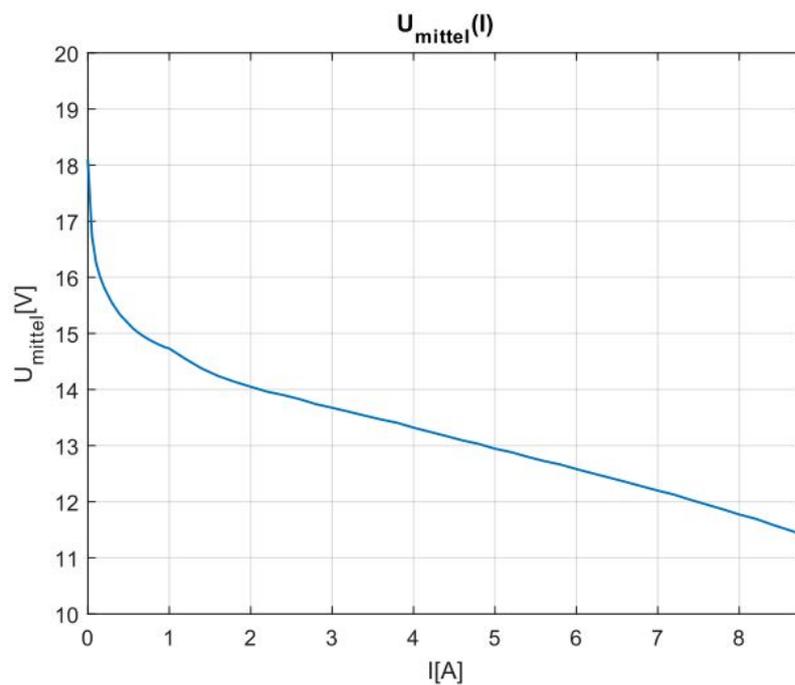


Abbildung 5.52.: U-I-Kennlinie bei Befeuchtung

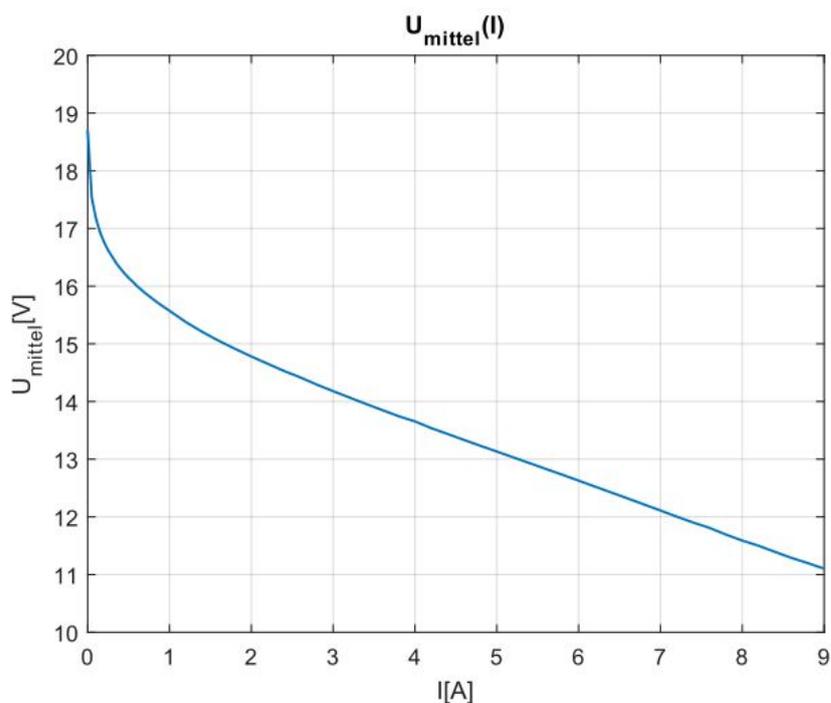


Abbildung 5.53.: U-I-Kennlinie ohne Befeuchtung

Die beiden Kennlinien sind in der Abbildung 5.54 in einem gemeinsamen Graphen dargestellt.

Wie in der Abbildung zu sehen ist, wurden unter externer Brennstoffbefeuchtung im Bereich niedriger Stromstärken, deutlich höhere Spannungen als im "Trockenbetrieb" erreicht. Ab einer Stromstärke von 6,4 A dagegen stellen sich ohne Befeuchtung höhere Spannungen ein.

Die U-I-Kennlinie unter externer Wasserstoffbefeuchtung weist einen steileren Verlauf im linearen Bereich auf, sodass sich die beiden Kennlinien bei einer Stromstärken von etwa 6,4 A schneiden (s. Abb. 5.55).

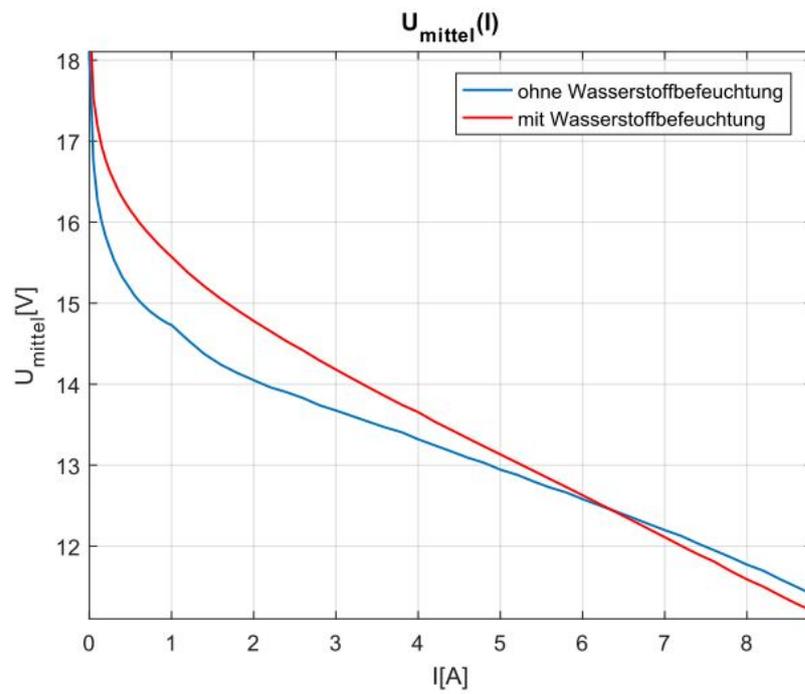


Abbildung 5.54.: U-I-Kennlinie mit und ohne Befeuchtung

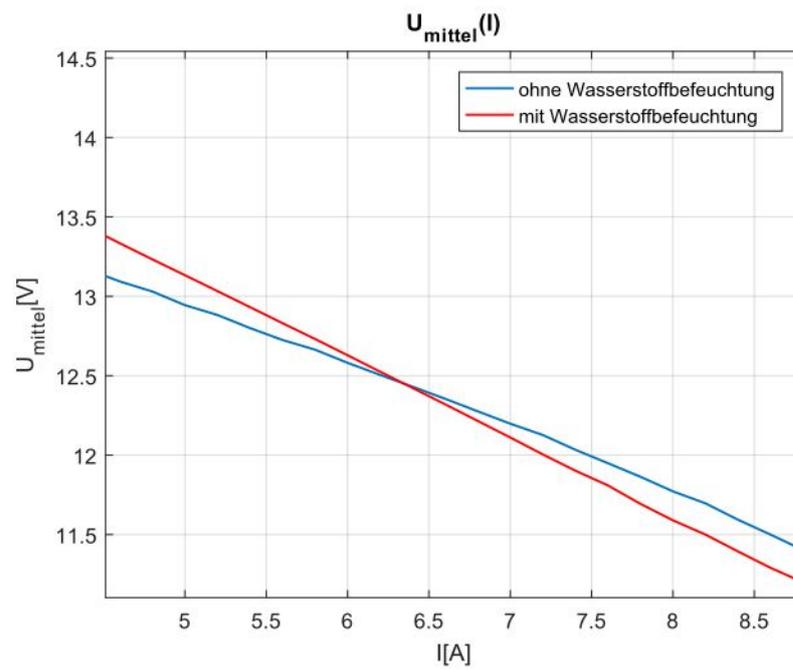


Abbildung 5.55.: Ohmscher Bereich mit und ohne Befeuchtung

5.5.3. Vergleich Theorie und Praxis

Augrund der momentan gegebenen Möglichkeit nur das Anodengas zu befeuchten, wurde erwartet, dass vor allem im Bereich höherer Stromstärken der anodenseitigen Entfeuchtung entgegengewirkt wird.

Entgegen den Erwartungen aber werden unter Brennstoffbefeuchtung im Bereich hoher Stromstärken geringere Spannungen als im Betrieb ohne Befeuchtung erreicht.

Bis zu einer Stromstärke von etwa 6,4 A werden unter Brennstoffbefeuchtung höhere Spannungen und somit auch Wirkungsgrade erreicht (s. Abb. 5.54, 5.56, und 5.57). Der Verlauf der Stromwirkungsgrade η_I ist identisch (s. Abb. 5.58).

Möglicherweise ist es die Feuchtezufuhr die sich vorteilhaft auf die Aktivierungsüberspannung auswirkt.

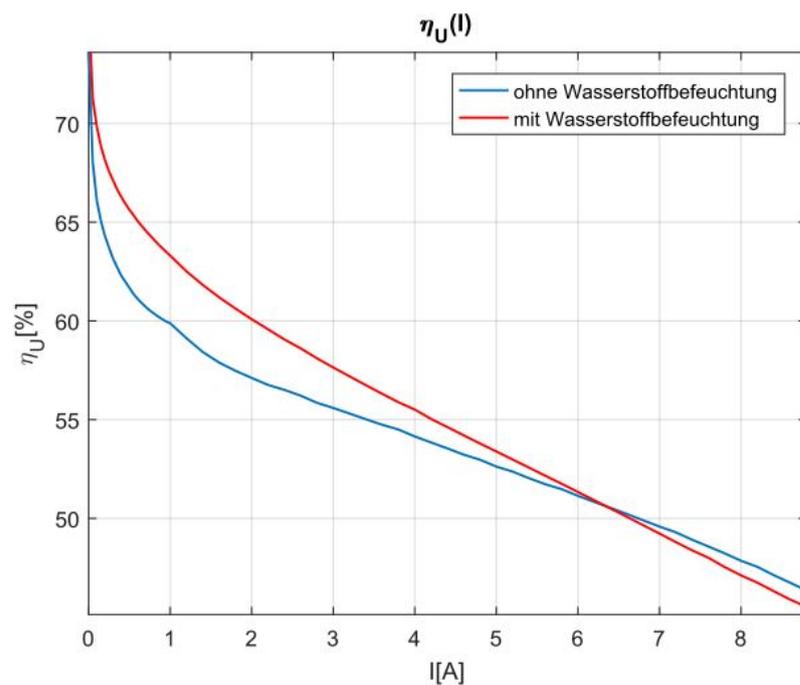
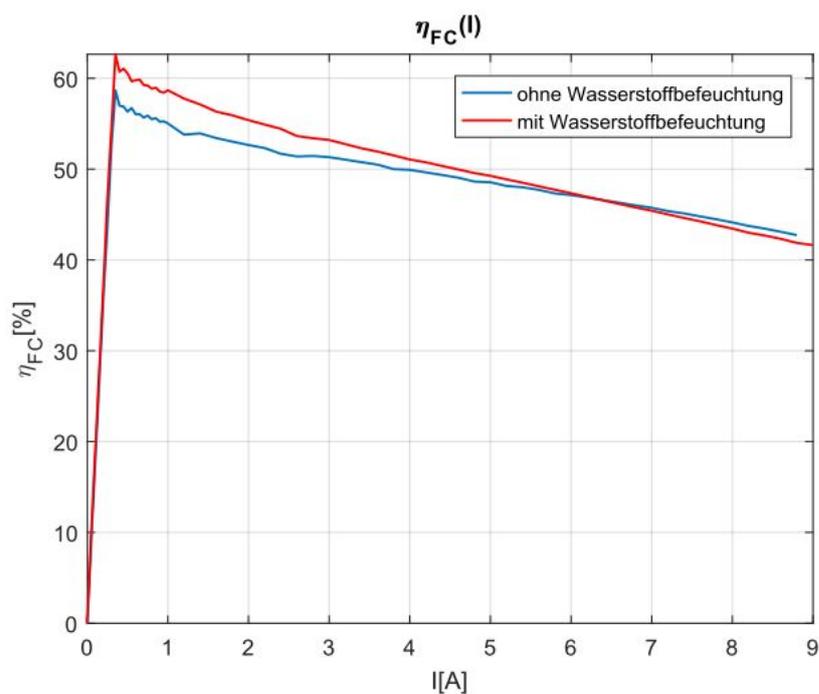
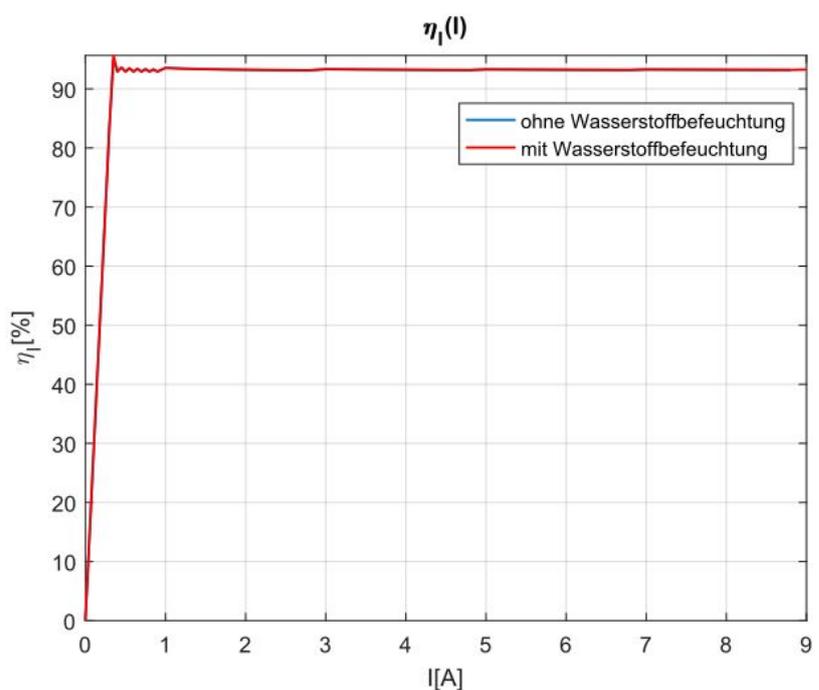


Abbildung 5.56.: $\eta_U(I)$ mit und ohne Brennstoffbefeuchtung

Abbildung 5.57.: $\eta_{FC}(I)$ mit und ohne BefeuchtungAbbildung 5.58.: $\eta_i(I)$ mit und ohne Befeuchtung

Im ohmschen Bereich dagegen werden ohne Brennstoffbefeuchtung höhere Spannungen und Wirkungsgrade erreicht. Dies liegt am erhöhten inneren Widerstand R_i von etwa $0,5 \Omega$ (s. Abb. 5.59) verglichen mit dem Innenwider-

stand ohne Befeuchtung von etwa $0,4 \Omega$ (s. Abb. 5.60).

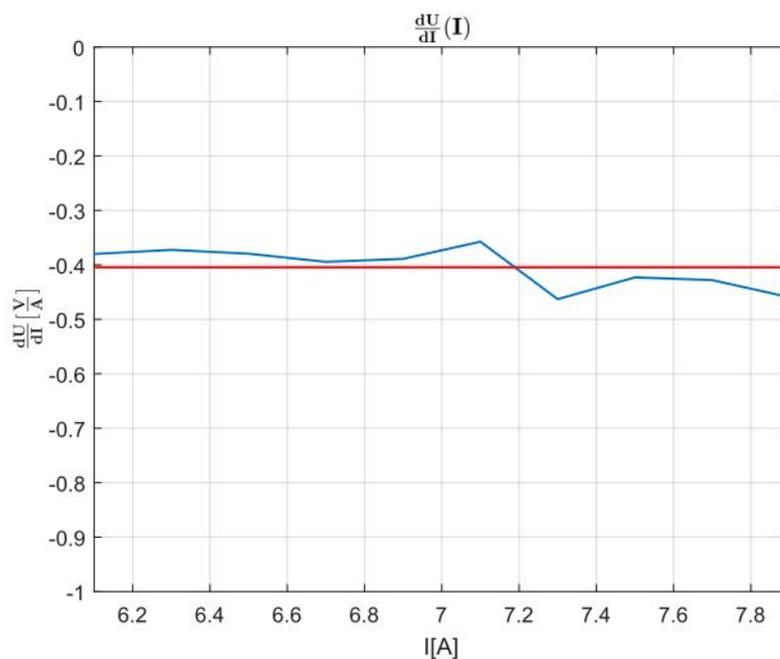


Abbildung 5.59.: R_i ohne externe Wasserstoffbefeuchtung

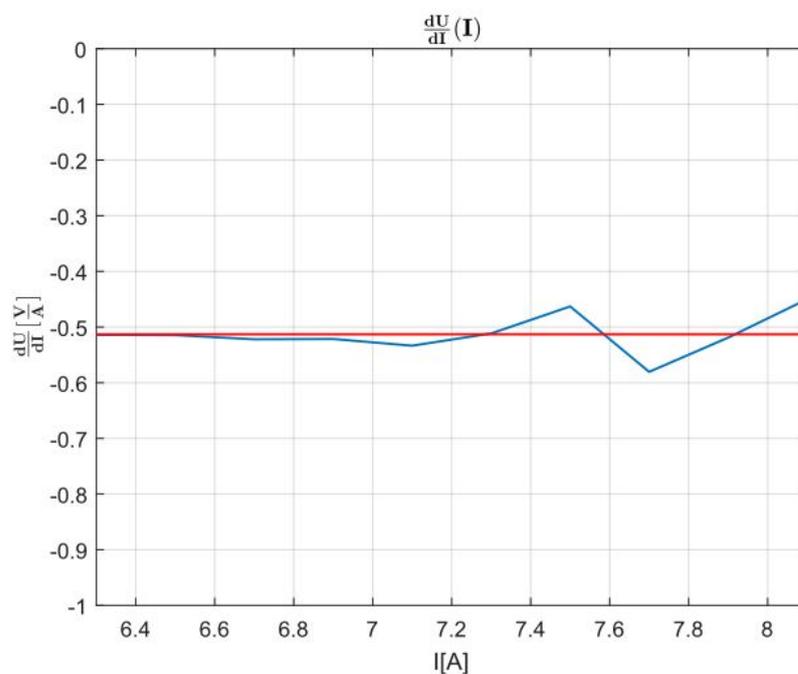


Abbildung 5.60.: R_i unter externer Wasserstoffbefeuchtung

Durch die externe Brennstoffbefeuchtung war jedoch aufgrund der verringerten anodenseitigen Membranentfeuchtung eine Verringerung des Innenwiderstands zu erwarten [14].

Ein möglicher Grund für die Erhöhung des Widerstands könnte die Überflutung der Brennstoffzelle sein. Bei hohen Stromstärken könnten aufgrund hoher Wasserstoffvolumenströme Wassertropfen mitgerissen werden. Um diese Gefahr auszuschließen muss beim Befüllen des Bubblers auf die Füllhöhe geachtet werden.

Zur Versuchsdurchführung wurde der Bubbler nur zur Hälfte befüllt. Mit dem stöchiometrischen Faktor der Wasserstoffzufuhr von $\lambda_{\text{H}_2}=1,1$ können für den gesamten Stromstärkebereich der U-I-Kennlinie mitgerissene Wassertropfen ausgeschlossen werden.

Möglicherweise ist die Brennstoffzellentemperatur zu niedrig, so dass die Anodengasbefeuchtung keinen positiven Einfluss auf den Brennstoffzellenbetrieb im hohen Strombereich hat [14].

Möglicherweise ist aber auch die aufgenommene Wassermenge des Wasserstoffs zu niedrig. Um diese Annahme zu überprüfen müsste der Bubbler beheizt werden können, sodass der Sättigungsdruck p_s des Wasserstoffs und somit die Wasseraufnahmefähigkeit erhöht werden kann.

5.5.3.1. Temperatureinfluss

Bei Betrachtung der T-I-Verläufe in Abbildung 5.61 fällt das höhere Temperaturniveau der Messreihe unter Wasserstoffbefeuchtung, verglichen mit der Messreihe ohne externer Wasserstoffbefeuchtung auf.

Möglicherweise trägt die höhere Temperatur über die Austauschstromdichte i_0 zur Reduktion der Aktivierungsüberspannung bei. Der innere Widerstand könnte dabei durch die Zunahme der temperaturabhängigen Elektrodenwiderstände erhöht werden.

Aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen sind die angesprochenen Effekte jedoch mit größter Sicherheit nicht alleine darauf zurückzuführen.

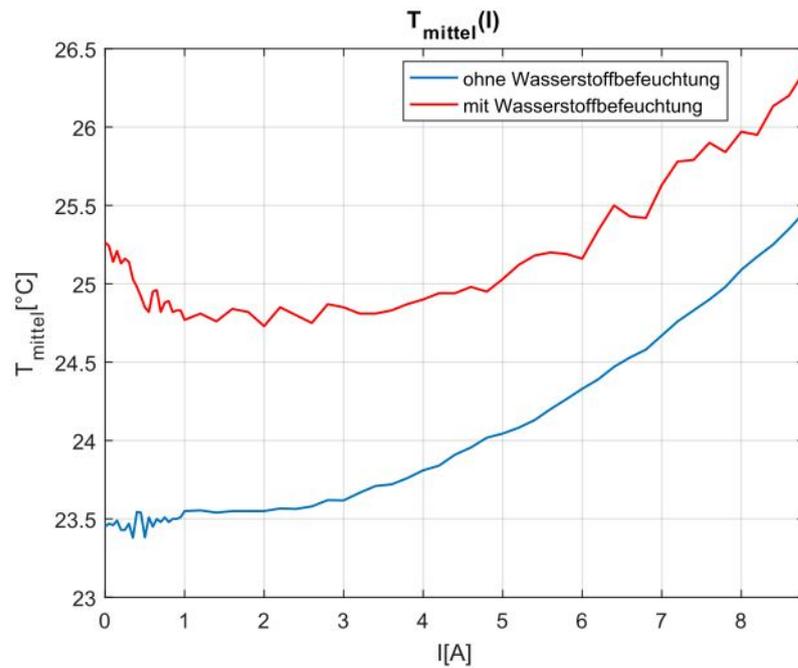


Abbildung 5.61.: T-I-Kennlinie mit und ohne Befeuchtung

5.5.3.2. Zeitverlauf

In Abbildung 5.62 ist der Zeitverlauf der Spannung unter Befeuchtung bei einer Stromstärke von $I=8$ A dargestellt. Das Dreiwegeventil wurde dabei in der ersten Sekunde umgeschaltet, so dass der Wasserstoff befeuchtet wird. Im Zeitraum von 80 Sekunden kommt es zu keiner Erhöhung der Stackspannung durch die Wasserstoffbefeuchtung. Bei der hohen Stromstärke von 8 A war jedoch ein deutlicher Anstieg der Stackspannung aufgrund der anodenseitigen Feuchtezunahme der Membran zu erwarten.

Dadurch werden die Annahmen verstärkt, dass möglicherweise die Brennstoffzellentemperatur zu gering ist, oder eine zu geringe Wassermenge in die Brennstoffzelle geführt wird.

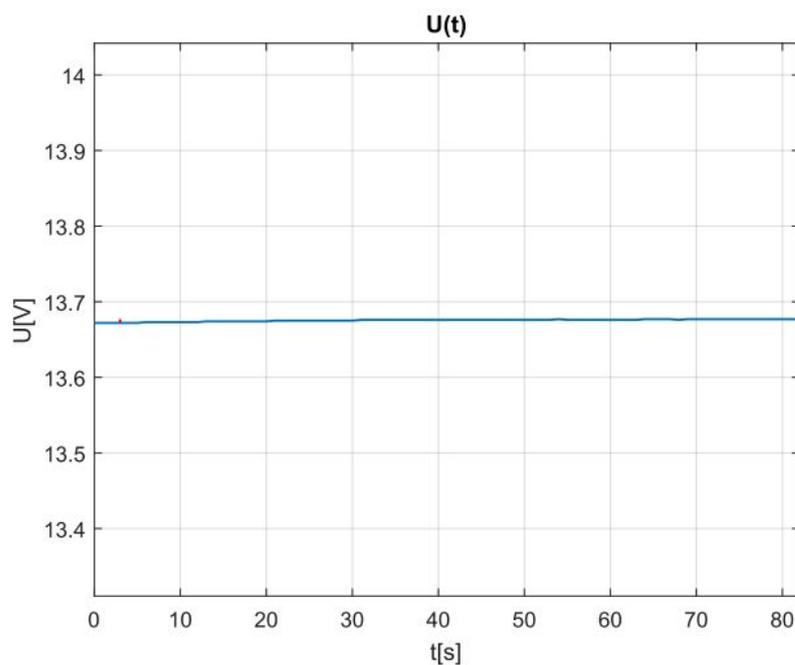


Abbildung 5.62.: $U(t)$ unter Befeuchtung bei $I=8$ A

5.5.4. Eignung zur Labordurchführung

Die Untersuchungen ergaben, dass die Befeuchtung des Wasserstoffs kaum Auswirkungen auf den Brennstoffzellenbetrieb hat.

Im Rahmen des Versuchslabors sollte die Aufnahme einer U-I-Kennlinie unter Wasserstoffbefeuchtung erfolgen. In der Versuchsauswertung sollte die aufgenommene U-I-Kennlinie zur genaueren Beurteilung des Effektes der Wasserstoffbefeuchtung, mit den anderen beiden U-I-Kennlinien (hohe/niedrige Brennstoffzellentemperatur) verglichen werden.

6. Labor

6.1. zu untersuchende Effekte/Größen

Bei der Untersuchung der Betriebsgrößen filterten sich folgende Versuchsabläufe heraus, die im Rahmen des Labors durchgeführt werden sollen:

- Aufnahme einer U-I-Kennlinie bei niedriger Brennstoffzellentemperatur
- Aufnahme einer U-I-Kennlinie bei höherer Temperatur
- Aufnahme einer U-I-Kennlinie unter externer Wasserstoffbefeuchtung
- Aufnahme von $U(\lambda_{\text{H}_2})$
- Aufnahme von $U(\lambda_{\text{N}_2})$
- Aufnahme von $U(P_{\text{Lüfter}})$

6.1.1. Anfangsbedingungen

1. Um eine unterstöchiometrische Luftzufuhr bei hohen Stromstärken auszuschließen werden die U-I-Kennlinien bei der konstanten Lüfterleistung von 55 % aufgenommen.
2. Vor der Aufnahme einer U-I-Kennlinie wird die Stromstärke $I=1$ A eingestellt, bis die Spannung eingeschwungen ist.
3. Zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf die U-I-Kennlinien sollten vor Aufnahme der zweiten U-I-Kennlinie Versuche mit höheren Stromstärken durchgeführt werden, um eine höhere Anfangstemperatur als in der ersten U-I-Kennlinie sicherzustellen.

6.2. Laborskript

6.2.1. Einleitung

Der folgende Laborversuch dient zur Vertiefung der aus der Vorlesung bekannten theoretischen Grundlagen des Brennstoffzellenbetriebs. Es werden mehrere Teilversuche an einer PEM-Brennstoffzelle durchgeführt, die im Anschluss an das Labor auszuwerten sind.

6.2.2. Theoretische Grundlagen

6.2.2.1. Leerlaufbetrieb der Brennstoffzelle

Im stromlosen Betrieb der Brennstoffzelle werden die folgenden drei Spannungen unterschieden:

- thermoneutrale Spannung U_H^0/U_B^0
- Standardpotential U_{rev}^0
- Nernstspannung U_N

Thermoneutrale Spannung

Bei der thermoneutralen Spannung handelt es sich um eine theoretische Spannung, die sich im stromlosen Brennstoffzellenzustand einstellen würde, wenn der Heizwert/Brennwert des Brennstoffs komplett in elektrische Leistung umgesetzt werden könnte.

Mit Wasserstoff als Brennstoff ergibt sich unter Bildung von Wasserdampf an der Kathode folgende thermoneutrale Spannung (Heizwertspannung):

$$U_H^0 = \frac{-\Delta H^0}{zF} = \frac{241,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{2 \cdot 96485,3 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} = 1,253\text{V} \quad (6.1)$$

Entsteht Wasser in flüssigem Zustand, so ergibt sich folgende thermoneutrale Spannung (Brennwertspannung):

$$U_H^0 = \frac{-\Delta H^0}{zF} = \frac{286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{2 \cdot 96485,3 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} = 1,482\text{V} \quad (6.2)$$

Standardpotential

Im realen Fall steht jedoch nicht die gesamte Reaktionsenthalpie zur Umwandlung in elektrischer Energie zur Verfügung, sondern die Gibbsenthalpie.

Die Änderung der Gibbsenthalpie ist ein Maß dafür, ob eine Reaktion „freiwillig“ ablaufen kann.

- $\Delta G < 0$ exergone Reaktion, läuft bevorzugt ab in Richtung der Produkte
- $\Delta G = 0$ Hin- und Rückreaktion stehen thermodynamisch im Gleichgewicht
- $\Delta G > 0$ endergone Reaktion, läuft bevorzugt ab in Richtung der Ausgangsstoffe

Die freie Enthalpiedifferenz ΔG ist laut Gibbs-Helmholtz-Gleichung (siehe Gl. 6.3) die um die übertragene Wärme $T\Delta S$ reduzierte Reaktionsenthalpie ΔH .

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (6.3)$$

Der PEM-Brennstoffzelle steht somit unter Standardbedingungen folgende freie Enthalpiedifferenz für flüssiges (s. Gl. 6.4) und dampfförmiges Produktwasser (s. Gl. 6.5) zur Verfügung:

$$\Delta G_{fl} = -286 \frac{kJ}{mol} - 298,15K \cdot (-163,34 \frac{J}{molK}) = -237,3 \frac{kJ}{mol} \quad (6.4)$$

$$\Delta G_g = -241,8 \frac{kJ}{mol} - 298,15K \cdot (-44,273 \frac{J}{molK}) = -228,6 \frac{kJ}{mol} \quad (6.5)$$

Daraus ergibt sich folgende reversible Zellspannung:

$$U_{rev,fl}^0 = \frac{-\Delta G_{fl}}{zF} = \frac{237,3 \frac{kJ}{mol}}{2 \cdot 96485,3 \frac{C}{mol}} = 1,229V \quad (6.6)$$

$$U_{rev,g}^0 = \frac{-\Delta G_g}{zF} = \frac{228,6 \frac{kJ}{mol}}{2 \cdot 96485,3 \frac{C}{mol}} = 1,185V \quad (6.7)$$

Reaktion	$-\Delta H^0$	U_B^0 bzw. U_H^0	$-\Delta G^0$	U^0	η_{th}
	kJ/mol	V	kJ/mol	V	-
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O_{liq}$	286,0	1,482	237,3	1,229	0,829
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O_{gas}$	241,8	1,253	228,6	1,185	0,946

Abbildung 6.1.: Wasserstoffoxidation unter Standardbedingungen [7]

Das Standardpotential ist die Leerlaufspannung, d. h. die Zellspannung ohne Speisung einer elektrischen Last unter Standardbedingungen. Diese Leerlaufspannung ist von der Temperatur und der Aktivität der Produkte und Edukte abhängig.

Nernstspannung

Bei von den Standardbedingungen abweichenden Betriebsparametern ergibt sich ein Spannungsabfall der Leerlaufspannung. Diese gegenüber dem Standardpotential reduzierte Leerlaufspannung wird als Nernstspannung bezeichnet und ist aus der Nernst-Gleichung berechenbar (s. Gl. 6.8). Dabei haben die Stöchiometriefaktoren der Produkte positive und die Stöchiometriefaktoren der Edukte negative Vorzeichen.

$$\Delta E_N = \Delta E_m^0 - \frac{R_m \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \prod_i a_i^{\gamma_i} \quad (6.8)$$

Für die PEM-Brennstoffzelle ergibt sich somit im Betrieb mit reinem Wasserstoff als Brennstoff und reinem Sauerstoff als Oxidationsmittel mit der auf die Brennstoffmenge normierte Reaktionsgleichung 3.2 folgende Nernst-Spannung:

$$E_N = E_m^0 + \frac{R_m \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{a_{H_2O}^1}{a_{H_2}^1 \cdot a_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \quad (6.9)$$

Die Leerlaufspannung stellt sich im Brennstoffzellenbetrieb ohne Stromfluss ein. Sobald die Zelle eine elektrische Last speist, d. h. ein Stromfluss

erfolgt, verursacht die Überlagerung unterschiedlicher, von der Stromstärke abhängiger Verluste weitere Spannungsabfälle. Auf diese Verlustarten wird im nächsten Abschnitt genauer eingegangen.

6.2.2.2. Strombetrieb der Brennstoffzelle

Der Zusammenhang zwischen Zellspannung und Stromstärke ist an der U-I-Kennlinie in Abbildung 6.2 zu erkennen.

In der U-I-Kennlinie sind die drei charakteristischen Bereiche zu erkennen, welche nach den jeweilig dominanten Verlusten benannt sind. Dazu gehören der Reihenfolge nach mit steigender Stromstärke die Durchtrittsüberspannung, auch Aktivierungsüberspannung genannt, die ohmsche Überspannung und die Diffusionsüberspannung.

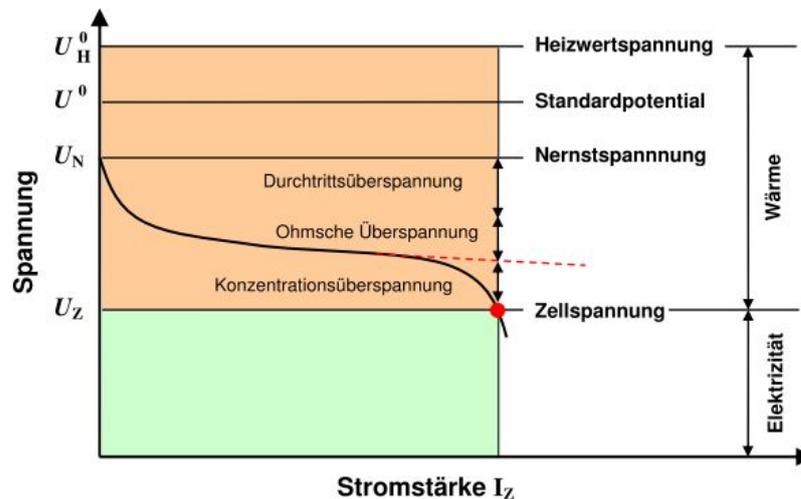


Abbildung 6.2.: U-I-Kennlinie einer Brennstoffzelle [7]

Durchtrittsüberspannung

Ausgehend von der Nernstspannung erfolgt im Bereich geringer Stromstärken, ein rapider Spannungsabfall, die sogenannte Durchtrittsüberspannung. In diesem ersten Bereich ist die Kennlinie durch katalytische Prozesse an den Elektroden bestimmt. Der Hauptfaktor ist dabei die Geschwindigkeit der katalytischen Umwandlung der Gase. Diese entspricht der Geschwindigkeit mit der die Elektronen die Kontaktfläche zwischen den Gasmolekülen und dem Platinkondensator (Phasengrenze Elektrode/Elektrolyt) überqueren. Der Zusammenhang zwischen dem Strom I und der Durchtrittsüberspan-

nung wird dabei durch die Butler-Volmer-Gleichung beschrieben.

Über eine Umstellung der Butler-Volmer-Gleichung ergibt sich Gleichung 6.10 zur Berechnung der Durchtrittsüberspannung.

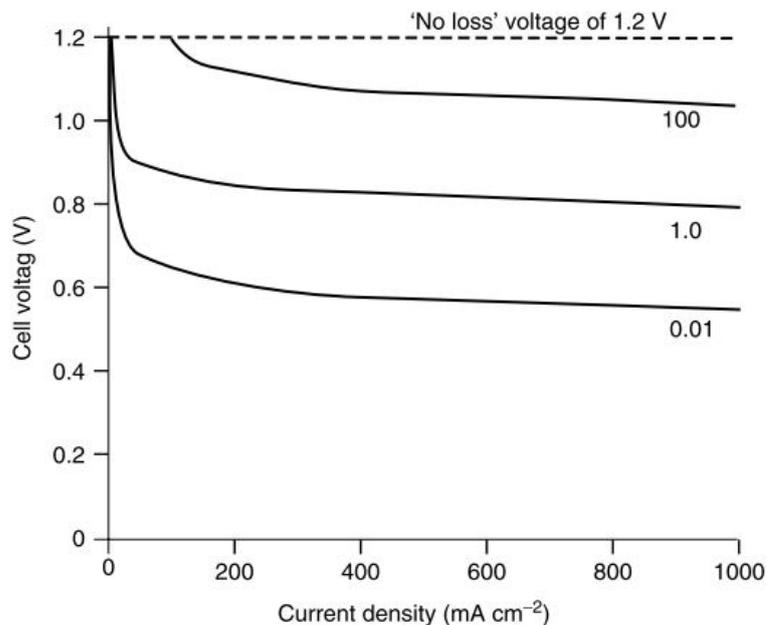
$$\eta_{Durch} = \frac{RT}{z\alpha F} \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (6.10)$$

α ist der Durchtrittsfaktor. Er liegt zwischen 0 und 1 und gibt den Anteil der Durchtrittsüberspannung an, der durch die anodenseitige Durchtrittsreaktion anfällt. Der kathodenseitige Anteil ergibt sich aus $1-\alpha$.

Der Faktor T in Gl. 6.10 erweckt den Anschein, dass steigende Temperaturen zu einer erhöhten Durchtrittsüberspannung führen. Der Anstieg der Austauschstromdichte i_0 mit zunehmender Temperatur ist jedoch der dominierende Faktor in Gl. 6.10, wodurch insgesamt eine reduzierte Durchtrittsüberspannung die Folge eines Temperaturanstiegs ist. Der Zusammenhang zwischen der Austauschstromdichte i_0 und der Zellspannung U_Z ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

Neben der Temperatur kann die Austauschstromdichte auch noch über die Wahl des Katalysatormaterials und die Rauheit der Elektrodenoberfläche beeinflusst werden.

Im Falle von Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen ist die Austauschstromdichte auf der Kathodenseite um den Faktor 10^5 geringer als auf der Anodenseite. Somit ist die Durchtrittsreaktion an der Anodenseite bestimmend für die gesamte Durchtrittsüberspannung [2].

Abbildung 6.3.: $U(I, i_0)$ [2]

Ohmscher Bereich

Im mittleren Stromstärkebereich tritt die ohmsche Überspannung auf, die gemäß des ohmschen Gesetzes $U=RI$ proportional zur Stromstärke ist. Der Widerstand der Brennstoffzelle ergibt sich dabei aus der Summe der Elektrodenwiderstände und des Elektrolytwiderstandes. Charakteristisch für den ohmschen Überspannungsbereich ist ein vergleichsweise geringer Spannungsabfall in einem weiten Stromstärkebereich. Deshalb wird dieser Bereich der U-I-Kennlinie als Arbeitsbereich der Brennstoffzelle definiert.

Diffusionsüberspannung

An den linearen ohmschen Überspannungsbereich schließt bei hohen Stromstärken der Bereich der Diffusionsüberspannung an. Der limitierende Faktor des ohmschen Bereiches ist die maximale Diffusionsgeschwindigkeit der Gase durch die porösen Elektroden zum Katalysator und zum Elektrolyten. Ab einer gewissen Stromstärke reicht die maximale Geschwindigkeit des Edukttransportes in die Dreiphasengrenze der Brennstoffzelle nicht aus, um die benötigte Leistung zu liefern. Der darauf folgende Bereich der Diffusionsüberspannung ist an einem rapiden Spannungsabfall erkennbar.

6.2.2.3. Kühlung

Neben der erwünschten elektrischen Energie entsteht im Brennstoffzellenbetrieb thermische Energie, die in Form von latenter und sensibler Wärme aus der Brennstoffzelle abgeführt werden muss, um diese im gewünschten Temperaturbereich zu halten.

Der sensible Wärmeanteil wird dabei über Wärmeleitung und abhängig von der Brennstoffzellengröße, entweder durch natürliche Konvektion oder einer Kombination von natürlicher und erzwungener Konvektion abgeführt.

Erfahrungsgemäß wird erst bei Nennleistungen von über 100 W ein Lüfter zur Brennstoffzellenkühlung erforderlich [2]. Die natürliche Konvektion erfolgt über das Brennstoffzellengehäuse, aufgrund der induzierten Luftzirkulation durch den Temperaturgradienten in der Umgebungsluft.

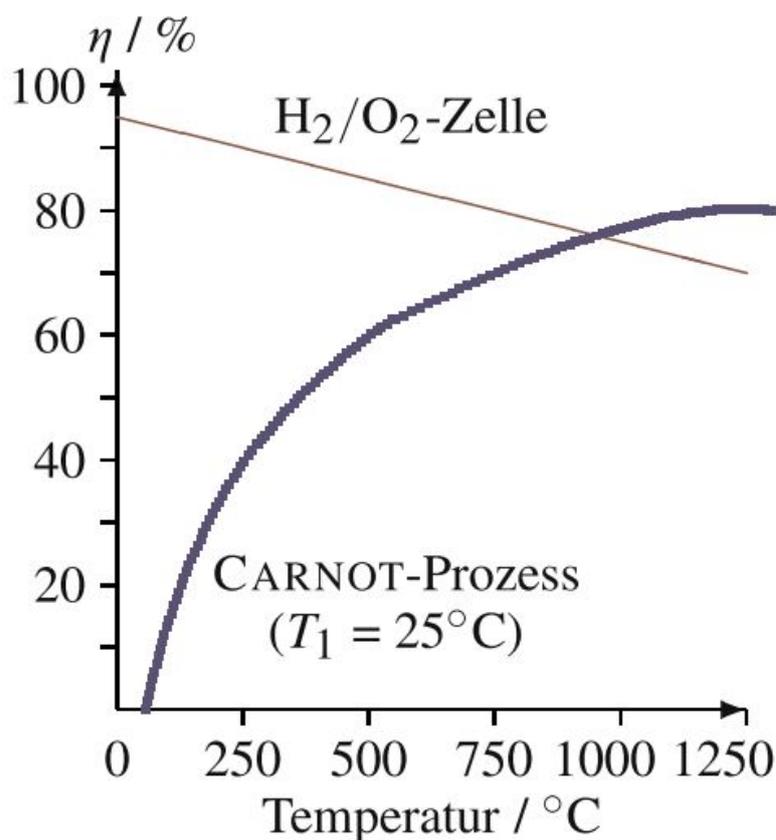
Die erzeugte Wärme im Brennstoffzellenbetrieb beträgt:

$$\dot{Q} = I \cdot (U_{rev} - U_Z) = P_{el} \cdot \left(\frac{U_{rev}}{U_Z} - 1 \right) \quad (6.11)$$

6.2.2.4. Temperatur

Aus der Formel des thermodynamischen Wirkungsgrades wird ersichtlich, dass sich ein Temperaturanstieg negativ auf den Brennstoffzellenbetrieb auswirkt. Es sind höhere thermodynamische Wirkungsgrade für niedrigere Zelltemperaturen zu erwarten. Anders als Wärme-Kraft-Maschinen ist die Brennstoffzelle nicht an das Carnot-Gesetz gebunden, laut dessen höhere Betriebstemperaturen höhere Wirkungsgrade zur Folge haben.

Die Temperaturabhängigkeiten des Carnot-Wirkungsgrades und des thermodynamischen Wirkungsgrades sind in Abbildung 6.4 dargestellt.

Abbildung 6.4.: $\eta(T)$ -Vergleich Carnot/Wärme-Kraft-Prozess

Weiterhin wirkt sich eine Temperaturänderung auch über die Aktivierungsspannung auf die Stackspannung und somit über den Spannungswirkungsgrad auf den Brennstoffzellen-Wirkungsgrad aus. Die Aktivierungsspannung lässt sich anhand der Tafel-Gleichung

$$U_{akt} = A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (6.12)$$

berechnen. Dabei sind sowohl die Konstante

$$A = \frac{RT}{2\alpha} \quad (6.13)$$

sowie auch die Austauschstromdichte i_0 temperaturabhängig.

Die Austauschstromdichte i_0 ist dabei der dominierende Faktor und bewirkt durch Erhöhung bei einer Temperaturzunahme den Abfall der Aktivierungsspannung [2]. Der Zusammenhang zwischen Austauschstromdichte i_0 und

Zellspannung ist in Abb. 6.3 dargestellt.

Mit zunehmender Austauschstromdichte wird auch die Differenz zwischen der reversiblen Spannung und der Operationsspannung geringer.

6.2.2.5. Eduktzufuhr

Nach dem Faraday'schen Gesetz ($n = Q/zF$) lässt sich der Gasbedarf einer Einzelzelle als Molenstrom \dot{n} berechnen:

$$\dot{n} = \frac{1}{z \cdot F} \quad (6.14)$$

Mit Wasserstoff als Brennstoff erhält man:

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{1}{z \cdot F} = \frac{1}{2 \cdot 96485,332 \frac{C}{mol}} = 5,182 \cdot 10^{-6} \frac{mol}{As} \quad (6.15)$$

Sinnvoller als die Angabe der molaren Größe ist die Angabe als Volumenstrom in Normliter pro Ampere und Minute (Nl/A min). Die Umrechnung erfolgt dabei über das Molvolumen eines idealen Gases ($V_{mol} = V/n = RT/p = 22,414$ Nl/mol) unter Normbedingungen.

$$\dot{V} = \dot{n} \cdot V_{mol} \cdot 60 \frac{s}{min} \quad (6.16)$$

Insgesamt erhält man folgende Werte für Wasserstoff- und Sauerstoffvolumenstrom pro Einzelzelle:

$$\dot{V}_{H_2} = 7 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (6.17)$$

$$\dot{V}_{O_2} = 3,5 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (6.18)$$

Bei Brennstoffzellenbetrieb mit Luft als Oxidationsmittel ergibt sich der benötigte Volumenstrom unter Division des Molanteils Sauerstoff der Luft $x=0,21$

zu:

$$\dot{V}_{Luft} = \frac{3,5 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin}}{0,21} = 16,6 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (6.19)$$

Gasumsatz und Stöchiometrie

Die benötigten Volumenströme aus dem vorigen Abschnitt entsprechen einer Stöchiometrie von $\lambda=1$ bzw. einem Gasumsatz von 100 %. Der Gasumsatz ist dabei der Kehrwert der Stöchiometrie.

$$u = \frac{1}{\lambda} \quad (6.20)$$

In der Praxis kann die Brennstoffzelle die Reaktionsgase nicht vollständig umsetzen. Daher ist die Stöchiometrie $\lambda > 1$ bzw. der Gasumsatz $u < 100$ %. Es müssen der Brennstoffzelle also höhere Volumenströme zugeführt werden, als die theoretisch berechneten [10]. Der Gasbedarf einer Einzelzelle berechnet sich folgendermaßen:

$$\dot{V}_{H_2} = \lambda_{H_2} \cdot 7 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (6.21)$$

$$\dot{V}_{O_2} = \lambda_{O_2} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (6.22)$$

Bzw. im Betrieb mit Luft als Oxidationsmittel:

$$\dot{V}_{Luft} = \lambda_{Luft} \cdot 16,6 \cdot 10^{-3} \frac{Nl}{Amin} \quad (6.23)$$

Der Stromwirkungsgrad und damit der Gesamtwirkungsgrad der Brennstoffzelle ist umgekehrt proportional zum stöchiometrischen Faktor λ der Anodenreaktion (s. Gl. 6.37). Zur Maximierung des Wirkungsgrads sollte λ_{Anode} daher möglichst nah beim Wert 1 liegen. Realistisch sind Werte $\lambda_{Anode} \leq 1,5$ und $1,5 \leq \lambda_{Kathode} \leq 4$.

6.2.2.6. Befeuchtung

Die Protonenleitfähigkeit und die damit verbundene Brennstoffzellenleistung hängen von der Feuchte der Zellmembran ab. Daher ist die Befeuchtung der Membran für den Brennstoffzellenbetrieb von besonderer Wichtigkeit.

Bei einer zu geringen Feuchtezufuhr erfolgt aufgrund der reduzierten Protonenleitfähigkeit ein Abfall der Zelleistung. Bei übermäßiger Zellbefeuchtung kommt es bei Ablagerung von Wasser an den Elektroden zu einem Leistungsabfall aufgrund der verringerten Reaktionsfläche. Das Wassermanagement der Brennstoffzelle ist von den Betriebsbedingungen der Brennstoffzelle wie Druck und Temperatur abhängig.

Externe Gasbefeuchtung

Üblicherweise erfolgt die Membranbefeuchtung über die externe Befeuchtung der Eduktgase. Das Konzept der externen Befeuchtung ist in Abbildung 6.5 schematisch dargestellt. Die besten Ergebnisse werden bei einer Befeuchtung auf 100 % der relativen Feuchte des Brenngases und zwischen 70 und 80 % der relativen Feuchte der Luft erzielt [1].

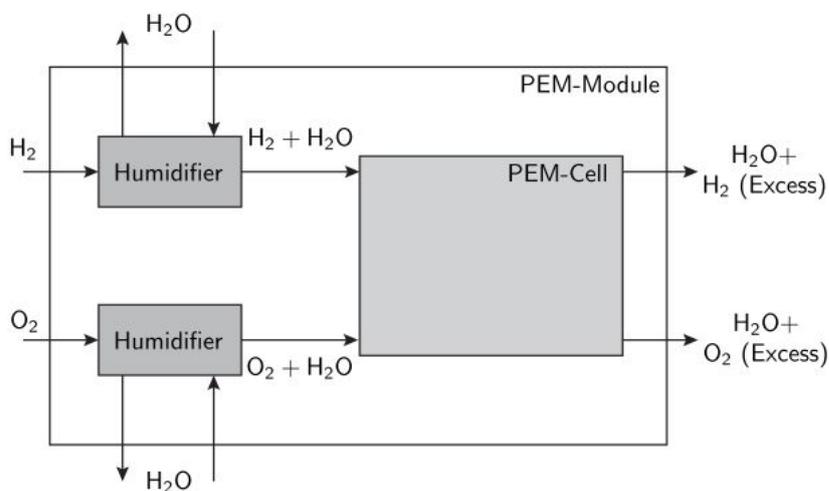


Abbildung 6.5.: Externe Eduktbefeuchtung [1]

Interne Befeuchtung

Durch die kathodenseitige Reaktion der Wasserstoffionen mit den Elektroden und dem zugeführten Sauerstoff entsteht Wasser als Abfallprodukt. Aufgrund des Konzentrationsunterschiedes an Wasser zwischen der Katho-

de und der restlichen Brennstoffzelle (Membran, Anode) erfolgt ein Wasserstofftransport über Diffusion [13].

Die kathodenseitige Wasserproduktion ist proportional zur Stromstärke. Damit steigen auch die Konzentrationsunterschiede und der Stofftransport über Diffusion.

Mit steigender Stromstärke werden aber durch den Protonentransport durch die Membran mehr Wasserteilchen zur Kathode abtransportiert. Eine anodenseitige Trocknung ist die Folge. Der Trocknung kann über eine externe Befeuchtung des Anodengases entgegengewirkt werden.

6.2.2.7. Wirkungsgrade

Zur Bewertung der Effektivität des Brennstoffzellenbetriebs stehen mehrere Wirkungsgrade zur Verfügung.

Thermodynamischer Wirkungsgrad η_{th}

Der thermodynamische Wirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen dem Standardpotential und der thermoneutralen Spannung der Brennstoffzelle.

$$\eta_{th} = \frac{U_{rev}^0}{U_{th}^0} \quad (6.24)$$

Aufgrund desselben Nenners (s. Gl. 3.6 und 3.11) ist der thermodynamische Wirkungsgrad auch als Verhältnis zwischen freier Gibbscher Enthalpie und Reaktionsenthalpie definiert.

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} \quad (6.25)$$

Für niedrige Temperaturen gilt:

$$\Delta H \approx \Delta H^0 \text{ und}$$

$$\Delta G \approx \Delta G^0$$

Damit lässt sich der thermodynamische Wirkungsgrad folgendermaßen bestimmen:

$$\eta_{th} = \frac{\Delta G^0}{\Delta H^0} = \frac{-237,13 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{-285,83 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}} \approx 83\% \quad (6.26)$$

Spannungwirkungsgrad η_U

$$\eta_U = \frac{U(I)}{U_{rev}} \quad (6.27)$$

Stromwirkungsgrad η_I

$$\eta_U = \frac{I}{I_{max}} \quad (6.28)$$

Elektrischer Wirkungsgrad η_{el}

$$\eta_{el} = \eta_U \cdot \eta_I \quad (6.29)$$

Brenngasnutzungsgrad η_u

$$\eta_u = \frac{\text{umgesetzter Brennstoff}}{\text{eingespeister Brennstoff}} \quad (6.30)$$

Heizwertnutzungsgrad η_H

$$\eta_H = \frac{H_{u,H_2} \cdot x_{H_2}}{\sum H_{u,i} \cdot x_i} \quad (6.31)$$

Brennstoffzellen-Wirkungsgrad η_{FC}

$$\eta_{FC} = \eta_{rev} \cdot \eta_U \cdot \eta_I \cdot \eta_u \cdot \eta_H \quad (6.32)$$

bzw.

$$\eta_{FC} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_{H_2} \cdot \Delta H_u} \quad (6.33)$$

bei gasförmigem Produktwasser und

$$\eta_{FC} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_{H_2} \cdot \Delta H_o} \quad (6.34)$$

bei flüssigem Produktwasser.

6.2.3. Versuchsaufbau

6.2.3.1. Versuchsstand

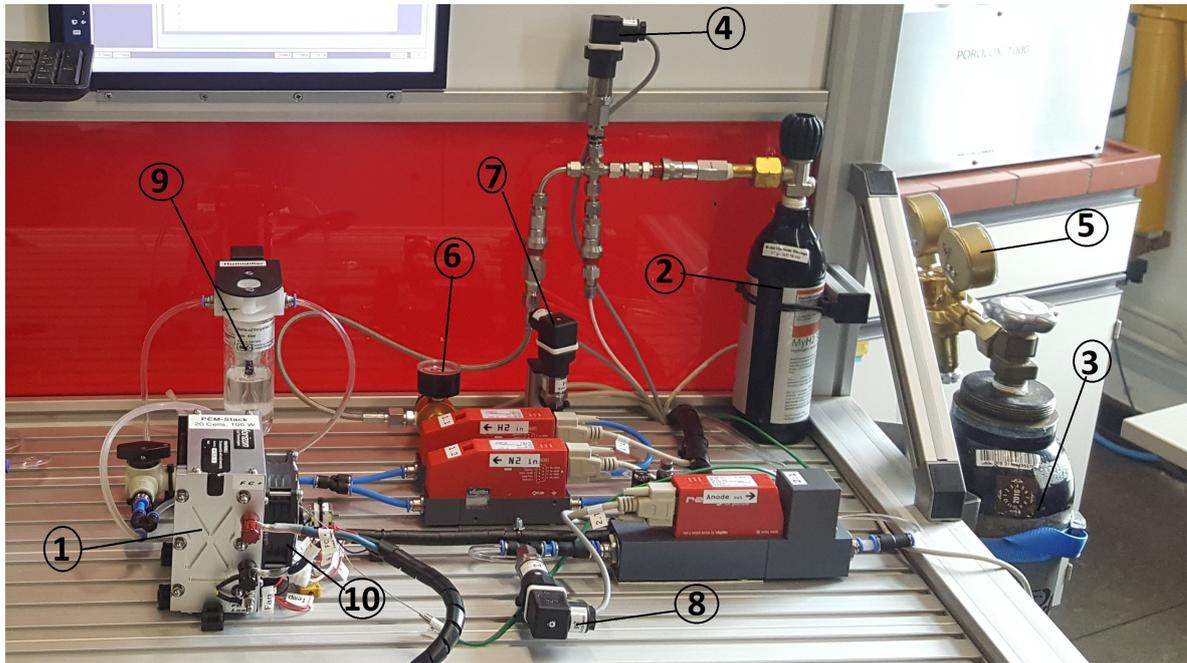


Abbildung 6.6.: Versuchsstand

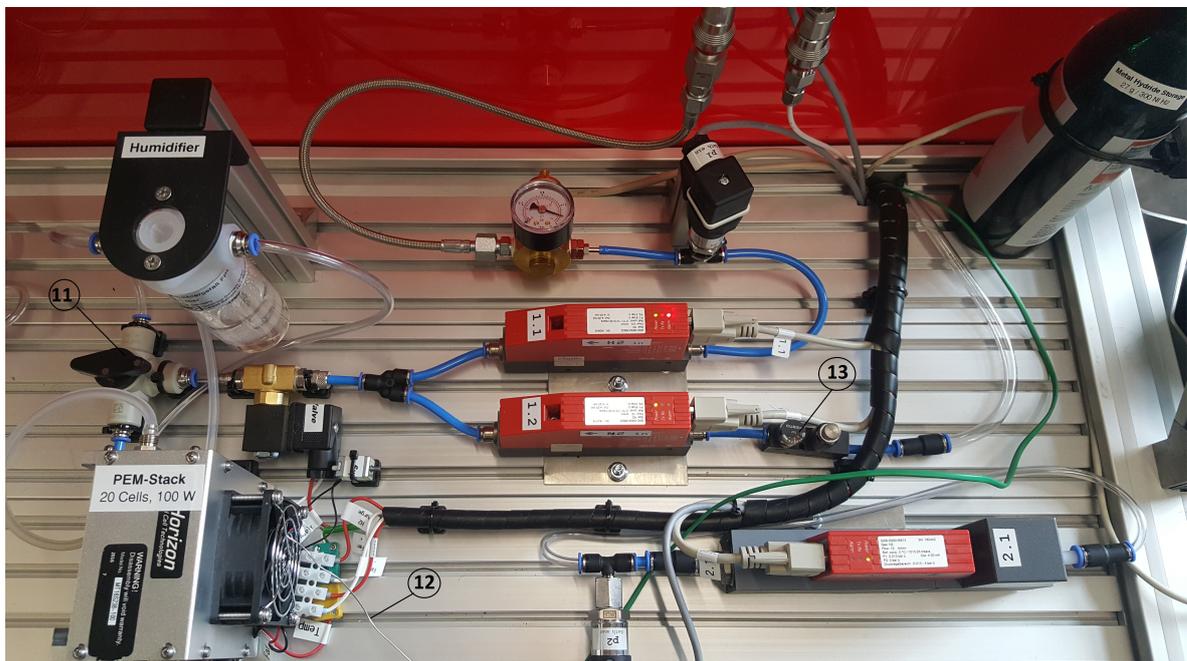


Abbildung 6.7.: Versuchsstand Draufsicht

- 1: PEM-Brennstoffzelle
- 2: Metallhydridspeicher
- 3: Stickstoffflasche
- 4: Druckregler
- 5: Druckminderer
- 6: Manometer
- 7: Druckregistrierer
- 8: Druckregler
- 9: Bubbler
- 10: Ventilator
- 11: Drei-Wege-Ventil
- 12: Temperatur-Fühler
- 13: Druckregler
- 1.1: Wasserstoff-MFC
- 1.2: Stickstoff-MFC
- 2.1: Luft-MFC

Das Kernstück des Versuchstands ist der PEM-Brennstoffzellenstack bestehend aus 20 Einzelzellen (1).

Als Brennstoff kommt Wasserstoff zum Einsatz, welcher in einem Metallhydridspeicher (2) unter einem Druck von bis zu 15 bar gespeichert werden kann. Als Wasserstofferzeuger zur Befüllung des Metallhydridspeichers kommt ein Elektrolyseur zum Einsatz. Die Oxidantenzufuhr in Form von Luft erfolgt mithilfe eines Ventilators (10), welcher auch für die Kühlung der Brennstoffzelle zuständig ist.

Der Volumenstrom der Wasserstoffzufuhr wird über einen Massendurchflussregler (MFC) geregelt (1.1). Er ist auf Wasserstoff kalibriert und arbeitet ab einem minimalen Volumenstrom von $50 \frac{\text{Nml}}{\text{min}}$. Unterhalb dieses Volumenstroms schaltet der MFC ab. Die Regelung des Eingangsdrucks des MFC erfolgt über einen Druckregler (4).

Dem Wasserstoff kann Stickstoff zugemischt werden, welcher in einer Druckflasche (3) gespeichert ist. Über einen Druckminderer (5) am Flaschenkopf und einem Druckregler vor dem MFC (1.1) lässt sich der Eingangsdruck regeln. Über den MFC wird der Volumenstrom des zugemischten Stickstoffs geregelt. Dieser arbeitet ab einem minimalen Volumenstrom von $400 \frac{\text{Nml}}{\text{min}}$. Bei niedrigeren Volumenströmen schaltet der MFC ab. Nach den MFC's werden die Brennstoffgase gemischt und zur Anode der Brennstoffzelle hinzugeführt.

Über ein Dreiwegeventil (11) lässt sich das Brenngas zur Befeuchtung durch einen Bubbler (9) führen. Dieser ist mit deionisiertem Wasser zu befüllen. Zur Temperaturmessung ist ein Temperaturfühler an der Austrittsseite der Luft, mittig am Brennstoffzellenstack angebracht.

6.2.3.2. Bedienung

Die Steuerung der Brennstoffzelle erfolgt über ein Simulink-Programm mithilfe eines am Versuchstand angebrachten Touchscreen-Monitors. Die Eingaben können dabei direkt am Monitor oder über die beiliegende Tastatur und Maus erfolgen.

Im Hauptfenster des Simulink-Programms (s. Abb. 4.3) werden die Betriebsparameter eingestellt. Es sind Spannungs- und Stromanzeigen verfügbar. Im unteren Fensterbereich wird der U-I-Verlauf graphisch dargestellt.

Im zweiten Bedienfenster (s. Abb. 4.4) können neue Datenreihen angelegt werden, sowie auch Messpunkte manuell aufgenommen werden. Die aufgenommenen Messpunkte können unter Vorgabe der Ordinaten- und Abszissen­größe graphisch dargestellt werden.

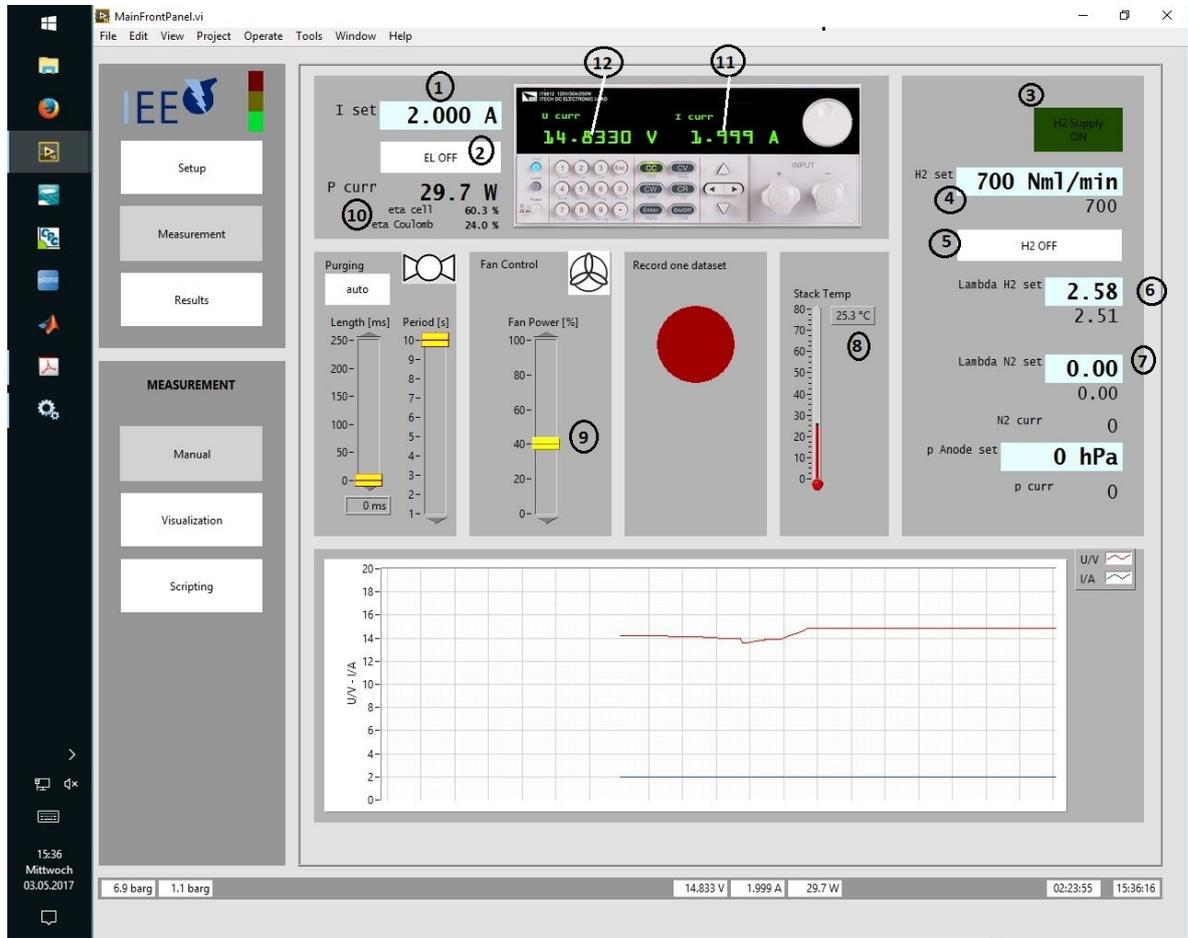


Abbildung 6.8.: Bedienfenster

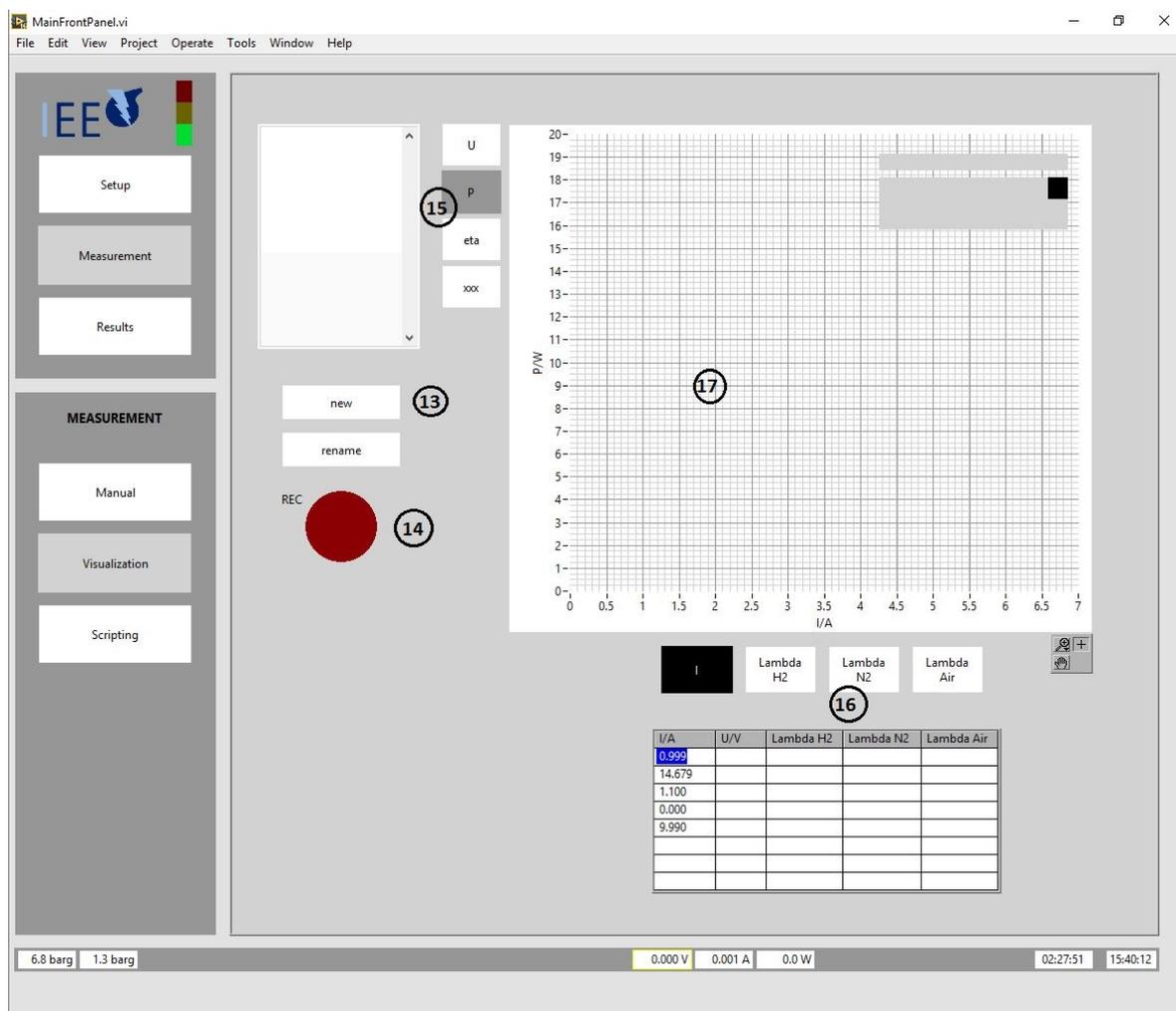


Abbildung 6.9.: Datenfenster

- 1: Eingabefeld Stromstärke
- 2: Deaktivierung Stromstärke (0 A)
- 3: Wasserstoffversorgung Aktivierung/Deaktivierung
- 4: Eingabefeld Wasserstoffvolumenstrom
- 5: Wasserstoffvolumenstrom Deaktivierung (0 Nml/min)
- 6: Eingabefeld λ_{H_2}
- 7: Eingabefeld λ_{N_2}
- 8: Temperatur-Anzeige
- 9: Lüfterleistung-Regler
- 10: Leistungs-, Wirkungsgradanzeige
- 11: Stromstärke-Anzeige
- 12: Spannungs-Anzeige

- 13: neue Datenreihe anlegen
- 14: manuelle Messpunktaufnahme
- 15: Einstellung der Ordinatengröße
- 16: Einstellung der Abszissenweite
- 17: graphische Messpunktdarstellung

6.2.4. Versuchsvorbereitung

Befüllen Sie den Bubbler bis zur Hälfte.

Aktivieren Sie die Wasserstoffzufuhr. Drehen Sie dazu den Metallhydridspeicher auf und aktivieren Sie über das Bedienfenster die Wasserstoffversorgung. Setzen Sie anschließend den stöchiometrischen Faktor der Wasserstoffzufuhr auf $\lambda_{\text{H}_2}=1,1$. Stellen Sie die Lüfterleistung auf 55 %, die Stromstärke auf 1 A und warten Sie bis sich die Spannung eingeschwungen hat.

6.2.5. Versuchsdurchführung

Erstellen Sie vor jedem Teilversuch eine neue Datenreihe im Datenfenster und nehmen Sie einen Messpunkt auf. Nach Beendigung des Teilversuchs nehmen Sie erneut einen Messpunkt auf. Dadurch wird die Zuordnung der Messwerte aus dem Textdokument zu den einzelnen Teilversuchen erleichtert.

6.2.5.1. U-I-Kennlinie

Stellen Sie die Stromstärke auf 0 A und den konstanten Wasserstoffvolumenstrom auf $\dot{V}_{\text{H}_2} = 50 \frac{\text{Nml}}{\text{min}}$ ein.

Erhöhen Sie nach 20 Sekunden die Stromstärke auf 0,05 A und warten Sie, bis die Stackspannung eingeschwungen ist. Fahren Sie die in Tabelle 1 vorgegebenen Stromstärken an und notieren Sie den eingeschwungenen Spannungswert vor Erhöhung der Stromstärke. Achten Sie dabei, dass die Leistung von 95 W nicht überstiegen wird.

Bei $I=0,35$ A stellt sich $\lambda_{\text{H}_2}<1,1$ ein. Stellen Sie ab hier den stöchiometrischen Faktor der Wasserstoffzufuhr auf $\lambda_{\text{H}_2}=1,1$ ein. Ermitteln Sie aus den aufgenommenen Spannungswerten zwischen 5 und 7 A den inneren Widerstand R_i der Brennstoffzelle.

Würden Sie bei der maximalen Stromstärke bei Reduzierung der Lüfterleistung auf $P_{\text{Lüfter}}=40\%$ einen Spannungsabfall oder eine Spannungszunahme erwarten? Begründen Sie ihre Antwort. Gehen Sie dabei auf die Brennstoffzellentemperatur und die Oxidantenzufuhr ein.

Überprüfen Sie Ihre Annahme und notieren Sie den sich einstellenden Spannungswert tabellarisch.

6.2.5.2. Brennstoffzusammensetzung

Drehen Sie das Ventil der Stickstoffflasche auf.

1. Stellen Sie die Stromstärke von $I=5\text{ A}$ und den konstanten Wasserstoffvolumenstrom auf $\dot{V}_{\text{H}_2} = 1000 \frac{\text{Nml}}{\text{min}}$ ein und warten Sie, bis die Stackspannung eingeschwungen ist. Erhöhen Sie λ_{N_2} in 0,5-Schritten bis 3. Warten Sie bis die Stackspannung eingeschwungen ist, bevor Sie den Stickstoffvolumenstrom erhöhen.

2. Stellen Sie die Stromstärke von $I=3\text{ A}$ und den konstanten Wasserstoffvolumenstrom auf $\dot{V}_{\text{H}_2} = 1000 \frac{\text{Nml}}{\text{min}}$ ein und warten Sie, bis die Stackspannung eingeschwungen ist. Erhöhen Sie λ_{N_2} bis 4 schrittweise um 1. Warten Sie bis die Stackspannung sich einpendelt, bevor Sie den Stickstoffvolumenstrom erhöhen.

6.2.5.3. Eduktzufuhr

Stellen Sie den stöchiometrischen Faktor der Wasserstoffzufuhr auf $\lambda_{\text{H}_2}=1,03$ ein. Warten Sie bis die Stackspannung eingeschwungen ist.

1. Wasserstoffzufuhr

Erhöhen Sie den stöchiometrischen Faktor der Wasserstoffzufuhr zwischen 1 und 4 schrittweise um 1. Warten Sie bis die Stackspannung sich einpendelt, bevor Sie den Wasserstoffvolumenstrom erhöhen.

2. Luftzufuhr

Stellen Sie den stöchiometrischen Faktor der Wasserstoffzufuhr auf $\lambda_{\text{H}_2}=1,1$. Erhöhen Sie die Lüfterleistung alle 15 Sekunden schrittweise um 10 % bis auf 100 %.

Wie erklären Sie den Spannungsabfall trotz steigender Lüfterleistung?

6.2.5.4. U-I-Kennlinie bei höherer Temperatur

Stellen Sie die Lüfterleistung auf 55 % und die Stromstärke auf $I=1$ A ein. Warten Sie bis sich die Stackspannung einpendelt und nehmen Sie die U-I-Kennlinie auf (s. 6.2.5.1). Ermitteln Sie aus den aufgenommenen Spannungswerten zwischen 5 und 7 A den inneren Widerstand R_i der Brennstoffzelle.

Wie erklären Sie die Zunahme des inneren Widerstands verglichen mit der ersten U-I-Kennlinie.

6.2.5.5. U-I-Kennlinie unter Wasserstoffbefeuchtung

-Welche relative Feuchte erreicht der Wasserstoff im Befeuchter?

-Erwarten Sie höhere/geringere Spannungen im Vergleich zum "Trockenbetrieb"?

-Wie verhält sich der innere Widerstand R_i ?

Stellen Sie das Dreiwegeventil um, so dass der Brennstoff über den Bubbler geführt wird. Stellen Sie die Stromstärke $I=1$ A ein und warten Sie bis sich die Stackspannung einpendelt.

Nehmen Sie anschließend die U-I-Kennlinie wie in Abschnitt 6.2.5.1 auf. Ermitteln Sie aus den aufgenommenen Spannungswerten zwischen 5 und 7 A den inneren Widerstand R_i der Brennstoffzelle und vergleichen diese mit den inneren Widerständen der anderen beiden U-I-Kennlinien.

6.2.6. Versuchsauswertung

1. Stellen Sie die drei aufgenommenen U-I-Kennlinien graphisch dar und vergleichen diese miteinander. Ermitteln Sie die mittleren inneren Widerstände R_i . Worauf könnten die Unterschiede in den Aktivierungsüberspannungen und den inneren Widerständen zurückzuführen sein?

2. Stellen Sie die Wirkungsgradverläufe ($\eta_U, \eta_I, \eta_{FC}$) graphisch dar. Warum ergibt sich der maximale Stromwirkungsgrad für alle aufgenommenen U-I-Kennlinien bei $I=0,35$ A?

3. Stellen Sie die Verläufe von $U(N_2)$ graphisch dar.
4. Stellen Sie die Verläufe von $U(\lambda_{H_2})$ und $\eta_{FC}(\lambda_{H_2})$ graphisch dar. Über welchen Teilwirkungsgrad erfolgt die Reduzierung des Gesamtwirkungsgrads η_{FC} der Brennstoffzelle?
5. Stellen Sie den Verläufe von $U(P_{Lüfter})$ graphisch dar. Wodurch könnte der Spannungsabfall mit steigender Lüfterleistung verursacht worden sein?

Ermitteln Sie die relative Feuchte der Austrittsluft nach Abbildung 6.10. Kommt es durch den Luftvolumenstrom zu einer Entfeuchtung der Brennstoffzelle?

Temp (°C)	$\lambda = 1.5$	$\lambda = 2$	$\lambda = 3$	$\lambda = 6$	$\lambda = 12$	$\lambda = 24$
20					213	142
30				194	117	78
40		273	195	112	68	45
50	208	164	118	67	40	26
60	129	101	72	41		
70	82	65	46			
80	54	43	30			
90	37	28				

Abbildung 6.10.: Austrittsluftfeuchte rH [2]

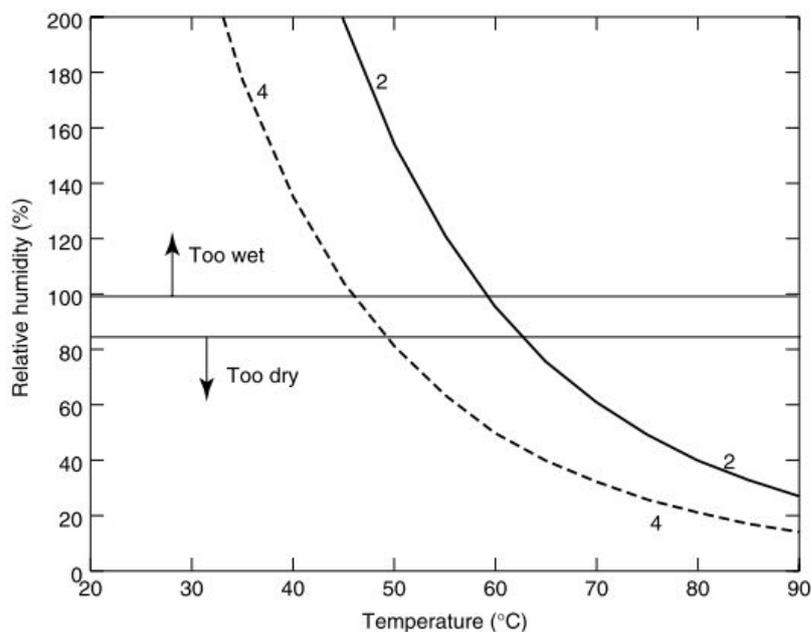


Abbildung 6.11.: Luftfeuchte rH [2]

6.2.7. Versuchsergebnisse

Während der Aufnahme der U-I-Kennlinien wurde die Stromstärke zweimal bei der Eingabe über den Touchscreen-Monitor versehentlich deaktiviert. Dadurch ergeben sich die in den U-I-Kennlinien zu beobachtenden Spannungsprünge. Durch diese Spannungssprünge wird auch der folgende Spannungsverlauf beeinflusst (höheres Spannungsniveau s. z. B. Abb. 6.12) Es wäre daher ratsam den Button zur Abschaltung des Stromes weiter weg vom Eingabefeld der Stromstärke zu verschieben oder komplett zu entfernen.

6.2.7.1. U-I-Kennlinien

Im Folgenden sind die während des Labors aufzuzeichnenden U-I-Kennlinien dargestellt.

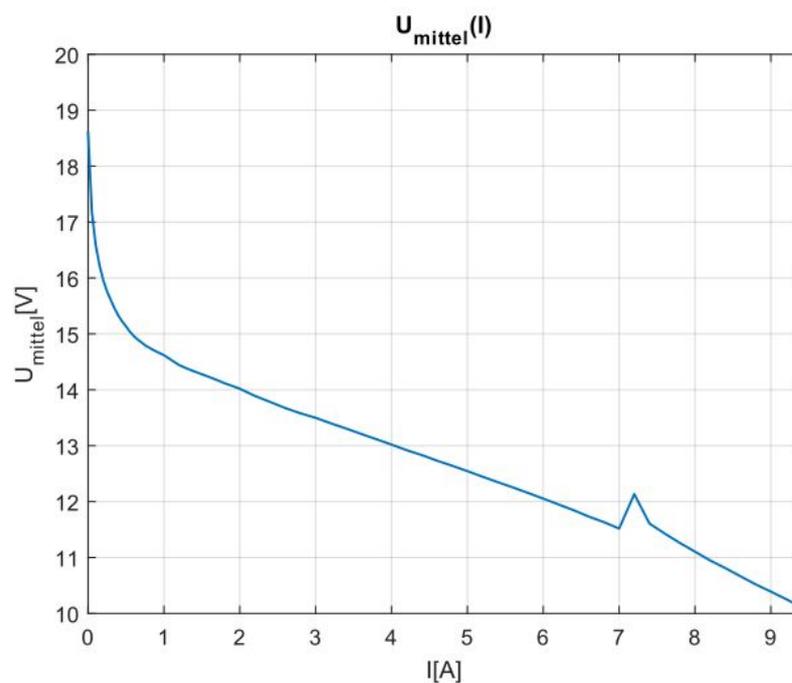


Abbildung 6.12.: U-I-Kennlinie ohne externe Wasserstoffbefeuchtung

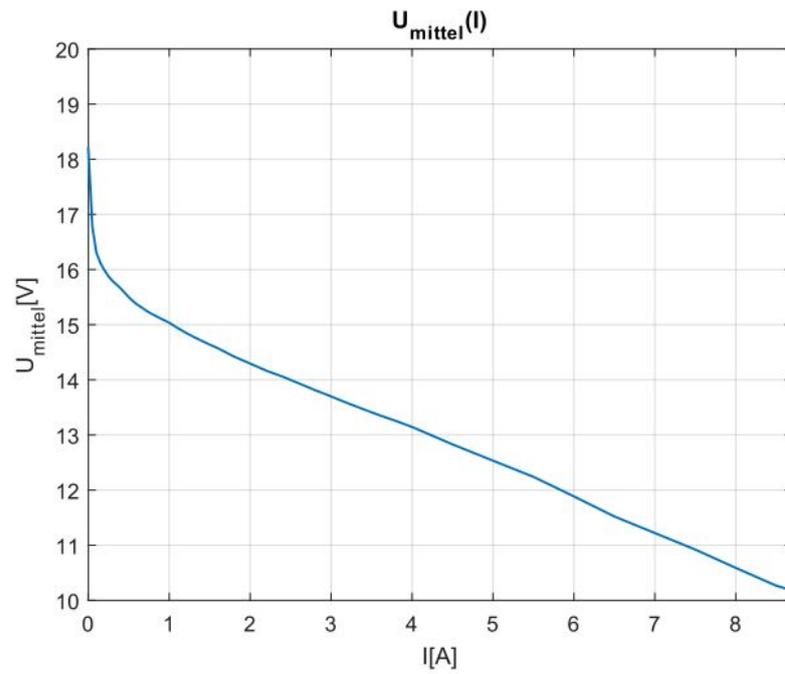


Abbildung 6.13.: U-I-Kennlinie ohne externe Wasserstoffbefeuchtung unter höherer Temperatur

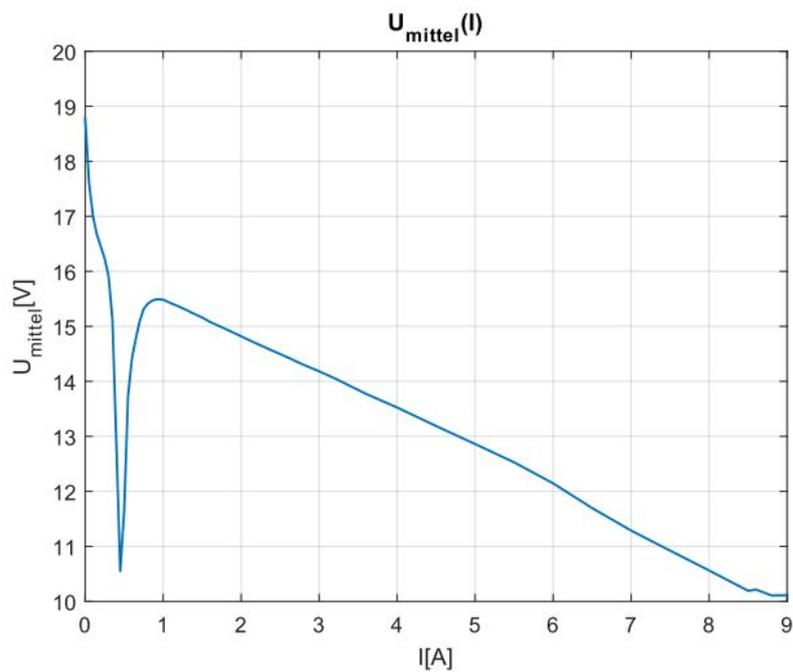


Abbildung 6.14.: U-I-Kennlinie unter externer Wasserstoffbefeuchtung

In Abbildung 6.15 sind die U-I-Kennlinien ohne externe Wasserstoffbefeuchtung in einem gemeinsamen Graphen dargestellt.

Die Durchtrittsüberspannung ist bei der höheren Temperatur geringer und der innere Widerstand R_i höher (s. Abb. 6.16 und 6.17), so dass sich die beiden U-I-Kennlinien bei der Stromstärke von etwa 5,4 A schneiden. Im hohen Stromstärkebereich verlaufen die U-I-Kennlinien nahezu parallel zueinander.

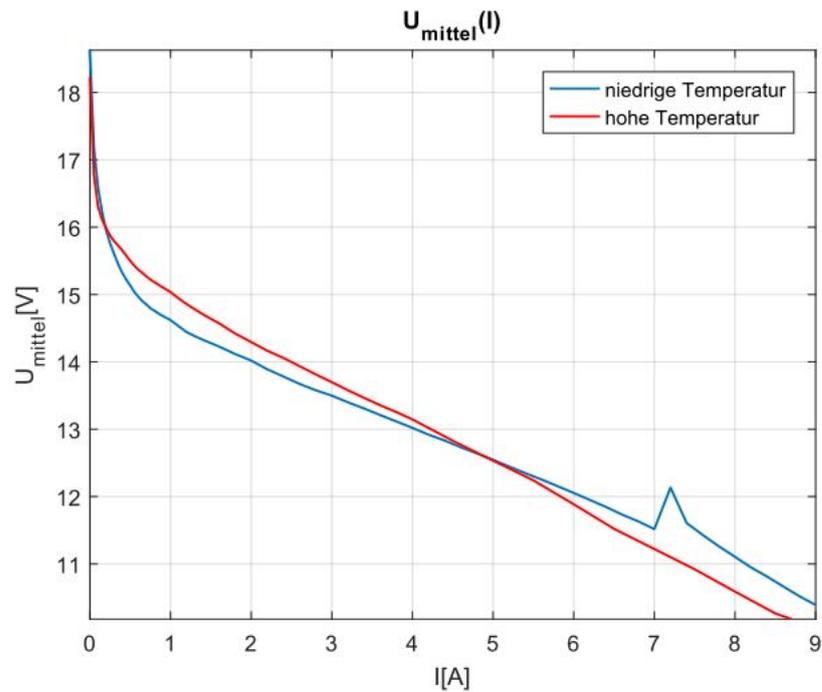


Abbildung 6.15.: U-I-Kennlinie bei unterschiedlichen Brennstoffzellentemperaturen

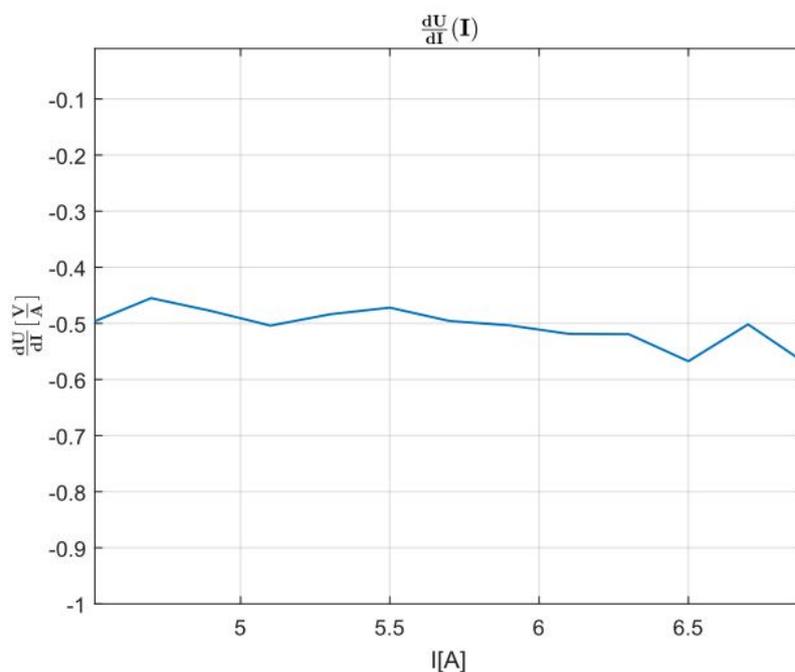


Abbildung 6.16.: R_i ohne externe Wasserstoffbefeuchtung unter niedriger Temperatur

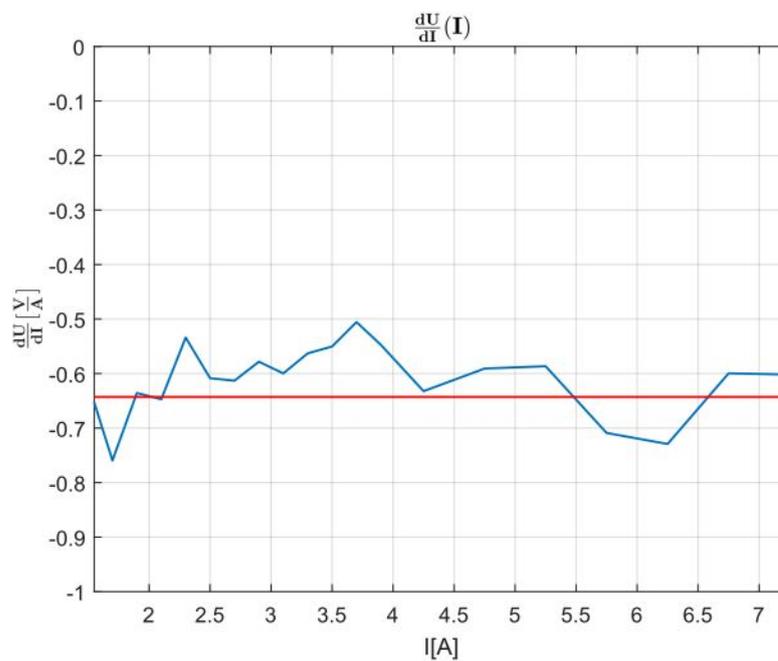


Abbildung 6.17.: R_i ohne externe Wasserstoffbefeuchtung unter hoher Temperatur

Die verringerte Durchtrittsüberspannung und der erhöhte innere Widerstand R_i sind womöglich auf die höhere Brennstoffzellentemperatur zurückzuführen (s. Abb. 6.18). Mit steigender Stromstärke nimmt die Temperatur-

differenz beider Messreihen ab, wodurch sich der parallele Verlauf beider U-I-Kennlinien im Stromstärkebereich ab 8 A ergibt. Aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen im Brennstoffzellenbetrieb kann die verringerte Durchtrittsüberspannung jedoch nicht ausschließlich darauf zurückzuführen sein.

Möglicherweise ist die Änderung der Brennstoffzellenfeuchte bzw. der Feuchteverteilung in der Brennstoffzelle ausschlaggebend für die Abweichungen der beiden U-I-Kennlinien. Die Brennstoffzellenfeuchte ist dabei abhängig von der Stromstärke, da sowohl die kathodenseitige Wasserproduktion, sowie auch der anodenseitige elektroosmotische Zug direkt proportional zur Stromstärke sind.

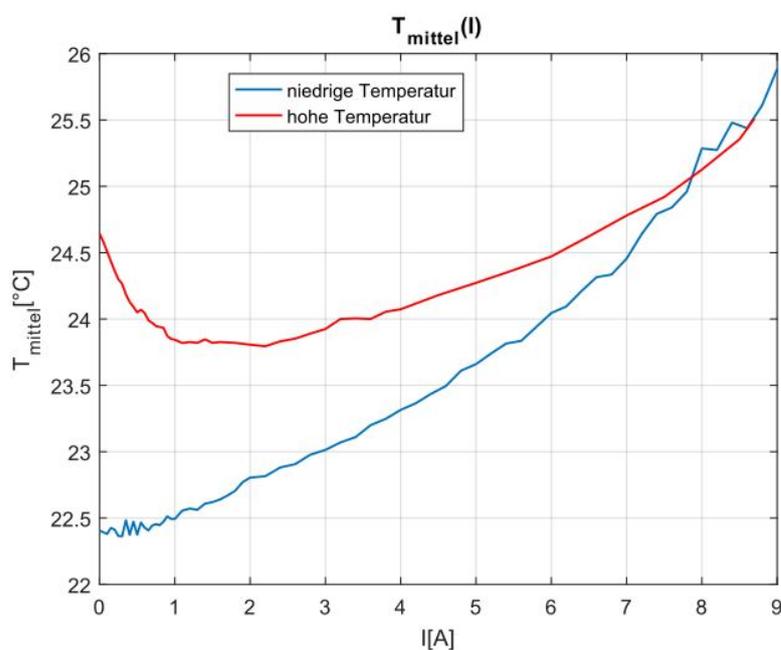


Abbildung 6.18.: T-I-Kennlinien

In Abbildung 6.19 sind die beiden U-I-Kennlinien mit und ohne externer Brennstoffbefeuchtung bei niedriger Temperatur in einem gemeinsamen Graphen dargestellt.

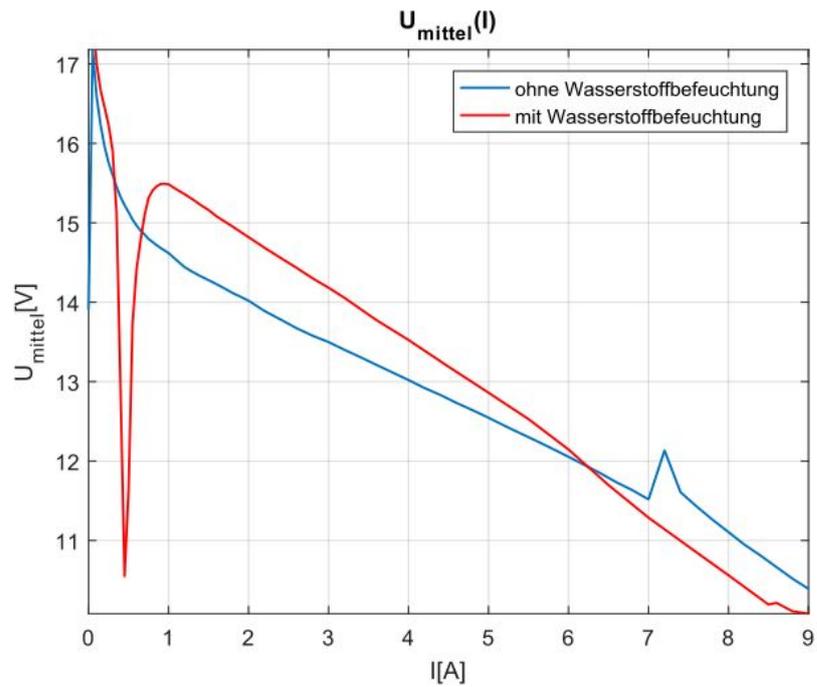


Abbildung 6.19.: U-I-Kennlinie mit und ohne Befeuchtung (niedrige Temperatur)

Der innere Widerstand unter Wasserstoffbefeuchtung beträgt $R_i = 0,8 \Omega$ (s. Abb. 6.20).

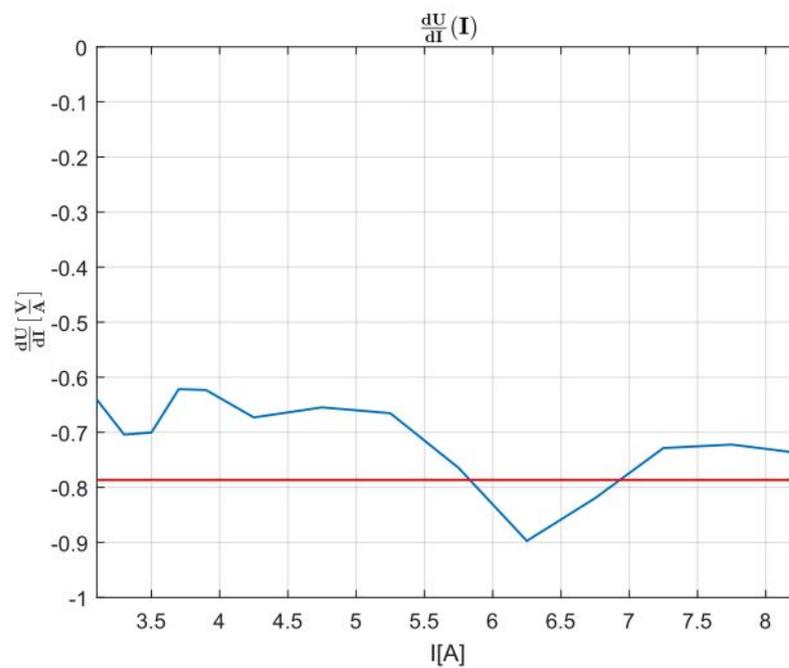


Abbildung 6.20.: R_i unter externer Wasserstoffbefeuchtung

In Abbildung 6.21 sind die beiden U-I-Kennlinien mit und ohne externer Brennstoffbefeuchtung bei höherer Temperatur in einem gemeinsamen Graphen dargestellt.

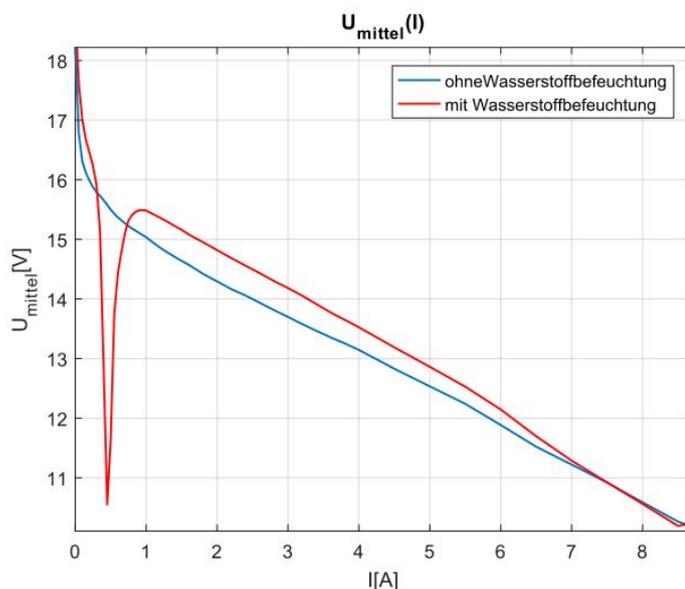


Abbildung 6.21.: U-I-Kennlinie mit und ohne Befeuchtung (hohe Temperatur)

Die Durchtrittsüberspannungen und inneren Widerstände scheinen nur von der Temperatur der Brennstoffzelle abzuhängen (s. Abb. 6.22). Je höher die Brennstoffzellentemperatur ist, desto geringer ist die Durchtrittsüberspannung und desto höher der innere Widerstand R_i .

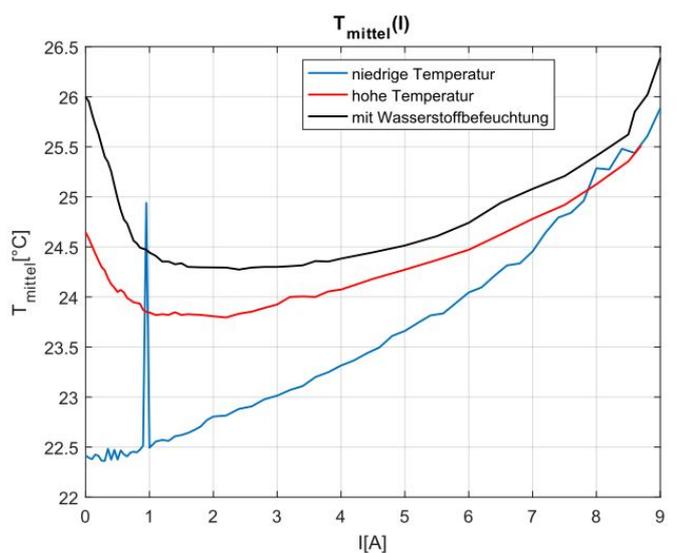


Abbildung 6.22.: T-I-Verläufe Vergleich

Wirkungsgrade

Die Untersuchung der Wirkungsgrade erfolgt am Beispiel der 1. Messreihe ohne Wasserstoffbefeuchtung und der Messreihe unter Wasserstoffbefeuchtung. Im Folgenden sind die Wirkungsgradverläufe in gemeinsamen Graphen dargestellt.

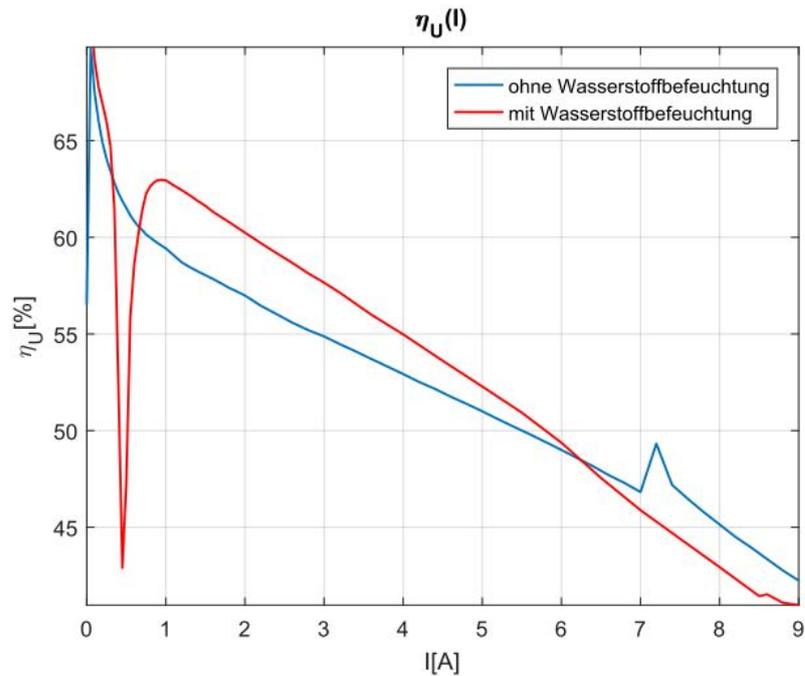
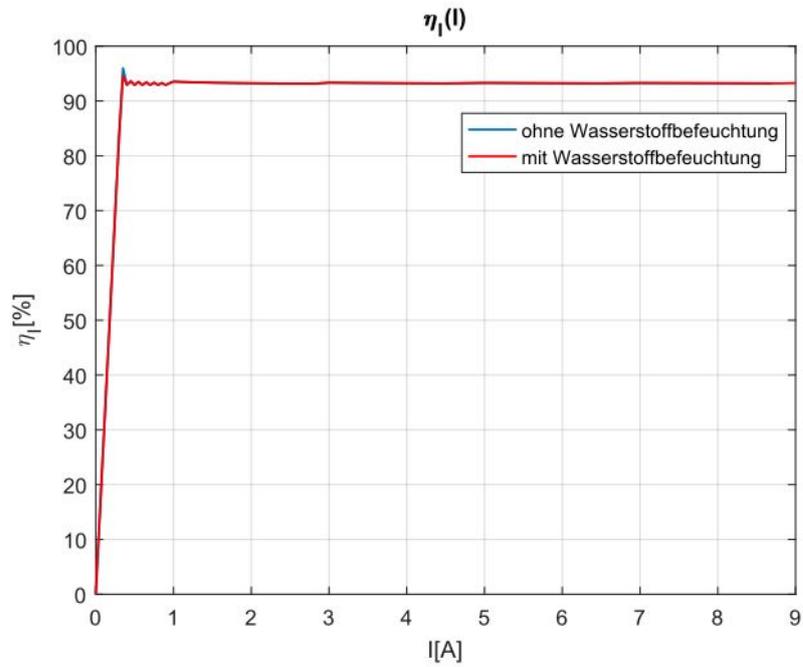
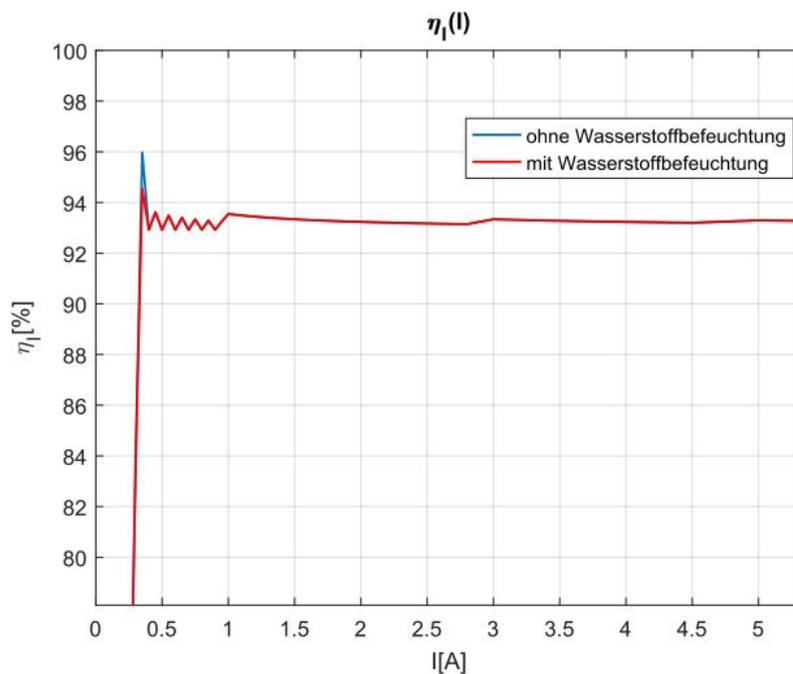


Abbildung 6.23.: $\eta_U(I)$ mit und ohne Befeuchtung

Der Spannungswirkungsgrad der Brennstoffzelle ist gemäß Gleichung 6.30 proportional zur Zellspannung. Dementsprechend weisen die Spannungswirkungsgrade η_U (s. Abb. 6.23) den gleichen Verlauf auf wie die U-I-Kennlinien (s. Abb. 6.19).

Abbildung 6.24.: $\eta_I(I)$ mit und ohne BefeuchtungAbbildung 6.25.: $\eta_I(I)$ mit und ohne Befeuchtung vergrößert

Der Stromwirkungsgrad η_I steigt zwischen 0 A und 0,35 A von 0 % auf etwa 94 % (s. Abb. 6.24 und 6.25) und beträgt im restlichen Stromstärkebereich etwa 93,3 %. Die anfängliche Steigung des Stromwirkungsgrads wird dabei

durch die sich ergebenden Stöchiometriefaktoren $\lambda > 1,1$ beim eingestellten konstanten Stickstoffvolumenstrom von 50 Nml/min verursacht.

$$\eta_I = \frac{I}{I_{max}} = \frac{I}{\lambda_{H_2} \cdot \dot{n}_{H_2, \lambda=1} \cdot z \cdot F} \quad (6.35)$$

mit

$$\dot{n}_{H_2, \lambda=1} = \frac{I}{z \cdot F} \quad (6.36)$$

Gleichung 6.36 eingesetzt in Gleichung 6.35 ergibt Gleichung 6.37:

$$\eta_I = \frac{I}{\lambda_{H_2} \cdot \frac{I}{z \cdot F} \cdot z \cdot F} = \frac{1}{\lambda_{H_2}} \quad (6.37)$$

Der Stromwirkungsgrad η_I ist also der umgekehrt proportional zum stöchiometrischen Faktor der Wasserstoffzufuhr λ_{H_2} . Mit abnehmendem Stöchiometriefaktor nimmt der Stromwirkungsgrad zu. Dies begründet den anfänglichen Anstieg des Wirkungsgrads bis zu einer Stromstärke von 0,35 A. Bei 0,35 A wird der konstante Stöchiometriefaktor der Wasserstoffzufuhr $\lambda_{H_2}=1,1$ eingestellt, wodurch sich der annähernd konstante Stromwirkungsgrad von 93,3 % ergibt.

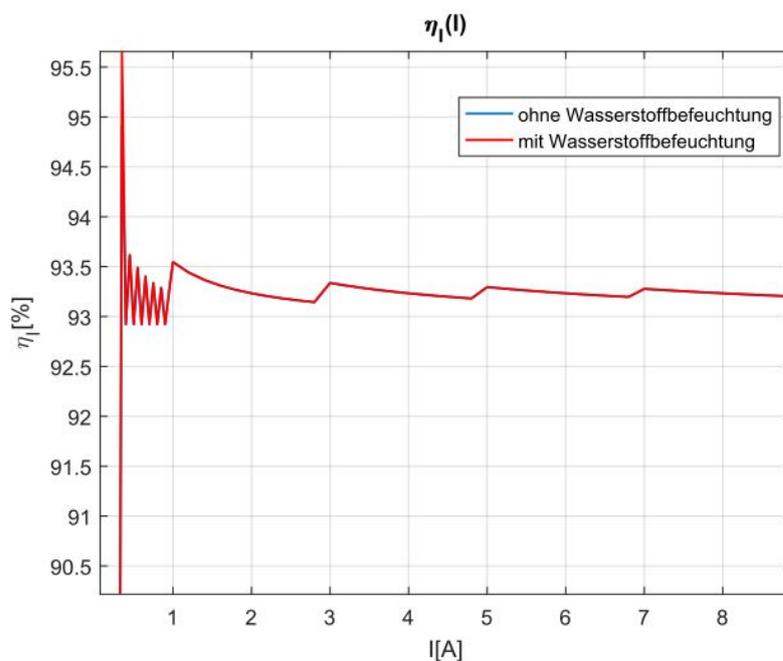


Abbildung 6.26.: $\eta_I(I)$ mit und ohne Befeuchtung vergrößert

Entsprechend Gl. 6.37 müsste sich für den gesamten Stromstärkebereich $I > 0,35$ A ein konstanter Stromwirkungsgrad ergeben. In Abbildung 6.26 sind ausgehend von einer Stromstärke von 1 A im 2 A-Takt abklingende Schwingungen des Wirkungsgrads erkennbar. Für diese variierenden Stromwirkungsgrade sind wahrscheinlich variierende Stöchiometriefaktoren aufgrund von Ungenauigkeiten in der Regelung der Wasserstoffzufuhr zuständig.

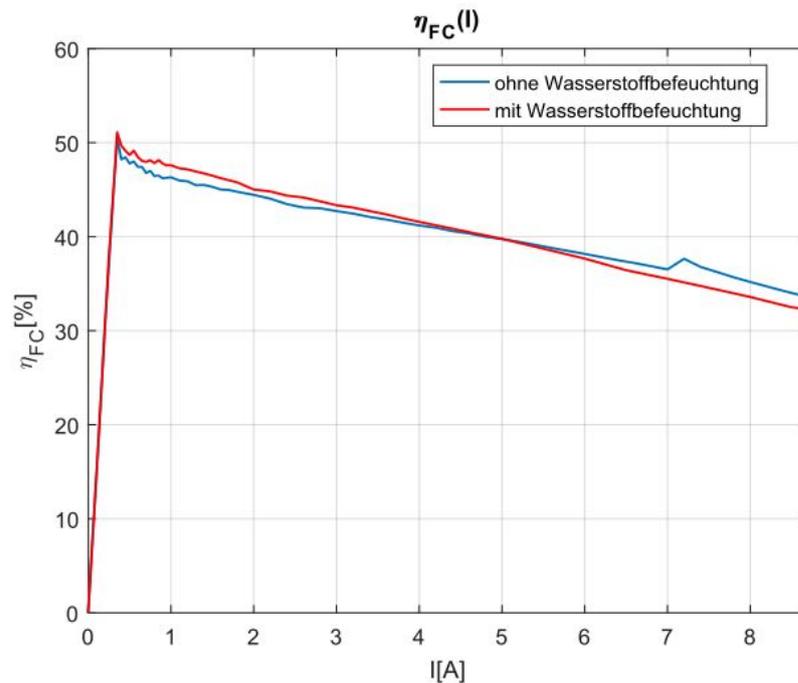


Abbildung 6.27.: $\eta_{FC}(I)$ mit und ohne Befeuchtung

Der Brennstoffzellen-Wirkungsgrad setzt sich gemäß Gleichung 6.32 aus dem Produkt mehrerer Teilwirkungsgrade zusammen. Da die Brennstoffzelle mit reinem Wasserstoff betrieben wird ist der Heizwertwirkungsgrad $\eta_H = 1$. Aufgrund niedriger Betriebstemperaturen der Brennstoffzelle kann $\eta_{th} \approx 0,83 = \text{konst}$ angenommen werden.

Der Gesamtwirkungsgrad wird also durch den Spannungs-, Strom- und Brenngaswirkungsgrad bestimmt.

Mit den Teilwirkungsgraden:

$$\eta_I(3 \text{ A})=93,5 \%$$

$$\eta_U(3 \text{ A})=55 \%$$
 und

$$\eta_{th}(5 \text{ A})=83 \%$$

ergibt sich folgender Gesamtwirkungsgrad für die 1. Messreihe (vgl. Abb. 6.27):

$$\eta_{FC} = \eta_U \cdot \eta_I \cdot \eta_{th} = 0,55 \cdot 0,935 \cdot 0,83 = 0,427 \hat{=} 42,7 \% \quad (6.38)$$

Alternativ lässt sich der Gesamtwirkungsgrad auch nach Gleichung 6.34 berechnen. Die Leistung der Brennstoffzelle wird auf den zugeführten Brennwert des Wasserstoffs $H_o=141,8 \frac{MJ}{kg}$ bezogen, da das Produktwasser der Brennstoffzellenreaktion flüssig ist. Demnach ergibt sich für die erste Messreihe bei $I=5 \text{ A}$ folgender Wirkungsgrad:

$$\begin{aligned} \eta_{FC} &= \frac{P_{el}}{\dot{m}_{H_2} \cdot H_{o,H_2}} = \frac{P_{el}}{\frac{\dot{V}_{H_2}}{60 \frac{s}{min}} \cdot \frac{1}{V_N} \cdot M_{H_2} \cdot H_{o,H_2}} \\ &= \frac{40,5 \text{ W}}{\frac{0,448 \frac{NL}{min}}{22,414 \frac{NL}{mol} \cdot \frac{60 s}{min}} \cdot \frac{2 \text{ kg}}{1000 \text{ mol}} \cdot 141,8 \frac{MJ}{kg}} = 0,428 \hat{=} 42,8 \% \end{aligned} \quad (6.39)$$

6.2.7.2. Brennstoffzellenkühlung

Bei der Untersuchung des Kühleinflusses auf den Brennstoffzellenbetrieb wird eine mit zunehmender Ventilatorleistung fallende Stackspannung festgestellt (s. Abb. 6.28 und 6.29).

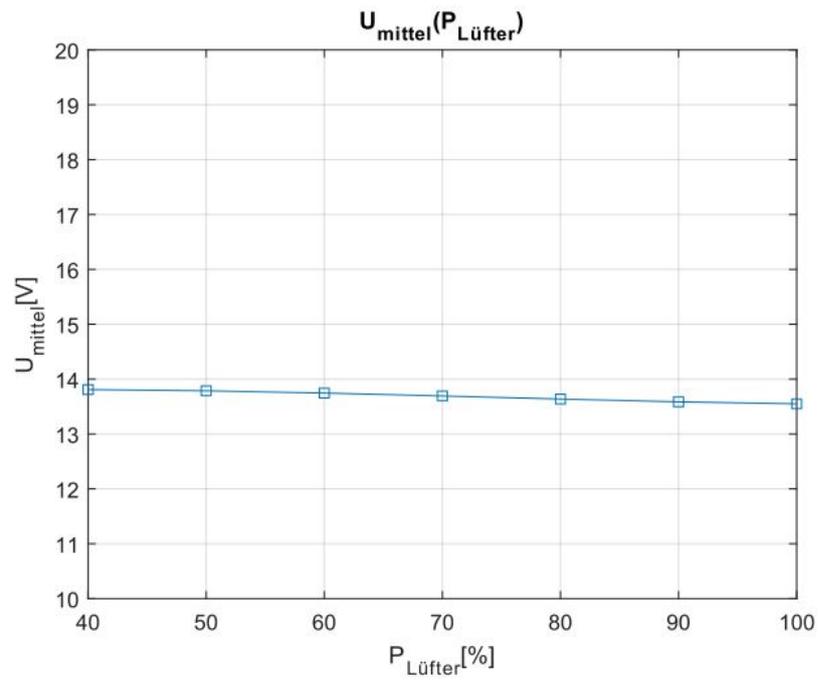


Abbildung 6.28.: U(P)

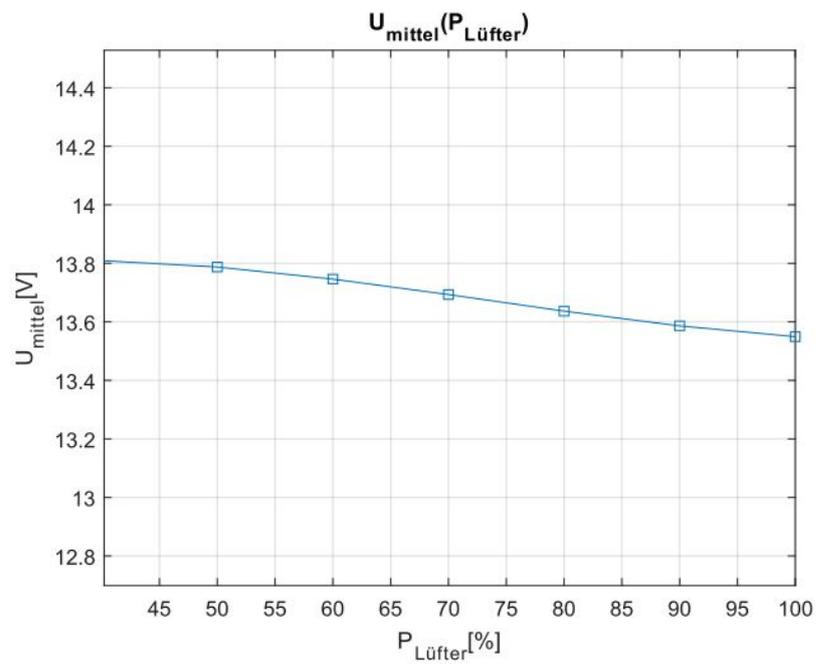
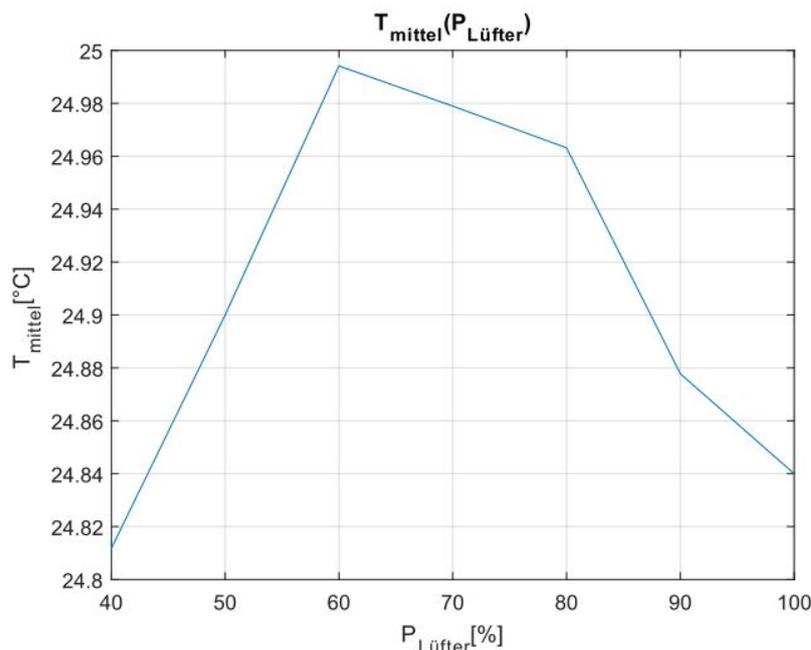


Abbildung 6.29.: U(P) vergrößert

In Abbildung 6.30 ist der Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Lüfterleistung dargestellt.

Abbildung 6.30.: $T(P)$

Entgegen der Erwartung eines Spannungsanstiegs bei zunehmender Brennstoffzellenkühlung (Temperatursenkung) und Oxidantenzufuhr. Möglicherweise wirkt sich hierbei der durch die Kühlluft herbeigeführte Temperaturabfall über eine Erhöhung der Aktivierungsüberspannung sowie auch des inneren Widerstands auf die Stackspannung aus. Eine niedrigere Temperatur hat eine niedrigere Austauschstromdichte i_0 zur Folge, wodurch die Aktivierungsüberspannung erhöht wird.

Die Erhöhung der Aktivierungsüberspannung sollte jedoch aufgrund der geringen Temperaturunterschiede sehr gering ausfallen. Der Temperaturabfall könnte aber maßgeblich über die Erhöhung des inneren Widerstands R_i am Spannungsabfall beteiligt sein. Die Leitfähigkeit des Elektrolyten und der Reaktionsgase ist stark temperaturabhängig [5].

Zur genaueren Untersuchung des Temperatureinflusses ist eine lokale Temperaturmessung innerhalb der Brennstoffzelle, beispielsweise an den Elektroden, notwendig.

Möglicherweise ergibt sich der Spannungsabfall aber auch über die Membranentfeuchtung durch die Realisierung der Kühlung und Luftzufuhr durch den gleichen Ventilator.

Anhand nachfolgender Rechnung wird eine mögliche Membranentfeuchtung überschlägig überprüft.

Dazu wird zunächst die unrealistische Annahme getroffen, dass lediglich 40 % der in der Brennstoffzelle erzeugten Wärme konvektiv über die Kühlluft abgeführt werden. Für die Umgebungsluft wird dabei eine Temperatur von 20°C und eine relative Feuchte von 70 % angenommen. Die Rechnung bezieht sich auf die Lüfterleistung von 70 %, da der vorhandene Wärmestrom hoch genug ist, um eine Temperaturabnahme zu bewirken (s. Abb. 6.30).

Die gesamte Wärmeproduktion der Brennstoffzelle ist dabei:

$$\dot{Q} = P_e \cdot \left(\frac{1,25V}{U_z} - 1 \right) \quad (6.40)$$

Mit der Annahme, dass 40 % der produzierten Wärme durch die Kühlluft abgeführt werden müssen, folgt:

$$0,4 \cdot P_e \cdot \left(\frac{1,25V}{U_z} - 1 \right) = \dot{m}_{kuehlung} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (6.41)$$

Der benötigte Luftmassenstrom in Abhängigkeit von der Leistung berechnet sich folgendermaßen:

$$\dot{m}_{Luft,Oxidant} = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_e}{U_z} \quad (6.42)$$

Da die Brennstoffzellenkühlung und die Oxidantenzufuhr über den gleichen Ventilator erfolgen gilt:

$$\dot{m}_{Kuehlung} = \dot{m}_{Luft,Oxidant} \quad (6.43)$$

Somit folgt:

$$\lambda = \frac{0,4 \cdot (1,25V - U_z)}{c_p \cdot \Delta T \cdot 3,57 \cdot 10^{-7}} = \frac{0,4 \cdot (1,25V - \frac{13,7V}{20})}{1004 \frac{J}{kgK} \cdot (25 - 20)K \cdot 3,57 \cdot 10^{-7}} = 126 \quad (6.44)$$

Temp (°C)	$\lambda = 1.5$	$\lambda = 2$	$\lambda = 3$	$\lambda = 6$	$\lambda = 12$	$\lambda = 24$
20					213	142
30				194	117	78
40		273	195	112	68	45
50	208	164	118	67	40	26
60	129	101	72	41		
70	82	65	46			
80	54	43	30			
90	37	28				

Abbildung 6.31.: relative Feuchte der Austrittsluft [2]

Wie man in Abbildung 6.31 erkennt, erreicht die Austrittsluft mit der Temperatur von 30°C bei einer Luftzufuhr mit $\lambda=24$ eine relative Feuchte von 78 %. Die Tabelle ist zwar nur bis $\lambda=24$ aufgetragen, dennoch kann man mit größter Sicherheit davon ausgehen, dass sich bei der Temperatur von 28,3°C mit $\lambda=126$ eine relative Luftfeuchtigkeit der Abluft von weit unter 80 % ergeben wird. Die eindeutig zu trockene Kühlluft (siehe Abb. 6.32) führt somit zu einer starken Trocknung der Membran.

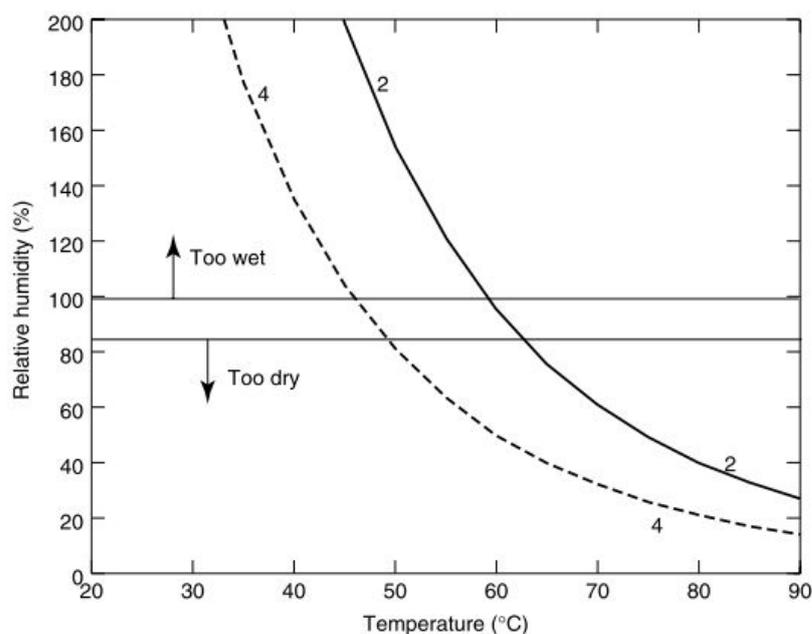


Abbildung 6.32.: relative Austrittsluftfeuchte [2]

Dabei muss noch angemerkt werden, dass für die vereinfachte Berechnung des λ der Kühlluftzufuhr angenommen wurde, dass nur 40 % der durch die Brennstoffzelle produzierten Wärme über die Kühlluft abgeführt werden. Im hier vorliegenden Praxisfall sind Werte weit höher als 40 % rea-

listischer, wodurch sich ein noch höheres λ ergibt.

Außerdem wurde in der Rechnung ein Betriebspunkt ausgewählt, der zu einer Kühlung der Brennstoffzelle führt. Der insgesamt abgeführte Wärmestrom ist also größer als der in der Berechnung berücksichtigte Wärmestrom, der die Brennstoffzellentemperatur konstant halten würde. Im vorliegenden Fall ist die Membrantrocknung somit noch höher, als durch die Rechnung nachgewiesen.

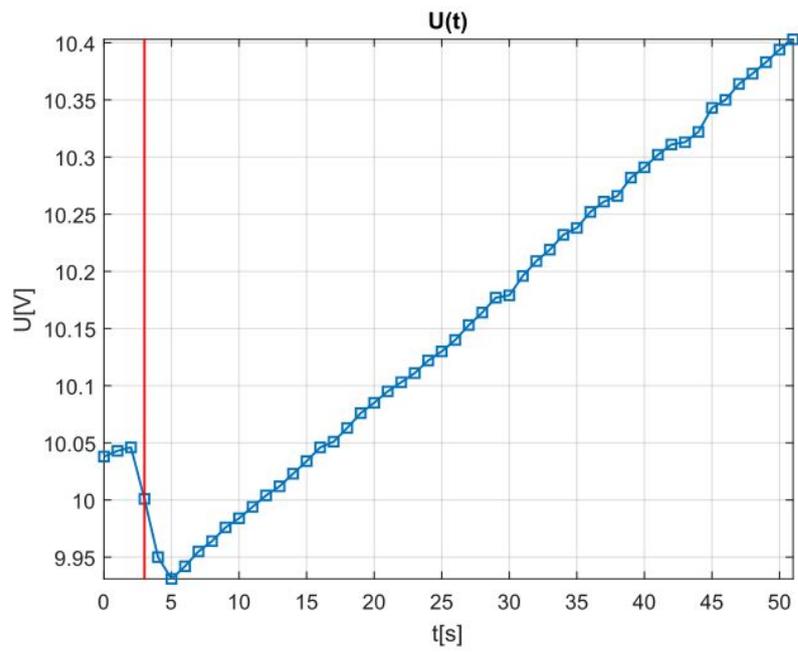
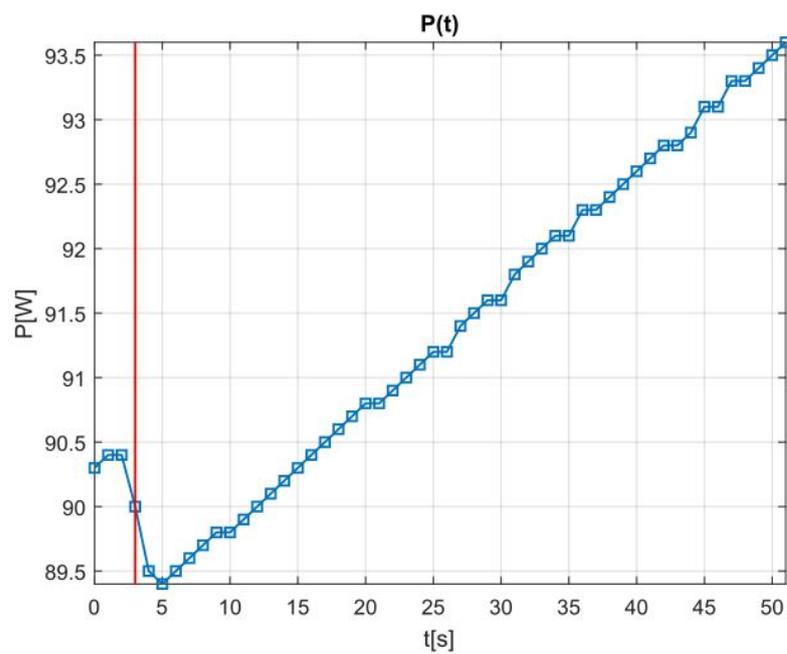
Die folgenden Abbildungen beziehen sich auf die U-I-Kennlinie unter Wasserstoffbefeuchtung. Bei der maximalen Stromstärke von $I=9$ A wurde die angelegte Lüfterspannung von 55 % auf 40 % reduziert.

Den Erwartungen zufolge sollte sich ein Spannungsabfall aufgrund der zunehmenden Temperatur und des reduzierten λ_{O_2} ergeben.

Abbildung 6.33 ist zu entnehmen, dass sich bei Einstellung der neuen Lüfterspannung (rote Bezugslinie) zunächst einmal ein Spannungsabfall ergibt. Dieser geht wahrscheinlich mit der Reduktion von λ_{O_2} einher. Im weiteren Verlauf erfolgt aber mit zunehmender Zeitdauer ein linearer Spannungsanstieg.

Im betrachteten Zeitraum von 50 Sekunden ergibt sich dadurch ein Leistungsanstieg von etwa 4 W (s. Abb. 6.34) und darüber ein Wirkungsgradanstieg der Brennstoffzelle von $\Delta\eta_{FC}=1,7$ %. Möglicherweise erfolgt der Anstieg der Stackspannung und der damit direkt verbundenen Größen aufgrund der steigenden Temperatur.

Wie schon angesprochen, ist die elektrische Leitfähigkeit der Reaktionsgase, sowie auch des Elektrolyten stark temperaturabhängig [5]. Durch die steigenden Brennstoffzellentemperatur könnte also eine Senkung des inneren Widerstands R_i erfolgt sein.

Abbildung 6.33.: $U(t)$ nach Senkung der Lüfterleistung bei $I=9$ AAbbildung 6.34.: $P(t)$ nach Senkung der Lüfterleistung bei $I=9$ A

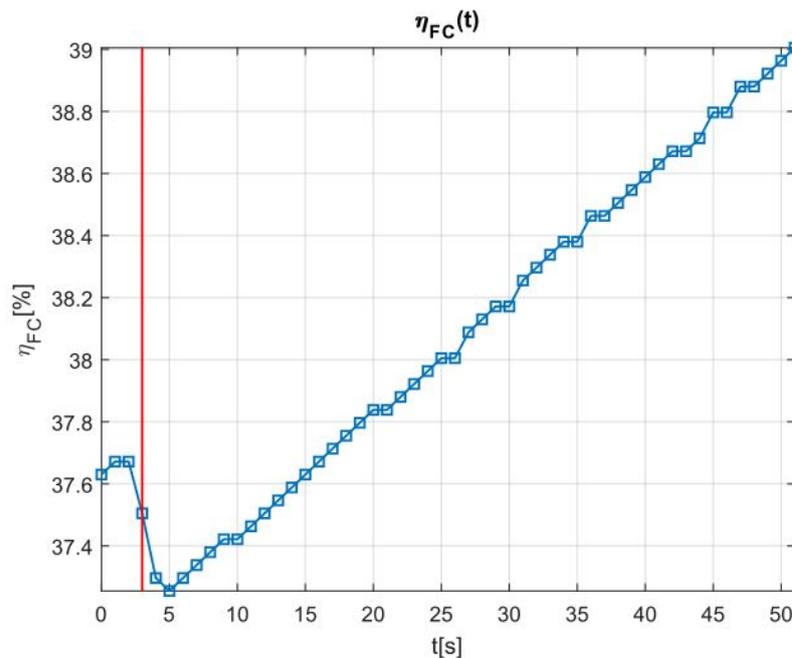


Abbildung 6.35.: $\eta_{FC}(t)$ nach Senkung der Lüfterleistung bei $I=9$ A

6.2.7.3. Wasserstoffzufuhr

In Abbildung 6.36 ist der Zusammenhang zwischen der Stackspannung und dem stöchiometrischen Faktor der Wasserstoffzufuhr λ_{H_2} graphisch dargestellt. In Abbildung 6.37 ist der Zusammenhang vergrößert dargestellt.

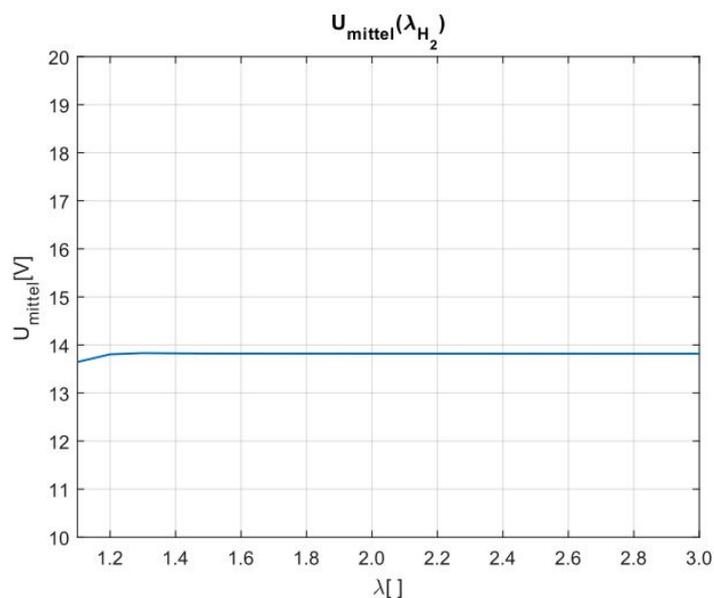
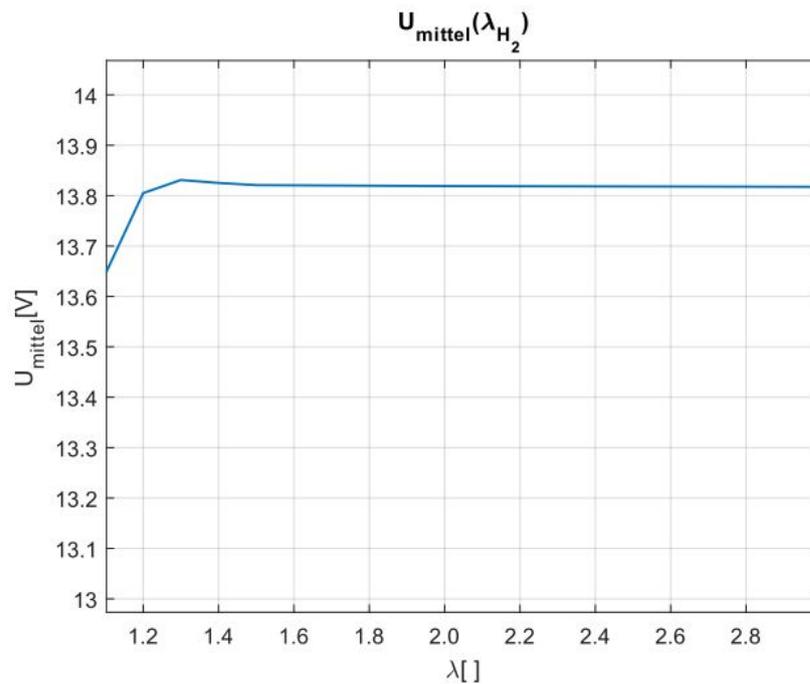
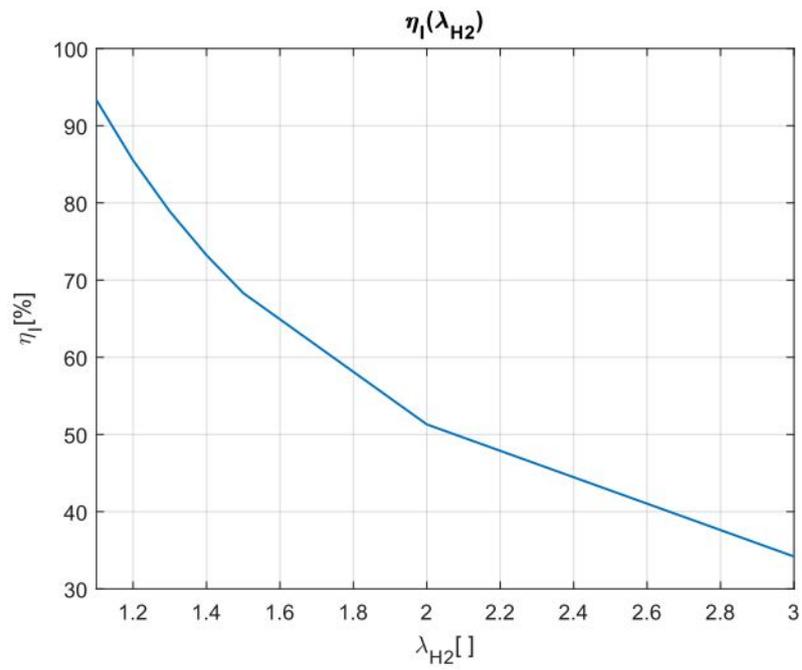
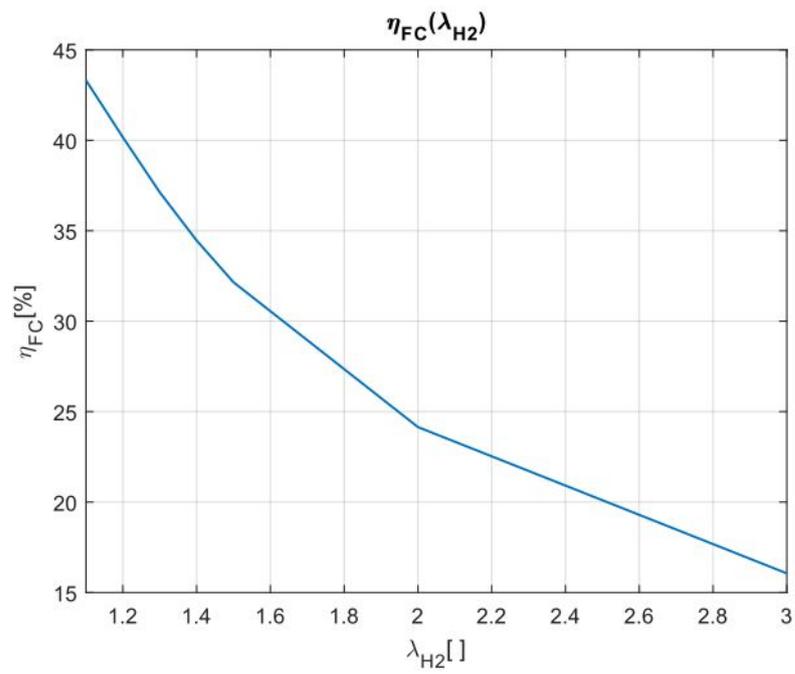


Abbildung 6.36.: $U(\lambda_{H_2})$

Abbildung 6.37.: $U(\lambda_{\text{H}_2})$ vergrößert

Bei der Erhöhung des stöchiometrischen Faktors zwischen 1 und 1,3 erfolgt ein Spannungsanstieg von fast 0,2 V. Bei weiterer Erhöhung des stöchiometrischen Faktors bleibt die Stackspannung annähernd konstant. Mit der Erhöhung von λ_{H_2} ist jedoch über den abnehmenden Stromwirkungsgrads η_{I} (s. Abb. 6.38) ein Abfall des Brennstoffzellenwirkungsgrads η_{FC} verbunden (s. Abb. 6.39). Der maximale Brennstoffzellenwirkungsgrads ist somit mit bei $\lambda_{\text{H}_2}=1$ erreichbar. Bei der maximalen Stackspannung von 13,83 V mit $\lambda_{\text{H}_2}=1,3$ ergibt sich ein Brennstoffzellenwirkungsgrad von $\eta_{\text{FC}}=43,2\%$.

Abbildung 6.38.: $\eta_I(\lambda_{H_2})$ Abbildung 6.39.: $\eta_{FC}(\lambda_{H_2})$

7. Fazit

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit konnten unterschiedliche Versuchsreihen zur Untersuchung des Brennstoffzellenbetriebes durchgeführt werden. Dabei wurden bereits vorgeschlagene Versuche aus vorangegangenen studentischen Arbeiten am Versuchsstand umgesetzt und die Versuchsergebnisse ausgewertet.

Es wurden viele Übereinstimmungen zu den theoretischen Grundlagen der Brennstoffzellen gefunden.

Einige Effekte waren jedoch nicht vorhersagbar und konnten auch unter Zuhilfenahme der theoretischen Kenntnisse nicht genau erklärt werden. Vor allem durch die Zufuhr der Reaktionsluft, sowie auch der Kühlluftzufuhr über den gleichen Ventilator kommt es zur starken Beeinflussung der Betriebsparameter untereinander, wodurch nur spekulative Bewertungen der Versuchsergebnisse möglich sind.

Dabei spielten auch die auf nur eine Messtelle limitierte Temperaturmessung, sowie die momentan nicht umgesetzte Feuchtemessung der Brennstoffzelle eine wesentliche Rolle.

Schließlich konnten unterschiedliche Teilversuche zu einem Gesamtversuch zusammengesetzt werden, der den Studenten die Möglichkeit bietet das angeeignete Wissen aus der Vorlesung am Versuchsstand zu überprüfen.

Zum besseren Verständnis des Brennstoffzelleverhaltens sollte in Zukunft die Möglichkeit gegeben sein, die momentan nicht erklärbaren Effekte genauer untersuchen zu können. Dazu sollte die Temperaturmessung der Brennstoffzelle auf mehrere Stellen erweitert werden. Außerdem sollte eine Feuchtemessung umgesetzt werden, sowie auch ein Konzept zur Luftbefeuchtung entwickelt und am Versuchsstand umgesetzt werden.

Zur Beurteilung von lokalen Störungen sollte zusätzlich an jeder Einzelzelle eine getrennte Spannungsmessung erfolgen.

Literaturverzeichnis

- [1] Achim Schmidt, Electro-chemical Energy Conversion - Fuel Cell Systems, Hamburg, 17.06.2016
- [2] Andrew Dicks, Fuel Cell systems explained, 08/2001
- [3] <http://www.diebrennstoffzelle.de/zelltypen/geschichte/>, aufgerufen am 24.03.2017
- [4] <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Brennstoffzelle>, aufgerufen am 24.03.2017
- [5] https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische_Leitf%C3%A4higkeitTemperaturabh%C3%A4ngigkeit, aufgerufen am 11.05.2017
- [6] Reuschel, G. „Brennstoffzelle – Eine Chance für die Saarländische Industrie“. IZES-Workshop, Ticona GmbH, Frankfurt, 2001
- [7] Stolten, D. Skriptum zur Vorlesung „Grundlagen und Technik der Brennstoffzellen“. RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, 2002
- [8] Berger, O. "Thermodynamische Analyse eines Brennstoffzellensystems zum Antrieb von Kraftfahrzeugen“, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2009
- [9] Kurzweil, P. "Brennstoffzellentechnik“, 2. Auflage, Springer Verlag
- [10] <http://www.pemfc.de/pemfc.html>, aufgerufen am 24.03.2017
- [11] Karamanolis, Stratis "Brennstoffzellen - Schlüsselemente der Wasserstofftechnologie“, Vogel Buchverlag, 2003
- [12] Kuhn, Peter "Erarbeitung eines Brennstoffzellen-Versuchsstands für das Modul Electro-chemical Energy Conversion – Fuel Cell Systems“, Bachelorarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 28.08.2015

[13] <https://de.wikipedia.org/wiki/Diffusion>, aufgerufen am
16.04.2017

[14] Handbuch für Schunk Brennstoffzellen-Stacks

A. Matlab-Codes

A.1. U-I-Kennlinien

```
1 function stromkonstt(tanfang,tende,ianfang,ischritt,iende,exceldatei,datei)
2 - x=load(datei);
3 - n=1;
4 - rd=-1000;
5 - xz=400;
6 - xy=500;
7 - strom=x(:,4);
8 - for i=ianfang:ischritt:iende
9 -     a=find(abs(strom(tanfang:tende)-i)<0.001);
10 -     b=length(a);
11 -     if b>1
12 -         c=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,6);
13 -         cc=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,7);
14 -         d=x(min(a)+tanfang-1:max(a)+tanfang-1,39);
15 -         ia(n)=i;
16 -         umitt(n)=mean(c);
17 -         tmitt(n)=mean(d);
18 -         pmitt(n)=mean(cc);
19 -
20 -
21 -         r=length(c);
22 -         rr=length(d);
23 -         figure(xz)
24 -         plot(0:1:rr-1,c,'-', 'LineWidth',1.1)
25 -         hold on
26 -         plot([1,1],[min(c),12.7],'r-', 'LineWidth',1.1)
27 -         hold off
28 -         xlim([0 rr-1])
29 -         ylim([min(c) max(c)])
```

```

30 -     title(['U(t) bei einer Stromstärke von ',num2str(i),' A']);
31 -     ylabel('U[V]');
32 -     xlabel('t[s]');
33 -     grid on;
34 -     figure(xy)
35 -     % plot(0:1:rr-1,d,'s-')
36 -     % xlim([0 rr-1])
37 -     % title(['T(t) bei einer Stromstärke von ',num2str(i),' A']);
38 -     % ylabel('T[°C]');
39 -     % xlabel('t[s]');
40
41
42 -         xz=xz+1;
43 -         xy=xy+1;
44 -         n=n+1;
45 -         c=0;
46 -         d=0;
47 -         a=0;
48 -         cc=0;
49
50 -     else
51 -         a=0;
52 -         d=0;
53 -         c=0;
54 -         cc=0;
55 -     end
56 - end
57
57 - dspannung = diff(umitt)./diff(ia);
58 - dtemp=diff(tmitt)./diff(ia);
59
60 - t=transpose(dspannung);
61 - tt=transpose(dtemp);
62 - ff=length(dspannung);
63 - xx=(ia(1):ia(ff));
64 - xxx=(ia(2):ia(ff+1));
65
66 - zz=transpose(xx);
67 - zzz=transpose(xxx);
68 - xlswrite(exceldatei,[t,tt],2);
69
70 - figure(201)
71 - plot(ia,pmitt,'-', 'LineWidth',1.1);
72 - xlim([min(ia) max(ia)])
73 - ylim([0 100])
74 - title(['P_m_i_t_t_e_l(I)']);
75 - ylabel('P_m_i_t_t_e_l[W]');
76 - xlabel('I[A]');
77 - grid on;
78
79 - figure(200)
80 - plot(ia,umitt,'-', 'LineWidth',1.1);
81 - xlim([min(ia) max(ia)])
82 - ylim([10 20])
83 - title(['U_m_i_t_t_e_l(I)']);
84 - ylabel('U m i t t e l[V]');

```

```
85 - xlabel('I[A]');
86 - grid on;
87 - figure(300)
88 - plot(ia,tmitt,'-');
89 - xlim([min(ia) max(ia)])
90 - title(['T_m_i_t_t_e_l(I)']);
91 - ylabel('T_m_i_t_t_e_l[°C]');
92 - xlabel('I[A]');
93 - ylim([22 30])
94 - grid on;
95 - ia=transpose(ia);
96 - umitt=transpose(umitt);
97 - tmitt=transpose(tmitt);
98 - xlswrite(exceldatei,[ia,umitt,tmitt],1)
99 - fprintf('Exceldatei: %s.xlsx im Matlab Ordner\n',exceldatei);
100 - fprintf('1.Blatt:\n');
101 - fprintf('1.Spalte: Stromwerte\n');
102 - fprintf('2.Spalte: mittlere Spannungswerte\n');
103 - fprintf('2.Spalte: mittlere Temperaturwerte\n');
104 - fprintf('2.Blatt:\n');
105 - fprintf('1.Spalte: dU/dI\n');
106 - fprintf('2.Spalte: dT/dI\n');
```

A.2. U-I-Kennlinien Vergleich

```

1   function a= mitohneBefeuchtung(tanfang,tende,tanfang2,tende2,ianfang,
2   ischritt,iende,exceldatei,datei,datei2,datei3)
3   x=load(datei);
4   n=1;
5   rd=-1000;
6   xz=400;
7   xy=500;
8   strom=x(:,4);
9   for i=ianfang:ischritt:iende
10  a=find(abs(strom(tanfang:tende)-i)<0.001);
11  b=length(a);
12  if b>1
13  c=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,6);
14  u=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,20);
15  v=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,7);
16  d=x(min(a)+tanfang-1:max(a)+tanfang-1,39);
17  ia(n)=i;
18  umitt(n)=mean(c);
19  wassmitt(n)=mean(u);
20  tmitt(n)=mean(d);
21  P(n)=mean(v);
22
23
24  r=length(c);
25  rr=length(d);
26  xz=xz+1;
27  xy=xy+1;
28  n=n+1;
29  c=0;
30  u=0;
31  v=0;
32  d=0;
33  a=0;
34
35  else
36  a=0;
37  u=0;
38  v=0;
39  d=0;
40  c=0;
41  end
42 end
43
44 x=load(datei2);
45 strom=x(:,4);
46 for i=ianfang:ischritt:iende
47 a=find(abs(strom(tanfang2:tende2)-i)<0.001);
48 b=length(a);
49 if b>1
50 c=x(tanfang2+min(a)-1:max(a)+tanfang2-1,6);
51 u=x(tanfang2+min(a)-1:max(a)+tanfang2-1,20);
52 d=x(min(a)+tanfang2-1:max(a)+tanfang2-1,39);
53 v=x(tanfang2+min(a)-1:max(a)+tanfang2-1,7);
54 ia2(n)=i;
55 umitt2(n)=mean(c);
56 wassmitt2(n)=mean(u);
57 tmitt2(n)=mean(d);
58 P2(n)=mean(v);
59
60 r2=length(c);

```

```

61 -         rr2=length(d);
62
63
64     % figure(xz)
65     % plot(0:1:rr-1,c,'s-')
66     % xlim([0 rr-1])
67     % title(['U(t) bei einer Stromstärke von ',num2str(i),' A']);
68     % ylabel('U[V]');
69     % xlabel('t[s]');
70     % grid on;
71     % figure(xy)
72     % plot(0:1:rr-1,d,'s-')
73     % xlim([0 rr-1])
74     % title(['T(t) bei einer Stromstärke von ',num2str(i),' A']);
75     % ylabel('T[°C]');
76     % xlabel('t[s]');
77
78
79 -         xz=xz+1;
80 -         xy=xy+1;
81 -         n=n+1;
82 -         c=0;
83 -         u=0;
84 -         v=0;
85 -         d=0;
86 -         a=0;
87
88     else
89         a=0;
90         d=0;
91         u=0;
92         v=0;
93         c=0;
94     end
95     end
96
97
98
99 -     dspannung = diff(umitt)./diff(ia);
100 -     dtemp=diff(tmitt)./diff(ia);
101
102 -     t=transpose(dspannung);
103 -     tt=transpose(dtemp);
104 -     ff=length(dspannung);
105 -     xx=(ia(1):ia(ff));
106 -     xxx=(ia(2):ia(ff+1));
107
108 -     zz=transpose(xx);
109 -     zzz=transpose(xxx);
110 -     xlswrite(exceldatei,[t,tt],2);
111 -     l1=length(umitt);
112 -     l2=length(umitt2);
113
114 -     figure(200)
115 -     plot(ia,umitt,'-', 'LineWidth',1.1);
116 -     hold on
117 -     sucher=find(umitt2>0);
118 -     l3=length(sucher);
119 -     differenz=l2-l3;
120 -     umitt2(1:differenz)=umitt2(differenz+1);

```

```

121 - plot(ia2,umitt2,'r-','LineWidth',1.1);
122 - hold off
123 - xlim([min(ia) max(ia)])
124 - ylim([min(umitt2(3:12)) max(umitt)])
125 - title(['U_m_i_t_t_e_l(I)']);
126 - ylabel('U_m_i_t_t_e_l[V]');
127 - xlabel('I[A]');
128 - grid on;
129
130
131
132 - figure(300)
133 - plot(ia,tmitt,'-','LineWidth',1.1);
134 - hold on
135 - l5=length(tmitt2);
136 - sucher2=find(tmitt2>0);
137 - l4=length(sucher2);
138 - differenz2=l5-l4;
139 - tmitt2(1:differenz2)=tmitt2(differenz2+1);
140 - plot(ia2,tmitt2,'r-','LineWidth',1.1);
141 - hold off
142 - xlim([min(ia) max(ia)])
143 - title(['T_m_i_t_t_e_l(I)']);
144 - ylabel('T_m_i_t_t_e_l[°C]');
145 - xlabel('I[A]');
146 - grid on;
147
148 - eta=umitt/20/1.23*100;
149 - eta2=umitt2/20/1.23*100;
150 - figure(400)
151 - plot(ia,eta,'-','LineWidth',1.1);
152 - hold on
153 - plot(ia2,eta2,'r-','LineWidth',1.1);
154 - hold off
155 - xlim([min(ia) max(ia)])
156 - ylim([min(eta2) max(eta)])
157 - title(['\eta_U(I)']);
158 - ylabel('\eta_U[%]');
159 - xlabel('I[A]');
160 - grid on;
161
162 % figure(400)
163 % plot(ia2,umitt2,'rs-');
164 % xlim([min(ia) max(ia)])
165 % title(['U_m_i_t_t_e_l(I)']);
166 % ylabel('U_m_i_t_t_e_l[V]');
167 % xlabel('I[A]');
168 % grid on;
169 % figure(500)
170 % plot(ia2,tmitt2,'rs-');
171 % xlim([min(ia) max(ia)])
172 % title(['T_m_i_t_t_e_l(I)']);
173 % ylabel('T_m_i_t_t_e_l[°C]');
174 % xlabel('I[A]');
175 % grid on;
176
177 - ia=transpose(ia);
178 - umitt=transpose(umitt);
179 - tmitt=transpose(tmitt);
180 - xlswrite(exceldatei,[ia,umitt,tmitt],1)

```

```

181 - fprintf('Exceldatei: %s.xlsx im Matlab Ordner\n',exceldatei);
182 - fprintf('1.Blatt:\n');
183 - fprintf('1.Spalte: Stromwerte\n');
184 - fprintf('2.Spalte: mittlere Spannungswerte\n');
185 - fprintf('2.Spalte: mittlere Temperaturwerte\n');
186 - fprintf('2.Blatt:\n');
187 - fprintf('1.Spalte: dU/dI\n');
188 - fprintf('2.Spalte: dT/dI\n');
189 - a=umitt2(1);
190
191 % P=umitt*ia;
192 % P2=umitt2*ia2;
193 - mh2=wassmitt/(1000*22.414*60)*2;
194 - mh22=wassmitt2/(1000*22.414*60)*2;
195 - nh2=wassmitt/(1000*22.414*60);
196 - nh22=wassmitt2/(1000*22.414*60);
197 - ia=transpose(ia)
198 - etai=ia./(nh2/20*2*96485.332)*100;
199 - etai2=ia2./(nh22/20*2*96485.332)*100;
200 - ia=transpose(ia);
201 - etafc=P./(mh2*119.97*1000)*100;
202 - etafc2=P2./(mh22*119.97*1000)*100;
203
204 - figure(800)
205 - plot(ia,etai,'-','LineWidth',1.1);
206 - hold on
207 - plot(ia2,etai2,'r-','LineWidth',1.1);
208 - xlim([min(ia) max(ia2)])
209 - ylim([min(etai) max(etai2)])
210 - title(['\eta I(I)']);
211 - ylabel('\eta_I[%]');
212 - xlabel('I[A]');
213 - hold off
214 - grid on
215
216 - figure(700)
217 - plot(ia,etafc,'-','LineWidth',1.1);
218 - hold on
219 - plot(ia2,etafc2,'r-','LineWidth',1.1);
220 - xlim([min(ia) max(ia2)])
221 - title(['\eta_F_C(I)']);
222 - ylim([min(etafc) max(etafc2)])
223 - ylabel('\eta_F_C[%]');
224 - xlabel('I[A]');
225
226 - ri=diff(umitt)./diff(ia);
227 - ri2=diff(umitt2)./diff(ia2);
228
229 - l1=length(ri);
230 - l2=length(ri2);
231 - ri=ri(l1-24:l1);
232 - ri2=ri2(l2-24:l2);
233 - rii=mean(ri);
234 - rii2=mean(ri2);
235 - a=rii2;%rii
236 - hold off
237 - grid on

```

A.3. dU/dI

```

1  function uisteigung (tanfang,tende,ianfang,ischritt,iende,exceldatei,datei)
2  -   x=load(datei);
3  -   n=1;
4  -   rd=-1000;
5  -   xz=400;
6  -   xy=500;
7  -   strom=x(:,4);
8  -   for i=ianfang:ischritt:iende
9  -       a=find(abs(strom(tanfang:tende)-i)<0.001);
10 -       b=length(a);
11 -       if b>1
12 -           c=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,6);
13 -           d=x(min(a)+tanfang-1:max(a)+tanfang-1,39);
14 -           ia(n)=i;
15 -           umitt(n)=mean(c);
16 -           tmitt(n)=mean(d);
17
18
19 -           r=length(c);
20 -           rr=length(d);
21
22 -           % figure(xz)
23 -           % plot(0:1:rr-1,c,'s-')
24 -           % xlim([0 rr-1])
25 -           % title(['U(t) bei einer Stromstärke von ',num2str(i),' A']);
26 -           % ylabel('U[V]');
27 -           % xlabel('t[s]');
28 -           % grid on;
29 -           % figure(xy)
30 -           % plot(0:1:rr-1,d,'s-')
31 -           % xlim([0 rr-1])
32 -           % title(['T(t) bei einer Stromstärke von ',num2str(i),' A']);
33 -           % ylabel('T[°C]');
34 -           % xlabel('t[s]');
35
36 -           xz=xz+1;
37 -           xy=xy+1;
38 -           n=n+1;
39 -           c=0;
40 -           d=0;
41 -           a=0;
42
43 -       else
44 -           a=0;
45 -           d=0;
46 -           c=0;
47 -       end
48 -   end
49 -   umitt(20)=15.4042;
50 -   dspannung = diff(umitt)./diff(ia);
51 -   dtemp=diff(tmitt)./diff(ia);
52
53 -   t=transpose(dspannung);
54 -   tt=transpose(dtemp);
55 -   ff=length(dspannung);
56 -   xx=(ia(1):ia(ff));
57 -   xxx=(ia(2):ia(ff+1));
58
59 -   zz=transpose(xx);
60 -   zzz=transpose(xxx);

```

```

61 -   xlswrite(exceldatei,[t,tt],2);
62
63
64   % figure(200)
65   % plot(ia,umitt,'s-');
66   % xlim([min(ia) max(ia)])
67   % title(['U_m_i_t_t_e_l(I)']);
68   %   ylabel('U_m_i_t_t_e_l[V]');
69   %   xlabel('I[A]');
70   %   grid on;
71   %   figure(300)
72   %   plot(ia,tmitt,'s-');
73   %   xlim([min(ia) max(ia)])
74   %   title(['T_m_i_t_t_e_l(I)']);
75   %   ylabel('T_m_i_t_t_e_l[°C]');
76   %   xlabel('I[A]');
77   %   grid on;
78
79 -   r=length(ia);
80 -   for p=1:r-1
81 -       iaa(p)=(ia(p)+ia(p+1))/2;
82 -   end
83
84
85 -   figure(1000);
86
87
88 -   yyaxis left
89 -   plot(ia,umitt,'-', 'LineWidth',1.1)
90 -   yticks([10:1:20])
91 -   ylabel('U_m_i_t_t[V]');
92 -   ylim([10 20])
93 -   yyaxis right
94 -   plot(iaa,dspannung,'r-', 'LineWidth',1.1);
95 -   yticks([-30:3:0])
96 -   ylabel('$\bf\frac{dU}{dI}[\frac{V}{A}]$', 'interpreter', 'latex');
97 -   xlabel('I[A]')
98 -   xlim([min(ia) max(ia)])
99 -   grid on;
100
101 -   ia=transpose(ia);
102 -   umitt=transpose(umitt);
103 -   tmitt=transpose(tmitt);
104 -   xlswrite(exceldatei,[ia,umitt,tmitt],1)
105 -   fprintf('Exceldatei: %s.xlsx im Matlab Ordner\n',exceldatei);
106 -   fprintf('1.Blatt:\n');
107 -   fprintf('1.Spalte: Stromwerte\n');
108 -   fprintf('2.Spalte: mittlere Spannungswerte\n');
109 -   fprintf('2.Spalte: mittlere Temperaturwerte\n');
110 -   fprintf('2.Blatt:\n');
111 -   fprintf('1.Spalte: dU/dI\n');
112 -   fprintf('2.Spalte: dT/dI\n');

```

A.4. $U(\lambda_{H2})$

```

1  function h2konstt(tanfang,tende,manfang,mschritt,mende,exceldatei,datei)
2  -   x=load(datei);
3  -   n=1;
4  -   h2lambda=x(:,22);
5  -   for m=manfang:mschritt:mende
6  -       a=find(abs(h2lambda(tanfang:tende)-m)<0.0001);
7  -       b=length(a);
8  -       if b>=3
9  -           c=x(min(a)+tanfang-1:max(a)+tanfang-1,6);
10 -           d=x(min(a)+tanfang-1:max(a)+tanfang-1,39);
11 -           ma(n)=m;
12 -           umitt(n)=mean(c);
13 -           tmitt(n)=mean(d);
14 -           n=n+1;
15 -       end
16 -   end
17 -   dspannung = diff(umitt)./diff(ma);
18 -   dtemp=diff(tmitt)./diff(ma);
19
20 -   t=transpose(dspannung);
21 -   tt=transpose(dtemp);
22 -   xlswrite(exceldatei,[t,tt]);
23 -   xlswrite(exceldatei,'Spannungssteigung in Spalte A',1,'D1');
24 -   xlswrite(exceldatei,'Temperatursteigung in Spalte B',1,'D2');
25
26 -   figure(200)
27 -   plot(ma,umitt,'o-')
28 -   xlim([min(ma) max(ma)])
29 -   title(['U_m_i_t_t_e_l(m_H_2)']);
30 -   ylabel('U_m_i_t_t_e_l[V]');
31 -   xlabel('m_H_2[Nml/min]');
32 -   figure(300)
33 -   plot(ma,tmitt,'o-')
34 -   xlim([min(ma) max(ma)])%T(t)
35 -   title(['T_m_i_t_t_e_l(m_H_2)']);
36 -   ylabel('T_m_i_t_t_e_l[°C]');
37 -   xlabel('m_H_2[Nml/min]');
38
39
40 -   ma=transpose(ma);
41 -   umitt=transpose(umitt);
42 -   tmitt=transpose(tmitt);
43 -   xlswrite(exceldatei,[ma,umitt,tmitt],1)
44 -   fprintf('Exceldatei: %s.xlsx im Matlab Ordner\n',exceldatei);
45 -   fprintf('1.Blatt:\n');
46 -   fprintf('1.Spalte: Stromwerte\n');
47 -   fprintf('2.Spalte: mittlere Spannungswerte\n');
48 -   fprintf('2.Spalte: mittlere Temperaturwerte\n');
49 -   fprintf('2.Blatt:\n');
50 -   fprintf('1.Spalte: dU/dI\n');
51 -   fprintf('2.Spalte: dT/dI\n');

```

A.5. $U(\lambda_{N_2})$

```

1  function umitt=stickstoffkonst(tanfang,tende,ianfang,ischritt,iende,datei)
2  -   x=load(datei);
3  -   etaH=1;
4  -   etarev=0.8296;
5  -   etau=140/500;
6  -   etaI=1*20/(2*94685.3*3.718*10e-4);
7  -   n=1;
8  -   rd=-1000;
9  -   xz=400;
10 -   xy=500;
11
12 -   stick=x(:,25);
13 -   wass=x(:,21)
14 -   for i=ianfang:ischritt:iende
15 -       a=find(abs(stick(tanfang:tende)-i)<3);
16
17 -       b=length(a);
18 -       if b>1
19 -           c=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,6);
20 -           d=x(min(a)+tanfang-1:max(a)+tanfang-1,39);
21 -           ia(n)=i/wass(tanfang);
22 -           umitt(n)=mean(c);
23 -           tmitt(n)=mean(d);
24
25 -           r=length(c);
26 -           rr=length(d);
27
28 -           % figure(xz)
29 -           % plot(0:r-1,c,'-')
30 -           % xlim([0 r-1])
31 -           % title(['U(t) bei \lambda_{N_2}=',num2str(ia(n))]);
32 -           % ylabel('U[V]');
33 -           % xlabel('t[s]');
34 -           % grid on;
35 -           % figure(xy)
36 -           % plot(0:rr-1,d,'s-')
37 -           % xlim([0 rr-1])
38 -           % title(['T(t) bei \lambda_{N_2} von ',num2str(ia(n))]);
39 -           % ylabel('T[°C]');
40 -           % xlabel('t[s]');
41 -           % grid on;
42
43
44 -           xz=xz+1;
45 -           xy=xy+1;
46
47 -           n=n+1;
48 -           c=0;
49 -           d=0;
50 -           a=0;
51 -       else
52 -           a=0;
53 -           d=0;
54 -           c=0;
55 -       end
56 -   end
57
58 -   ia=transpose(ia);

```

```
61 - figure(200)
62 - plot(ia,umitt,'-', 'LineWidth',1.1);
63 - ax=gca;
64 - ax.XAxis.TickLabelFormat='%,.1f';
65 - ax.YAxis.TickLabelFormat='%,.1f';
66 - ymin=min(umitt)-0.2;
67 - ymax=max(umitt)+0.2;
68 - xlim([min(ia) max(ia)])
69 - %ylim ([13.8 15.0])
70 - title(['U_m_i_t_t_e_l(V)']);
71 - ylabel('U_m_i_t_t_e_l[V]');
72 - xlabel('\lambda_N_2[Nml/min]');
73 - grid on;
74 - figure(300)
75 - plot(ia,tmitt,'-', 'LineWidth',1.1);
76 - xlim([min(ia) max(ia)])
77 - ylim([22 28])
78 - title(['T_m_i_t_t_e_l(I)']);
79 - ylabel('T_m_i_t_t_e_l[°C]');
80 - xlabel('\lambda_N_2[Nml/min]');
81 - grid on;
82 - umitt=transpose(umitt);
83 - etaU=umitt/20*(-2*94685.3)/(-237.138*1000);
84 - etages=etaU*etau*etaH*etarev*etaI;
```

A.6. U(P_{Lüfter})

```

1  function lueftkonst(tanfang,tende,lanfang,lschritt,lende,exceldatei,datei)
2  - x=load(datei);
3  - xz=400;
4  - xy=500;
5  - n=1;
6  - lueft=x(:,40);
7  - for l=lanfang:lschritt:lende
8  -     a=find(abs(lueft(tanfang:tende)-l)<0.1);
9  -     b=length(a);
10 -     if b>2
11 -         c=x(min(a)+tanfang-1:max(a)+tanfang-1,6);
12 -         d=x(min(a)+tanfang-1:max(a)+tanfang-1,39);
13 -         la(n)=1;
14 -         umitt(n)=mean(c);
15 -         tmitt(n)=mean(d);
16 -         r=length(c);
17 -         rr=length(d);
18 -     figure(xz)
19 -     plot(0:l:r-1,c,'s-')
20 -     xlim([0 r-1])
21 -     title(['U(t) bei einer Lüfterleistung von ',num2str(l),' %']);
22 -     ylabel('U[V]');
23 -     xlabel('t[s]');
24 -     grid on;
25 -     % figure(xy)
26 -     % plot(0:l:rr-1,d,'s-')
27 -     % xlim([0 rr-1])
28 -     % title(['T(t) bei einer Lüfterleistung von ',num2str(l),' %']);
29 -     % ylabel('T[°C]');
30 -     % -----
31 -     % -----
32 -     xz=xz+1;
33 -     xy=xy+1;
34 -     n=n+1;
35 -     c=0;
36 -     d=0;
37 -     a=0;
38 -     else
39 -         a=0;
40 -         d=0;
41 -         c=0;
42 -     end
43 - end
44 - dspannung = diff(umitt)./diff(la);
45 - dtemp=diff(tmitt)./diff(la);
46 -
47 - t=transpose(dspannung);
48 - tt=transpose(dtemp);
49 - xlswrite(exceldatei,[t,tt]);
50 - xlswrite(exceldatei,'Spannungssteigung in Spalte A',1,'D1');
51 - xlswrite(exceldatei,'Temperatursteigung in Spalte B',1,'D2');
52 -
53 - figure(200)
54 - plot(la,umitt,'s-')
55 - xlim([min(la) max(la)])
56 - title(['U_m_i_t_t_e_l(P_L_ü_f_t_e_r)']);
57 - ylabel('U_m_i_t_t_e_l[V]');
58 - xlabel('P_L_ü_f_t_e_r[%]');
59 - grid on;
60 - figure(300)

```

```
61 -     plot(la,tmitt,'s-')
62 -     xlim([min(la) max(la)])
63 -     title(['T_m_i_t_t_e_l(P_L_ü_f_t_e_r)']);
64 - ylabel('T_m_i_t_t_e_l[°C]');
65 - xlabel('P_L_ü_f_t_e_r[%]');
66 -     grid on;
```

A.7. Zeitverläufe

```
1 function zeitverlauf(was,tanfang,tende,datei)
2 x=load(datei);
3 xz=0;
4 switch was
5     case 'U'
6         zaehler=6;
7         einheit='V';
8     case 'T'
9         zaehler=39;
10        einheit='°C';
11    case 'L'
12        zaehler=40;
13        einheit='s';
14    case 'P'
15        zaehler=7;
16        einheit='W';
17    case 'etafc'
18        zaehler=7;
19        zaehler2=20;
20        einheit='s';
21        xz=1;
22    case 'etau'
23        zaehler=6;
24        xz=2;
25        einheit='s';
26 end
27 spannung=x(tanfang:tende,zaehler)
28
29 if xz ==1
30     spannung=0;
31     mh2=x(tanfang:tende,zaehler2)/(1000*22.414*60)*2;
32     spannung=x(tanfang:tende,zaehler)./(mh2*119.97*1000)*100;
33     was='\eta_F_C';
34 else if xz==2
35     etafu=spannung./(20*1.23)*100;
36     spannung=etafu;
37     was='\eta_U';
38 end
39 end
40 lang=length(spannung)
41 zeit=0:1:tende-tanfang;
42 figure(1)
43 plot(zeit,spannung,'s-','LineWidth',1.1)
44 hold on
45 plot([3,3],[max(spannung),min(spannung)],'r','LineWidth',1.1)
46 xlim([0 lang-1])
47 ylim([min(spannung),max(spannung)])
48 title([was,'(t)']);
49 ylabel([was,'[',einheit,']']);
50 xlabel('t[s]');
51
52 grid on;
```

A.8. Wirkungsgrade

```

1  function a= etaeins(tanfang,tende,ianfang,ischritt,iende,datei,groesse)
2  x=load(datei);
3  n=1;
4  rd=-1000;
5  xz=400;
6  xy=500;
7  if groesse=='I'
8      spalte=4;
9      titel='I';
10     einheit='A';
11 else if groesse=='mH2'
12     spalte=22;
13     titel='\lambda_H_{_2}';
14     einheit=' ';
15 else if groesse=='mN2'
16     spalte=26;
17     titel='\lambda_N_{_2}';
18     einheit=' ';
19     end
20 end
21 end
22
23
24 strom=x(:,spalte);
25 for i=ianfang:ischritt:iende
26     a=find(abs(strom(tanfang:tende)-i)<0.001);
27     b=length(a);
28     if b>1
29         fg=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,4);
30         c=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,6);
31         u=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,20);
32         v=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,7);
33         d=x(min(a)+tanfang-1:max(a)+tanfang-1,39);
34         ia(n)=i;
35         umitt(n)=mean(c);
36         wassmitt(n)=mean(u);
37         tmitt(n)=mean(d);
38         P(n)=mean(v);
39         imitt(n)=mean(fg)
40
41
42         r=length(c);
43         rr=length(d);
44         xz=xz+1;
45         xy=xy+1;
46         n=n+1;
47         c=0;
48         u=0;
49         v=0;
50         d=0;
51         a=0;
52         fg=0;
53
54     else
55         a=0;
56         u=0;
57         v=0;

```

```

58 -         d=0;
59 -         c=0;
60 -         fg=0;
61 -     end
62 - end
63 - % umitt(20)=15.4042;
64 - % tmitt(20)=24.94;
65 -
66 -
67 -
68 -
69 -
70 -
71 - ll=length(umitt);
72 -
73 - figure(200)
74 - plot(ia,umitt,'-', 'LineWidth',1.1);
75 -
76 - xlim([min(ia) max(ia)])
77 - % ylim([min(umitt2(3:12)) max(umitt)])
78 - title(['U_m_i_t_t_e_l(',titel,')']);
79 - ylabel('U_m_i_t_t_e_l[V]');
80 - xlabel([titel,'[',einheit,']']);
81 - grid on;
82 -
83 -
84 -
85 - figure(300)
86 - plot(ia,tmitt,'-', 'LineWidth',1.1);
88 - xlim([min(ia) max(ia)])
89 - title(['T_m_i_t_t_e_l(I)']);
90 - ylabel('T_m_i_t_t_e_l[°C]');
91 - xlabel('I[A]');
92 - grid on;
93 -
94 - eta=umitt/20/1.23*100;
95 -
96 - figure(400)
97 - plot(ia,eta,'-', 'LineWidth',1.1);
98 -
99 - xlim([min(ia) max(ia)])
100 - % ylim([min(eta2) max(eta)])
101 - title(['\eta_U(',titel,')']);
102 - ylabel('\eta_U[%]');
103 - xlabel([titel,'[',einheit,']']);
104 - grid on;
105 -
106 -
107 -
108 - ia=transpose(ia);
109 - umitt=transpose(umitt);
110 - tmitt=transpose(tmitt);
111 -
112 - mh2=wassmitt/(1000*22.414*60)*2;
113 -
114 - nh2=wassmitt/(1000*22.414*60);
115 -
116 - ia=transpose(ia)
117 - etai=ia./(nh2/20*2*96485.332)*100;

```

```

118
119 -   ia=transpose(ia);
120 -   etafc=P./(mh2*141.8*1000)*100;
121
122   % etafc(20)=57.93;
123   % etai(20)=etai(21);
124
125 -   figure(800)
126 -   plot(ia,etai,'-','LineWidth',1.1);
127 -   xlim([min(ia) max(ia)])
128   % ylim([min(etai) max(etai2)])
129 -   title(['\eta_I(',titel,')']);
130 -   ylabel('\eta_I[%]');
131 -   xlabel([titel,[' ',einheit,']']);
132 -   grid on;
133
134 -   figure(700)
135 -   plot(ia,etafc,'-','LineWidth',1.1);
136
137 -   xlim([min(ia) max(ia)])
138 -   title(['\eta_F_C(',titel,')']);
139 -   ylim([min(etafc) 55])
140 -   ylabel('\eta_F_C[%]');
141 -   xlabel([titel,[' ',einheit,']']);
142
143 -   ri=diff(umitt)./diff(ia);
144
145
146 -   l1=length(ri);
147
148 -   finder=find(abs(ia-1)<0.001);
149
150
151 -   grid on
152
153
154 -   mh2=wassmitt/(1000*22.414*60)*2;
155
156 -   nh2=wassmitt/(1000*22.414*60);
157
158
159 -   etai=imitt./(nh2/20*2*96485.332)*100;
160
161
162 -   figure(701)
163 -   plot(ia,etai,'-','LineWidth',1.1);
164
165 -   xlim([min(ia) max(ia)])
166 -   title(['\eta_I(',titel,')']);
167 -   ylim([0 100])
168 -   ylabel('\eta_I[%]');
169 -   xlabel([titel,[' ',einheit,']']);
170 -   a=mean(imitt);
171 -   grid on

```

A.9. Wirkungsgrade Vergleich

```

1   function a= eta(tanfang,tende,tanfang2,tende2,tanfang3,tende3,ianfang,
2   ischritt,iende,exceldatei,datei,datei2,datei3)
3   x=load(datei);
4   n=1;
5   rd=-1000;
6   xz=400;
7   xy=500;
8   strom=x(:,4);
9   for i=ianfang:ischritt:iende
10  a=find(abs(strom(tanfang:tende)-i)<0.001);
11  b=length(a);
12  if b>1
13  c=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,6);
14  u=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,20);
15  v=x(tanfang+min(a)-1:max(a)+tanfang-1,7);
16  d=x(min(a)+tanfang-1:max(a)+tanfang-1,39);
17  ia(n)=i;
18  umitt(n)=mean(c);
19  wassmitt(n)=mean(u);
20  tmitt(n)=mean(d);
21  P(n)=mean(v);
22
23
24  r=length(c);
25  rr=length(d);
26  xz=xz+1;
27  xy=xy+1;
28  n=n+1;
29  c=0;
30  u=0;
31  v=0;
32  d=0;
33  a=0;
34
35  else
36  a=0;
37  u=0;
38  v=0;
39  d=0;
40  c=0;
41  end
42 end
43 umitt(20)=15.4042;
44 tmitt(20)=24.94;
45
46
47 x=load(datei2);
48 strom=x(:,4);
49 for i=ianfang:ischritt:iende
50 a=find(abs(strom(tanfang2:tende2)-i)<0.001);
51 b=length(a);
52 if b>1
53 c=x(tanfang2+min(a)-1:max(a)+tanfang2-1,6);
54 u=x(tanfang2+min(a)-1:max(a)+tanfang2-1,20);
55 d=x(min(a)+tanfang2-1:max(a)+tanfang2-1,39);
56 v=x(tanfang2+min(a)-1:max(a)+tanfang2-1,7);
57 ia2(n)=i;
58 umitt2(n)=mean(c);
59 wassmitt2(n)=mean(u);
60 tmitt2(n)=mean(d);

```

```

61 -         P2(n)=mean(v);
62
63 -         r2=length(c);
64 -         rr2=length(d);
65
66
67
68
69
70 -         xz=xz+1;
71 -         xy=xy+1;
72 -         n=n+1;
73 -         c=0;
74 -         u=0;
75 -         v=0;
76 -         d=0;
77 -         a=0;
78
79 -     else
80 -         a=0;
81 -         d=0;
82 -         u=0;
83 -         v=0;
84 -         c=0;
85 -     end
86 - end
87
88 - x=load(datei3);
89 - strom=x(:,4);
90 -     for i=ianfang:ischritt:iende
91 -         a=find(abs(strom(tanfang3:tende3)-i)<0.001);
92 -         b=length(a);
93 -         if b>1
94 -             c=x(tanfang3+min(a)-1:max(a)+tanfang3-1,6);
95 -             u=x(tanfang3+min(a)-1:max(a)+tanfang3-1,20);
96 -             d=x(min(a)+tanfang3-1:max(a)+tanfang3-1,39);
97 -             v=x(tanfang3+min(a)-1:max(a)+tanfang3-1,7);
98 -             ia3(n)=i;
99 -             umitt3(n)=mean(c);
100 -            wassmitt3(n)=mean(u);
101 -            tmitt3(n)=mean(d);
102 -            P3(n)=mean(v);
103
104 -             r3=length(c);
105 -             rr3=length(d);
106
107
108
109
110 -         xz=xz+1;
111 -         xy=xy+1;
112 -         n=n+1;
113 -         c=0;
114 -         u=0;
115 -         v=0;
116 -         d=0;
117 -         a=0;
118
119 -     else
120 -         a=0;

```

```

121 -         d=0;
122 -         u=0;
123 -         v=0;
124 -         c=0;
125 -     end
126 - end
127
128 - dspannung = diff(umitt)./diff(ia);
129 - dtemp=diff(tmitt)./diff(ia);
130
131 - t=transpose(dspannung);
132 - tt=transpose(dtemp);
133 - ff=length(dspannung);
134 - xx=(ia(1):ia(ff));
135 - xxx=(ia(2):ia(ff+1));
136
137 - zz=transpose(xx);
138 - zzz=transpose(xxx);
139 - xlswrite(exceldatei,[t,tt],2);
140 - l1=length(umitt);
141 - l2=length(umitt2);
142 - l4=length(umitt3);
143
144 - figure(200)
145 - plot(ia,umitt,'-','LineWidth',1.1);
146 - hold on
147 - sucher=find(umitt2>0);
148 - sucher2=find(umitt3>0);
149 - l3=length(sucher);
150 - l5=length(sucher2);
151 - differenz=l2-l3;
152 - differenz2=l4-l5;
153 - umitt2(1:differenz)=umitt2(differenz+1);
154 - umitt3(1:differenz2)=umitt3(differenz2+1);
155 - plot(ia2,umitt2,'r-','LineWidth',1.1);
156 - plot(ia3,umitt3,'k-','LineWidth',1.1);
157 - hold off
158 - xlim([min(ia) max(ia)])
159 - % ylim([min(umitt2(3:l2)) max(umitt)])
160 - title(['U_m_i_t_t_e_l(I)']);
161 - ylabel('U_m_i_t_t_e_l[V]');
162 - xlabel('I[A]');
163 - grid on;
164
165
166
167 - figure(300)
168 - plot(ia,tmitt,'-','LineWidth',1.1);
169 - hold on
170 - l2=length(tmitt2);
171 - l4=length(tmitt3);
172 - sucher=find(tmitt2>0);
173 - sucher2=find(tmitt3>0);
174 - l3=length(sucher);
175 - l5=length(sucher2);
176 - differenz=l2-l3;
177 - differenz2=l4-l5;
178
179 - tmitt2(1:differenz)=tmitt2(differenz+1);
180 - tmitt3(1:differenz2)=tmitt3(differenz2+1);

```

```

181 -     plot(ia2,tmitt2,'r-','LineWidth',1.1);
182 -     plot(ia3,tmitt3,'k-','LineWidth',1.1);
183 -     hold off
184 -     xlim([min(ia) max(ia)])
185 -     title(['T_m_i_t_t_e_l(I)']);
186 -     ylabel('T_m_i_t_t_e_l[°C]');
187 -     xlabel('I[A]');
188 -     grid on;
189
190 -     eta=umitt/20/1.23*100;
191 -     eta2=umitt2/20/1.23*100;
192 -     eta3=umitt3/20/1.23*100;
193 -     figure(400)
194 -     plot(ia,eta,'-','LineWidth',1.1);
195 -     hold on
196 -     plot(ia2,eta2,'r-','LineWidth',1.1);
197 -     plot(ia3,eta3,'k-','LineWidth',1.1);
198 -     hold off
199 -     xlim([min(ia) max(ia)])
200 -     ylim([min(eta2) max(eta)])
201 -     title(['\eta_U(I)']);
202 -     ylabel('\eta_U[%]');
203 -     xlabel('I[A]');
204 -     grid on;
205
206
207
208 -     ia=transpose(ia);
209 -     umitt=transpose(umitt);
210 -     tmitt=transpose(tmitt);
211 -     xlswrite(exceldatei,[ia,umitt,tmitt],1)
212 -     fprintf('Exceldatei: %s.xlsx im Matlab Ordner\n',exceldatei);
213 -     fprintf('1.Blatt:\n');
214 -     fprintf('1.Spalte: Stromwerte\n');
215 -     fprintf('2.Spalte: mittlere Spannungswerte\n');
216 -     fprintf('2.Spalte: mittlere Temperaturwerte\n');
217 -     fprintf('2.Blatt:\n');
218 -     fprintf('1.Spalte: dU/dI\n');
219 -     fprintf('2.Spalte: dT/dI\n');
220 -     a=umitt2(1);
221
222 -     mh2=wassmitt/(1000*22.414*60)*2;
223 -     mh22=wassmitt2/(1000*22.414*60)*2;
224 -     mh23=wassmitt3/(1000*22.414*60)*2;
225 -     nh2=wassmitt/(1000*22.414*60);
226 -     nh22=wassmitt2/(1000*22.414*60);
227 -     nh23=wassmitt3/(1000*22.414*60);
228 -     ia=transpose(ia)
229 -     etai=ia./(nh2/20*2*96485.332)*100;
230 -     etai2=ia2./(nh22/20*2*96485.332)*100;
231 -     etai3=ia3./(nh23/20*2*96485.332)*100;
232 -     ia=transpose(ia);
233 -     etafc=P./(mh2*141.8*1000)*100;
234 -     etafc2=P2./(mh22*141.8*1000)*100;
235 -     etafc3=P3./(mh23*141.8*1000)*100;
236
237 -     etafc(20)=etafc(19);
238 -     etai(20)=etai(21);
239
240 -     figure(800)

```

```
241 - plot(ia,etai,'-','LineWidth',1.1);
242 - hold on
243 - plot(ia2,etai2,'r-','LineWidth',1.1);
244 - plot(ia3,etai3,'k-','LineWidth',1.1);
245 - xlim([min(ia) max(ia2)])
246 - % ylim([min(etai) max(etai2)])
247 - title(['\eta_I(I)']);
248 - ylabel('\eta_I[%]');
249 - xlabel('I[A]');
250 - hold off
251 - grid on
252
253 - figure(700)
254 - plot(ia,etafc,'-','LineWidth',1.1);
255 - hold on
256 - plot(ia2,etafc2,'r-','LineWidth',1.1);
257 - plot(ia3,etafc3,'k-','LineWidth',1.1);
258 - xlim([min(ia) max(ia2)])
259 - ylim([0 55])
260 - title(['\eta_F_C(I)']);
261 - % ylim([min(etafc) max(etafc2)])
262 - ylabel('\eta_F_C[%]');
263 - xlabel('I[A]');
264
265 - ri=diff(umitt)./diff(ia);
266 - ri2=diff(umitt2)./diff(ia2);
267 - ri3=diff(umitt3)./diff(ia3);
268
269 - l1=length(ri);
270 - l2=length(ri2);
271 - l3=length(ri3);
272 - ri=ri(l1-15:l1);
273 - ri2=ri2(l2-15:l2);
274 - ri3=ri3(l3-15:l3);
275 - rii=mean(ri);
276 - rii2=mean(ri2);
277 - rii3=mean(ri3);
278 - a=eta;
279 - hold off
280 - grid on
281 - fprintf('1. Messreihe blau\n');
282 - fprintf('2. Messreihe rot\n');
283 - fprintf('3. Messreihe grün\n');
```

B.

B.1. CD mit Text als .pdf-Datei

C.

C.1. Selbstständigkeitserklärung



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: _____

Vorname: _____

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

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 _____ ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original