

PRAKTIKUM DER TECHNISCHEN CHEMIE I

PRAKTIKUMSPROTOKOLL

WiSe 2015/2016

Versuch 6

Brennstoffzelle

Rami Saoudi (356563)
Guido Petri ()

Gruppe 29

1. EINFÜHRUNG

Ziel des Versuchs war es die Funktionsweise einer Brennstoffzelle genauer zu Verstehen. Dazu wurden diverse Parameter, wie zum Beispiel der Kühlerleistung oder der Stromstärke, verändert um deren Einflüsse zu untersuchen.

2. THEORIE

Der gesamte Vorgang der Stromgewinnung beruht zunächst einmal auf der sogenannten Knallgasreaktion:



Durch eine räumliche Trennung der Oxidation und der Reduktion kann die frei werdende Energie in elektrische Energie umgewandelt werden. Dabei wird Sauerstoff an der Kathode katalytisch reduziert und Wasserstoff an der Anode katalytisch oxidiert.



Um die frei werdende Energie zu nutzen werden die beiden Kammern zum einen über einen äußeren Stromkreis verbunden und zum anderen durch eine kationendurchlässige Membran getrennt, so genannten *Membran Elektroden Einheiten (MEA)* (siehe Abbildung 1). Mehrerer solcher Einheiten hintereinander geschaltet nennt man *Stacks*. Die hier verwendete Brennstoffzelle nennt sich PEMFC (*engl. Proton Exchange Membran Fuel Cell*).

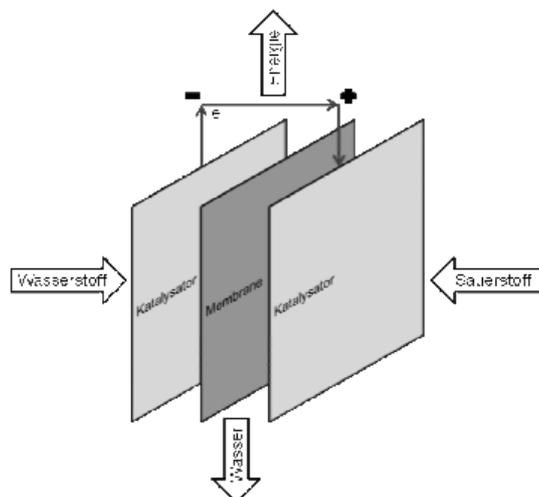


Abbildung 1 Skizze einer MEA

Der Vorgang der Knallgasreaktion kann auch umgekehrt werden. Dazu wird Wasser katalytisch elektrolysiert und man erhält wieder Wasserstoff und Sauerstoff.

Bei Abnehmender Konzentration der Reaktanten nimmt auch die Spannung der Brennstoffzelle ab. Den Zusammenhang hierzu beschreibt die folgende Gleichung:

$$U = U_0 - \frac{R * T}{z * F} * \ln(Q) \quad \text{mit } Q \approx \prod_i c_i^{v_i}$$

Sind alle Edukte in ihrer Standardkonzentration, so ist die Spannung der Brennstoffzelle gleich der Standardzellspannung U_0 .

3. EXPERIMENT

(1) H₂/Luft Brennstoffzellentestsystem

A) AUFBAU

Das Brennstoffzellenmodul besitzt ein Brennstoffzellenstack mit 10 in Serie geschalteten MEA's. Über den Wasserstoffspeicher wird der Reaktion Wasserstoff zugeführt. Der Sauerstoff wird aus der Luft gewonnen und wird über den Kühler zugeführt. Der Aufbau erhält zudem eine elektronische Last, ein regelbarer Widerstand mit dem die Stromstärke reguliert werden kann. Zudem enthält der Aufbau noch einen Spannungswandler der bei einer Eingangsspannung von 2 bis 10 Volt eine konstante Ausgangsspannung von 12 V liefert. Dazu ist als Verbraucher ein Ampelmodul geschaltet um die Funktionsweise eines realen 12 V Verbrauchers zu verdeutlichen.

B) DURCHFÜHRUNG

Zuerst sollte die U-I-Kennlinie der Brennstoffzelle aufgenommen werden. Dafür wurde zunächst das Brennstoffzellenstack, durch eine Belastung von 5 Ampere und durch das Runterfahren des Kühlers, auf seine Betriebstemperatur von 40 °C gebracht. Dann wurde der Kühler wieder auf ‚Auto‘ gestellt und die Spannung (U_{stack}) bei gleichmäßig verteilten Stromstärken von 0 bis 10 Ampere gemessen. Der Versuch wurde bei einer Kühlereinstellung von ‚6 %‘ wiederholt um den Einfluss der Sauerstoffzufuhr zu erfassen.

Anschließend sollte der Einfluss des Innenwiderstands auf die U-I-Kennlinie erfasst werden. Dazu wurde zusätzlich ein Spannungsmessgerät an den Ausgang des Brennstoffzellenmoduls angeschlossen. Das Brennstoffzellenstack wurde wieder auf seine

Betriebstemperatur gebracht und die Spannung des Stacks (U_{Stack}) und des Spannungsmessgeräts (U_{Klemm}) bei verschiedenen Stromstärken (0 - 10 A) gemessen

Als nächstes sollte die Wasserstoff-Strom-Kennlinie aufgenommen werden. Hierzu wurde äquivalent zu den zuvor durchgeführten Versuchen vorgegangen, nur wurde nun anstatt der Spannung, der Volumenstrom von Wasserstoff gegen die Stromstärke erfasst.

Zuletzt sollte die Nutzung des Brennstoffzellenmoduls, durch das anschließen einer Ampel, bewiesen werden. Dazu wurde zunächst der Aufbau verändert. Die externe Stromversorgung des Brennstoffzellenmoduls (zum Betreiben der Anzeigen, Lüfter, etc.) wurde entfernt. Der Spannungswandler wurde mit dem mitgelieferten 3-poligen Kabel mit der 12V – Buchse des Brennstoffzellenmoduls verbunden. Dieses wurde mit zwei kurzen Messleitungen mit der elektronischen Last verbunden. Über zwei Laborleitungen wurde der Nutzleistungsausgang des Spannungswandlers mit dem Ampelmodul verbunden. Der Kippschalter auf der Frontplatte des Ampelmodus wurde auf Mittelstellung gebracht. Nachdem das Stack auf seine Betriebstemperatur gebracht wurde, sollte P_{Eigen} (Eigenbedarf der Brennstoffzelle) und P_{Nutz} (Nutzleistung der Ampel) bei den vier verschiedenen Ampelphasen abgelesen werden.

C) WERTE

Folgende Werte wurden bei den vier Versuchen ermittelt:

Tabelle 1

Messwerte für die U-I-Kennlinie bei 'Auto' Lüfter	
<u>I (Stack) [A]</u>	<u>U (Stack) [V]</u>
0,11	9,01
0,24	8,74
0,51	8,44
1,00	8,12
1,51	7,85
2,03	7,64
3,01	7,23
5,02	6,81
7,01	6,07
9,97	5,37

Tabelle 2

Messwerte für die U-I-Kennlinie bei 6 % Lüfter	
<u>I (Stack) [A]</u>	<u>U (Stack) [V]</u>
0,11	9,07
0,24	8,82
0,51	8,48
1,00	8,14
1,51	7,85
1,95	7,64
2,97	7,23
4,98	6,37
6,01	6,11
6,53	5,90
6,69	5,81
6,89	5,69
7,13	5,58
7,41	5,29

Tabelle 3

Messwerte für den Einfluss des Innenwiderstandes		
<u>I (Stack) [A]</u>	<u>U (Stack) [V]</u>	<u>U (Klemm)[V]</u>
0,12	9,45	9,00
0,24	8,78	8,73
0,48	8,50	8,45
1,03	8,12	8,09
1,51	7,91	7,86
1,99	7,70	7,66
2,97	7,36	7,29
4,98	6,70	6,60
6,01	6,37	6,28
6,98	6,11	5,99
8,00	5,96	5,81
10,01	5,39	5,24

Tabelle 4

Messwerte für die Wasserstoff-Strom-Kennlinie	
<u>I (Stack) [A]</u>	<u>V (H2) [ml/min]</u>
0,11	16
1,03	78
2,03	148
3,01	218
4,02	291
5,02	363
6,01	436
7,01	509
8,00	582
9,00	653
9,97	724

Tabelle 5

Messwerte für den Ampelversuch		
<u>Ampelphase</u>	<u>P (Eigen) [W]</u>	<u>P (Nutz) [W]</u>
Grün		2,50
Gelb		4,50
Rot		3,40
Rot-Gelb	5,74	8,60

Für den Ampelversuch war es aufgrund sehr schnell variierenden Werten nicht möglich die P_{Eigen} -Werte der Ampelphasen Grün, Gelb und Rot zu ermitteln.

(2) Elektrolyse – Brennstoffzellensystem

A) AUFBAU

Über ein Solarmodul, das mit einer Lampe bestrahlt wird, wird der Elektrolyseur mit Strom versorgt. Der Elektrolyseur besteht aus einer Protonendurchlässigen Membran die sich zwischen zwei Elektroden befindet. Beide Elektroden sind mit destilliertem Wasser umgeben. Daran angeschlossen ist ein Brennstoffzellenmodul, das die erzeugten Knallgase wieder in elektrische Energie umwandeln kann. Zudem existieren noch ein regelbarer Ohm'scher Widerstand, ein Voltmeter und ein Amperemeter. Die vorhandenen Bauteile wurden einmal in Reihenschaltung (Abbildung 2) und Parallelschaltung (Abbildung 3) aufgebaut.

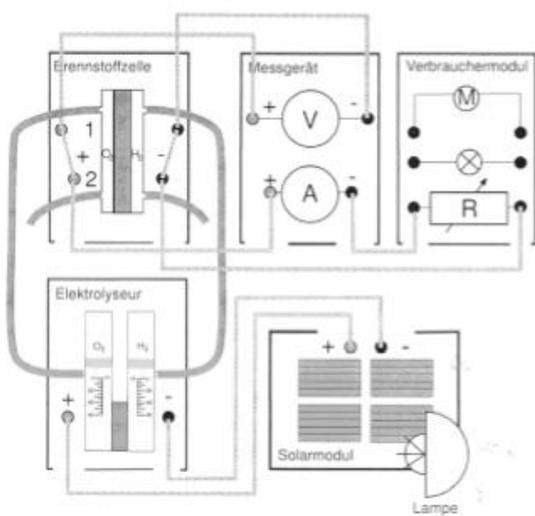


Abbildung 2 Reihenschaltung

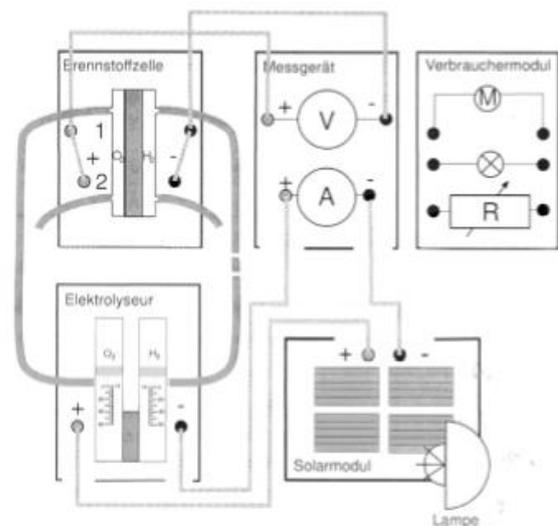


Abbildung 3 Parallelschaltung

Die Lampe wurde jeweils so ausgerichtet, dass sich ein Strom zwischen 700 mA und 900 mA einstellte und eine deutliche Gasentwicklung zu erkennen war.

B) DURCHFÜHRUNG

Da in den vorherigen Versuchen bereits die Messungen mit einer Reihenschaltung durchgeführt wurden, wurde die Reihenschaltung in diesem Versuch nur dazu verwendet die Lampe zu justieren.

Nachdem dies vollzogen wurde, wurde die Parallelschaltung aufgebaut, wobei die Lampe nicht bewegt wurde. Nach dem Anschalten der Lampe wurde das gesamte System 5 min lang mit den entstanden Gasen durchspült. Anschließend wurde der Wahlschalter auf 2 min lang auf 3 Ohm gestellt. Danach wurde der Wahlschalter auf „Offen“ gestellt und die beiden kurzen

Schläuche an der Brennstoffzelle mit den Schlauchklemmen geschlossen. Nachdem die Wasserstoffseite des Elektrolyseurs die 60 mL-Markierung erreicht hat, wurde die Verbindung zwischen Elektrolyseur und Solarmodul getrennt. Schließlich wurde durch Drehen des Wahlschalters, bei verschiedenen Widerständen jeweils die Stromstärke und die Spannung gemessen. Nach jedem neuen Widerstand wurde 30 s gewartet bis die Messwerte abgelesen wurden. Nach Beendigung des Messvorgangs wurde der Wahlschalter wieder auf „Offen“ gestellt und die beiden Schlauchklemmen gelöst.

C) MESSWERTE

Für die Parallelschaltung konnten folgende Werte gemessen werden:

Tabelle 6

Messwerte für den Einfluss des Innenwiderstandes			
<u>R [Ohm]</u>	<u>U [V]</u>	<u>I [mA]</u>	<u>P [mW]</u>
Offen	0,86	0	0
100	0,82	8	6,46
50	0,81	17	13,77
20	0,78	38	29,64
10	0,76	73	55,48
5	0,72	142	102,24
3	0,69	192	132,48
2	0,65	269	174,85
1	0,57	445	289,25
0,5	0,47	653	306,91
0,3	0,43	747	321,21

4. AUSWERTUNG

(1) Allgemein

Wie bereits zuvor beschrieben wird die Knallgasreaktion räumlich in eine Oxidation und eine Reduktion getrennt. An der Anode findet dabei immer die Oxidation statt. Gleicht man die beiden Reaktionen aus erkennt man, dass pro Gesamtreaktion (*Gleichung 1*) vier Elektronen umgesetzt werden. Daraus kann der Elektronentransport für 1 mol Wasser berechnet werden:

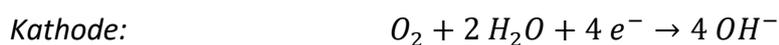
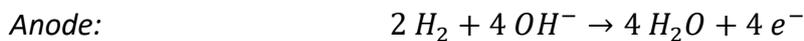
$$\text{Wasser} : \text{Elektronen} = 1 : 2$$

$$N_{e^-} = 2n_{\text{Wasser}} * N_A = 2 * 1 \text{ mol} * 6,022 * 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} = 12,044 * 10^{23}$$

Also werden $12,044 * 10^{23}$ Elektronen pro 1 mol Wasser umgesetzt.

Beim Ionendurchtritt durch das Stack entsteht Wärme bei einer steigenden Stromentnahme steigt auch der Ionendurchtritt und damit die Wärme im Stack.

Neben der hier verwendeten PEMFC-Brennstoffzelle gibt es noch diverse andere Typen. Ein Beispiel hierfür *Alkalische Brennstoffzelle* (AFC) mit den beiden Teilreaktionen:



Diese Brennstoffzelle eignet sich besonders gut für U-Boote, da diese Brennstoffzelle sehr geräuscharm ist und eine geringe Wärmeentwicklung besitzt. Dadurch wird das U-Boot schwer ortbar. ¹ Weitere mögliche Brennstoffe für die Anode sind zum Beispiel das hier verwendete KOH, Phosphorsäure oder Carbonat-Ionen.

¹ https://de.wikipedia.org/wiki/Alkalische_Brennstoffzelle 20.01.2016 17:10

(2) H₂/Luft Brennstoffzellentestsystem

Im folgendem wurden die gemessenen Spannungswerte bei einer Kühlereinstellung von ‚Auto‘ und ‚6 %‘ gegen die Stromstärke aufgetragen.

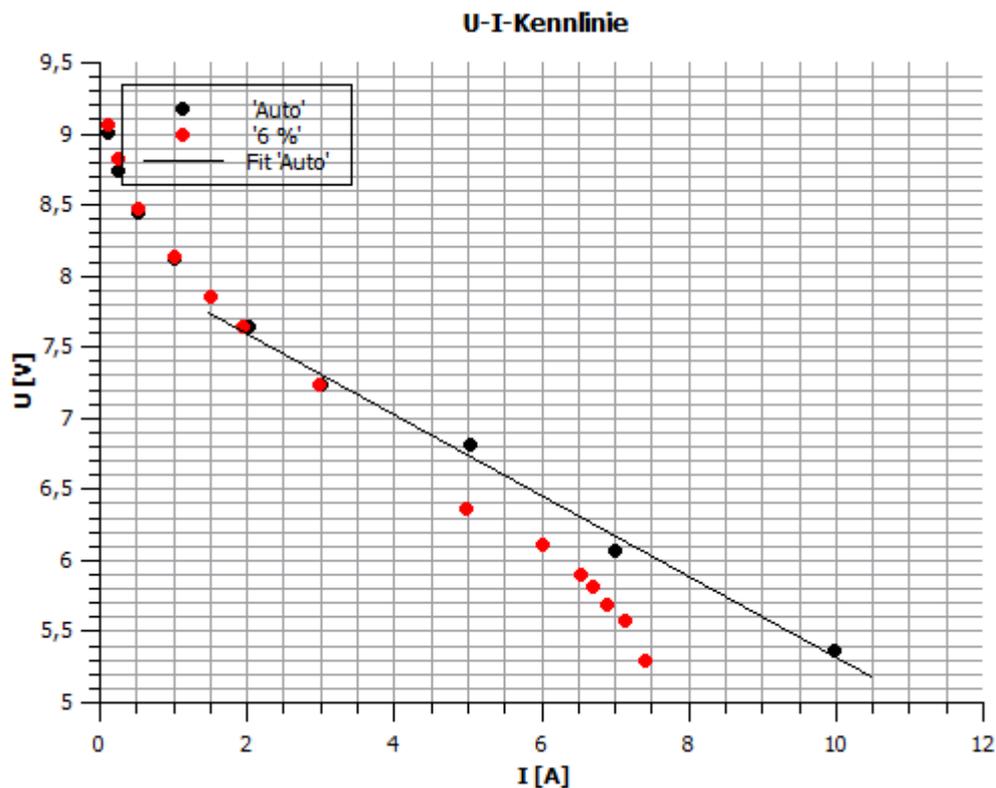


Figure 1 U-I-Kennlinie bei verschiedenen Lüftereinstellungen

Wie zu erkennen kommt es zu Beginn der Messung zu einem exponentiellen Abfall beider Graphen. Dies ist auf reaktionskinetische Effekte am Katalysator zurückzuführen. Anschließend kommt es zu einem näherungsweise linearen Abfall der Spannung bei steigender Stromstärke, was dem Ohm'schen Gesetz ($U = R \cdot I$) folgt. Bei der Kühlereinstellung ‚Auto‘ gilt dieser Abfall bis zum Ende der Messung, bei der Kühlereinstellung ‚6 %‘ ist jedoch eine exponentielle Abnahme der Spannung ab ca. 5 Ampere zu erkennen. Das liegt an der geringen Sauerstoffkonzentration an der Kathode.

Die Leistung errechnet sich aus $P = U \cdot I$. Daraus kann für jedes Wertepaar die Leistung berechnet werden. Hier eine Beispielrechnung:

$$P = U \cdot I = 0,11 \text{ A} \cdot 9,01 \text{ V} = 0,99 \text{ W}$$

Tabelle 7

Messwerte für die U-I-Kennlinie bei 'Auto' Lüfter		
<u>I (Stack) [A]</u>	<u>U (Stack) [V]</u>	<u>P [W]</u>
0,11	9,01	0,99
0,24	8,74	2,10
0,51	8,44	4,30
1,00	8,12	8,12
1,51	7,85	11,85
2,03	7,64	15,51
3,01	7,23	21,76
5,02	6,81	34,19
7,01	6,07	42,55
9,97	5,37	53,54

Tabelle 8

Messwerte für die U-I-Kennlinie bei 6 % Lüfter		
<u>I (Stack) [A]</u>	<u>U (Stack) [V]</u>	<u>P [W]</u>
0,11	9,07	1,00
0,24	8,82	2,12
0,51	8,48	4,32
1,00	8,14	8,14
1,51	7,85	11,85
1,95	7,64	14,90
2,97	7,23	21,47
4,98	6,37	31,72
6,01	6,11	36,72
6,53	5,90	38,53
6,69	5,81	38,87
6,89	5,69	39,20
7,13	5,58	39,79
7,41	5,29	39,20

Die erhalten Leistungswerte werden gegen die Stromstärke aufgetragen:

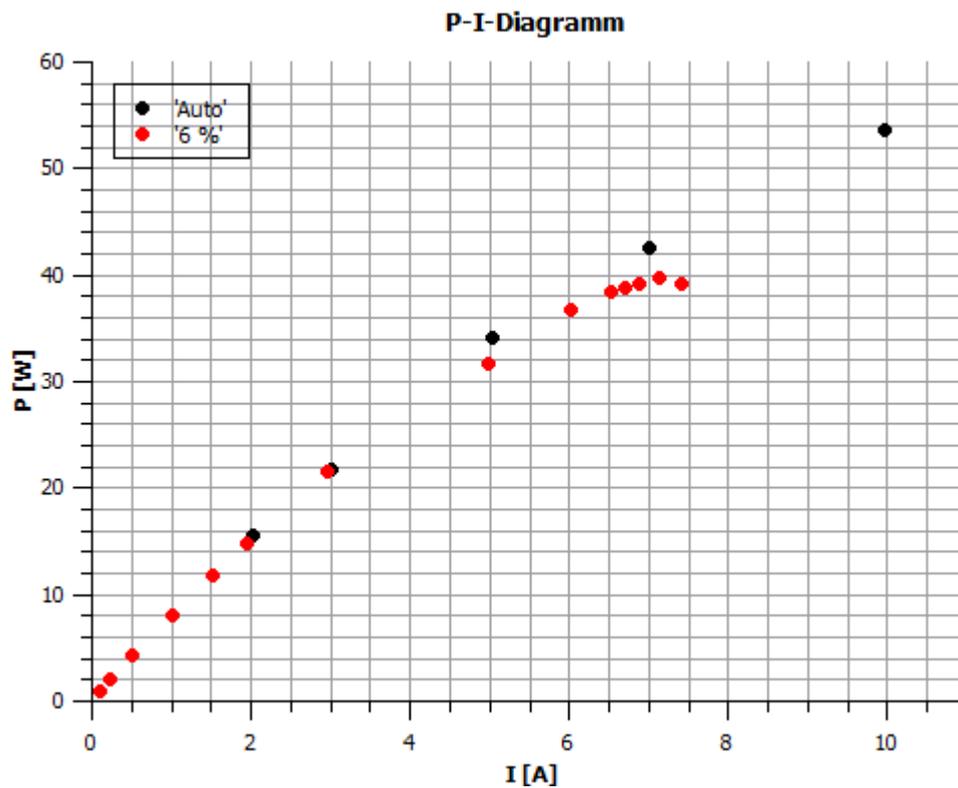


Figure 2 P-I-Kennlinien bei verschiedenen Lüftereinstellungen

Wie zusehen verhalten sich die beiden Graphen bei kleinen Stromstärken identisch. Für Brennstoffzellen mit reduzierter Luftversorgung ist bei hohen Strömen mit einem Grenzwert zu rechnen.

Der Ohm'schen Widerstand im linearen Bereich bei einer Lüftereinstellung ‚Auto‘ (Figure 1) berechnet sich folgendermaßen (Wert aus Qtiplot):

$$R = \frac{U}{I} = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right| = 0,28 \Omega$$

Möchte man den Sauerstoffvolumenstrom für ein Stack bei 10 Ampere berechnen, geht man vom Faradayschen Gesetz aus:

$$m = \frac{M * I * t}{z * F}$$

$$n = \frac{It}{zF}$$

$$\dot{n} = \frac{I}{zF} \cdot V_A$$

$$\dot{V} = \frac{I * V_A}{z * F} = \frac{10 \text{ A} * 22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol}}}{4 * 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}} = 5,80 * 10^{-4} \frac{\text{l}}{\text{s}} = 34,82 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$$

Da in unserem Beispiel aber 10 Stacks in Serie geschaltet sind und man nicht mit reinem Sauerstoff arbeitet muss der Sauerstoffstrom aber noch umgerechnet werden.

$$\dot{V}_{Luft}(10 \text{ Stacks}) = 10 * 5 * \dot{V} = 1741,20 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$$

Im folgendem werden U_{Stack} und U_{Klemm} aus Tabelle 3 gegen I_{Stack} aufgetragen.

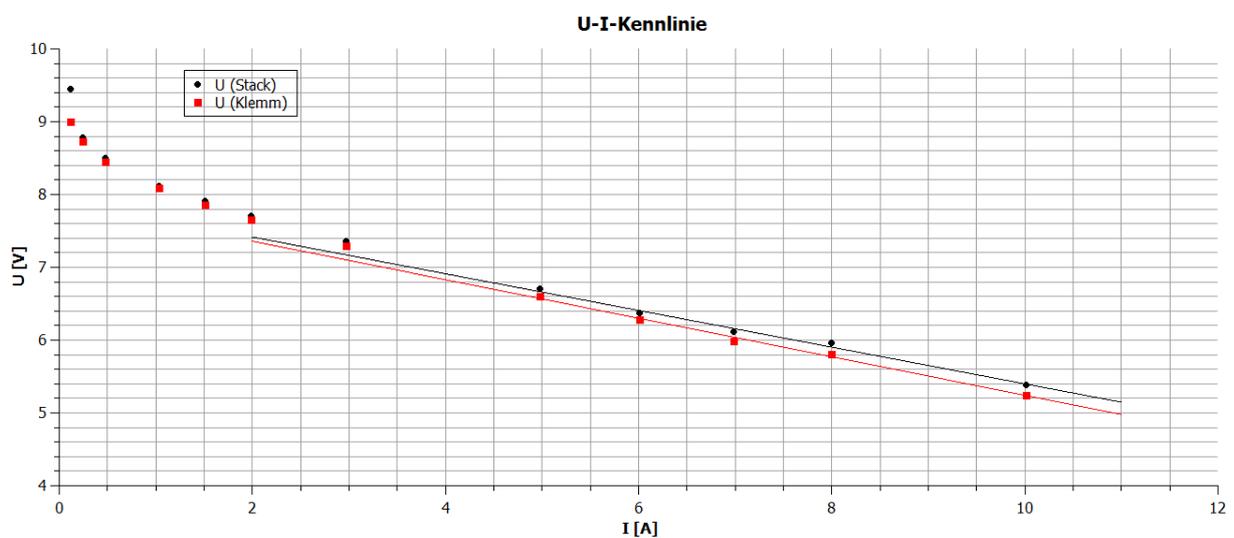


Figure 3 U-I-Kennlinie der Stackspannung und der Klemmspannung

Wie zu sehen fallen beide Graphen bis ca. 3 Ampere exponentiell ab. Anschließend fällt die Klemmspannung schnell ab als U_{Stack} . Dies liegt am Innenwiderstand der Brennstoffzelle die durch Bauteile wie Messinstrumente, Anzeigen oder Verkabelung verursacht wird.

Brennstoffzelle
FC50

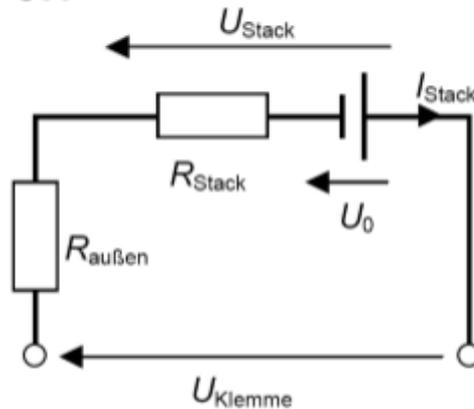


Abbildung 4 Schaltbild der Brennstoffzelle

Mit Hilfe der ermittelten Daten können nun die beiden Widerstände berechnet werden. Da es sich um eine Reihenschaltung handelt gilt:

$$R_{ges} = R_{Stack} + R_{außen}$$

$$R_{außen} = R_{ges} - R_{Stack}$$

Außerdem ist dem Schaltbild zu entnehmen:

$$R_{ges} = \frac{U_{Klemme}}{I_{Stack}} \text{ bzw. } R_{ges} = \left| \frac{\Delta U_{Klemme}}{\Delta I_{Stack}} \right|$$

$$R_{Stack} = \frac{U_{Stack}}{I_{Stack}} \text{ bzw. } R_{Stack} = \left| \frac{\Delta U_{Stack}}{\Delta I_{Stack}} \right|$$

R_{ges} und R_{Stack} lassen sich aus der Geradensteigung der U-I-Kennlinien herauslesen. Qtiplot gibt hierfür folgende Werte aus:

$$R_{ges} = 0,26 \Omega$$

$$R_{Stack} = 0,25 \Omega$$

$$\Rightarrow R_{außen} = 0,01 \Omega$$

Die Verlustleistung bei 10 Ampere beträgt:

$$\Delta U = U_{Stack} - U_{Klemm} = 5,39 \text{ V} - 5,24 \text{ V} = 0,15 \text{ V}$$

$$P_{Verlust} = \Delta U * I_{Stack} = 0,15 \text{ V} * 10 \text{ A} = 1,5 \text{ W}$$

Der Ohm'sche Widerstand lässt sich auf die Wärmeentwicklung zurückführen. Dadurch schwingen die Atomrümpfe im elektrischen Leiter stärker, was einen Elektronenfluss erschwert.

Im folgendem sind die Werte aus Tabelle 4 gegeneinander aufgetragen.

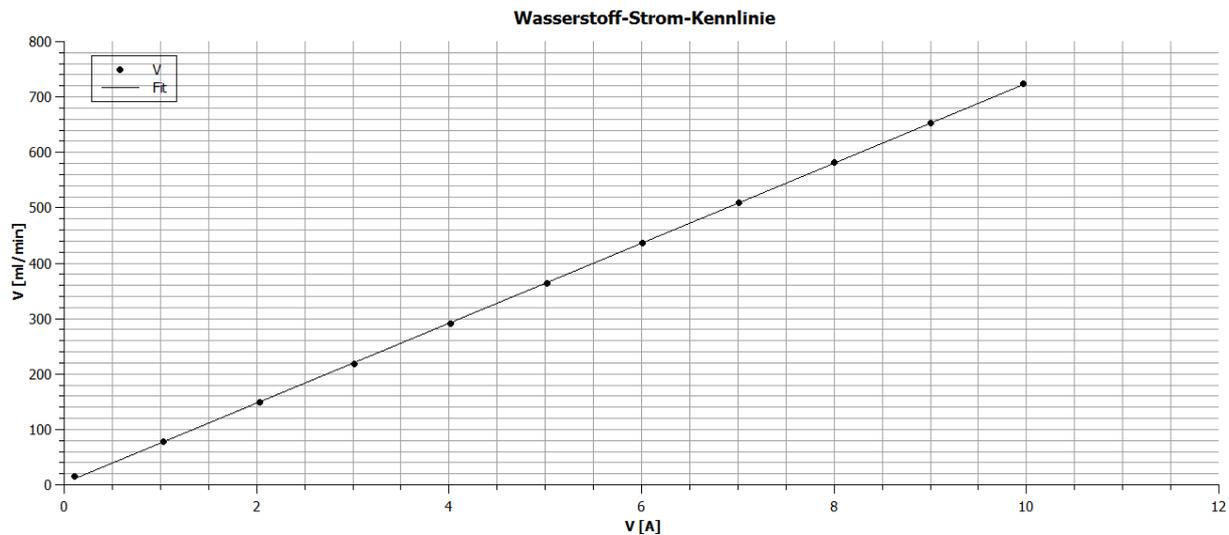


Figure 4 Volumenstrom-Stromstärke-Diagramm

Wie zuvor aus dem Faraday'schen Gesetz hergeleitet gilt:

$$\dot{V} = I * \frac{V_A}{Z * F}$$

Da es bei dem Bruch nur um Konstanten handelt ist der Volumenstrom direkt proportional zur Stromstärke. Das beweist auch der oben stehende lineare Graph. Der Volumenstrom im Leerlauf lässt sich durch undichte Schlauchübergänge erklären.

Qtiplot gibt für den Fit folgender Geradengleichung an:

$$\dot{V}_{Mess} = 72,14 \frac{ml}{min A} * I + 3,18 \frac{ml}{min}$$

Setzt man nun für die Stromstärke 1 Ampere ein so erhält man:

$$\dot{V}_{Mess} = 72,14 \frac{ml}{min A} * 1 A + 3,18 \frac{ml}{min} = 75,32 \frac{ml}{min}$$

Der theoretische Wert des Volumenstroms berechnet sich wieder aus dem Faraday'schen Gesetz.

$$\dot{V}_{Theoretisch} = \frac{I * V_A}{z * F} = \frac{1 A * 22,414 \frac{l}{mol}}{2 * 96485 \frac{C}{mol}} = 6,969 \frac{ml}{min}$$

Da das Stack aus 10 MEAs besteht ergibt sich:

$$\dot{V}_{Theoretisch}(10 MEAs) = 69,69 \frac{ml}{min}$$

Der Grund dass V_{Mess} größer ist als $V_{Theoretisch}$ ist der Selbe wie für den Volumenstrom im Leerlauf. Durch kleine Lecks im System tritt etwas Wasserstoff aus, was den Volumenstrom erhöht.

Aufgrund von stark schwankenden Werten konnte P_{Eigen} der grünen, gelben und roten Ampelphase nicht ermittelt werden (siehe Tabelle 5). Bei der Rot-Gelben Ampelphase wurde eine kleinere Eigenleistung als die Nutzleistung gemessen. Für jede Ampelphase wurde eine andere Nutzleistung ermittelt, wobei auffällt, das P_{Nutz} der Rot-Gelben Ampelphase mit Abstand am größten ist. Zu erwarten ist, dass das Stack bei der Ampelphase am effizientesten arbeitet, bei der sowohl eine hohe Nutz- wie Eigenleistung erzielt wird.

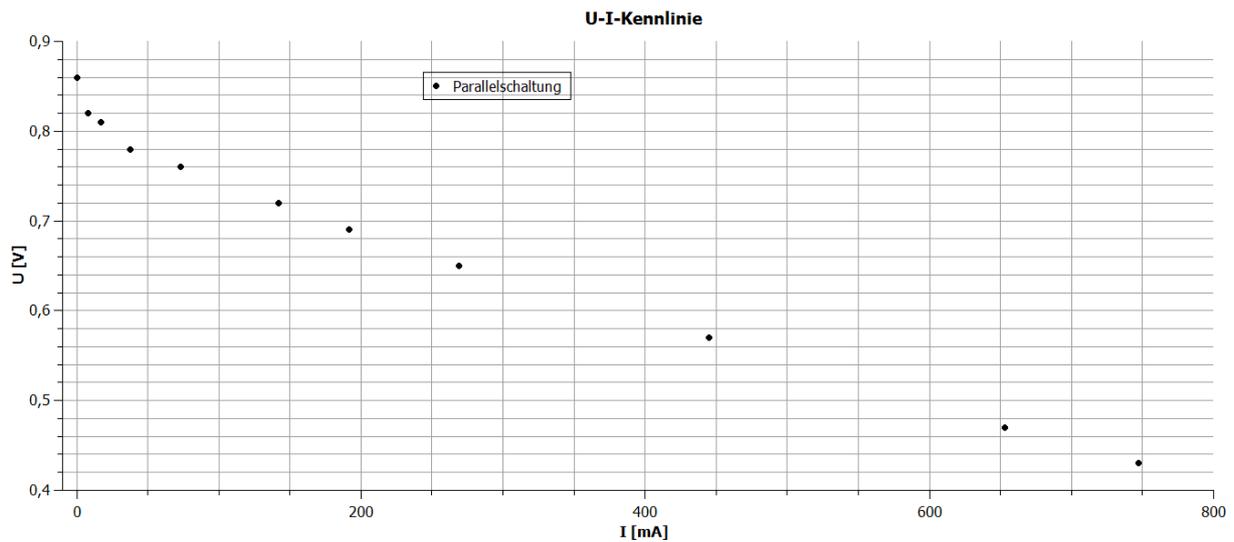


Figure 5 U-I-Kennlinie einer Parallelschaltung

Figure 5 zeigt die U-I-Kennlinie einer parallel geschalteten Brennstoffzelle. Da in diesem Versuchsteil keine Messungen an einer Reihenschaltung durchgeführt wurden, kann kein Vergleichsgraph eingetragen werden. Zu sehen ist jedoch ein sehr ähnlicher Verlauf der Kurve wie bei einer Reihenschaltung: Zu Beginn kommt es zu einem exponentiellen Abfall der Spannung. Der Graph geht anschließend in einen linearen Verlauf, welcher dem Ohm'schen Gesetz folgt, über. Zu erwarten ist, dass es bei einer Reihenschaltung zu einem schnelleren Spannungsabfall kommt, da in Serie geschaltete Widerstände sich addieren, wohingegen parallel geschaltete Widerstände sich wie folgt verhalten:

$$\frac{1}{R_{ges}} = \sum_i^n \frac{1}{R_i}$$

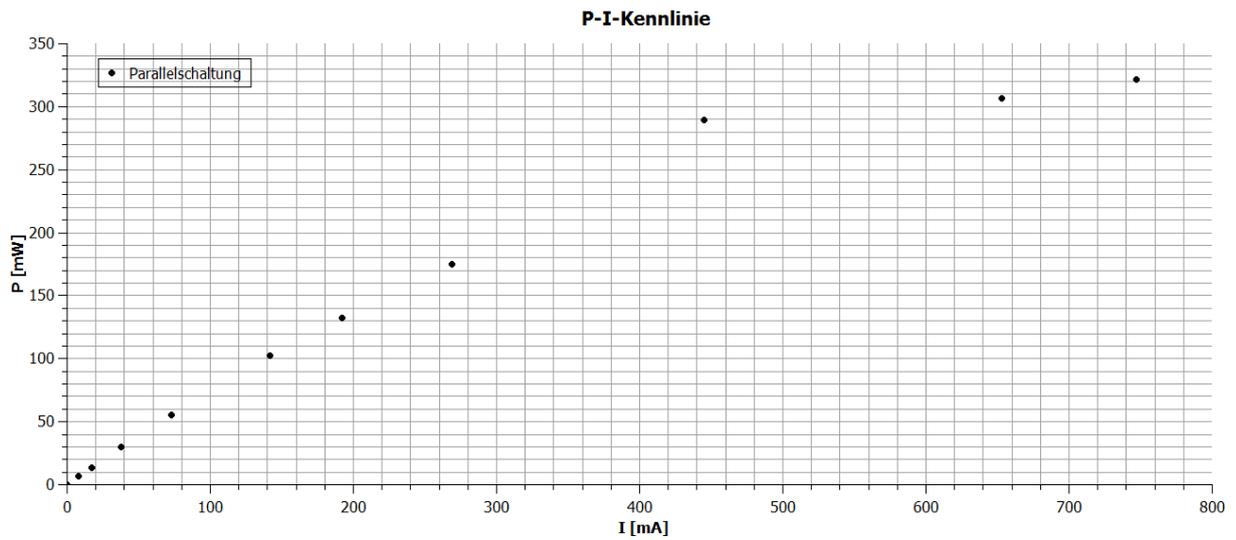


Figure 6 P-I-Kennlinie einer Parallelschaltung

Figure 5 zeigt den Zusammenhang von Leistung und Stromstärke in einer Brennstoffzelle in Parallelschaltung. Zu sehen ist das die Leistung mit einer Zunahme der Stromstärke steigt, sich jedoch einen Grenzwert annähert der in dieser Messung noch nicht erreicht wurde.

5. ZUSAMMENFASSUNG

In der folgenden Tabelle sind alle berechneten Werte zusammengefasst.

Tabelle 9, Zusammenfassung der Ergebnisse

<u>Größe</u>	<u>Wert</u>
N_e	$12,044 * 10^{23}$
R ,Auto'	0,28 Ω
$V_{\text{Luft, 10A}}$	1741,20 ml/min
R_{ges}	0,26 Ω
R_{Stack}	0,25 Ω
$R_{\text{außen}}$	0,01 Ω
$V_{\text{H}_2, 1A, \text{Mess}}$	75,32 ml/min
$V_{\text{H}_2, 1A, \text{Theoretisch}}$	69,69 ml/min

6. ZEICHENERKLÄRUNG

<u>Variable</u>	<u>Bedeutung [Einheit]</u>
z	Zahl pro Formeleinheit übertragener Elektronen (immer positiv)
n	Molmenge
F	Faradaykonstante = 96485[C/mol]
$\Delta_R G$	freie Reaktionsenthalpie [kJ/mol]
$\Delta_R G^0_{298K}$	Standartwert der freien Reaktionsenthalpie [kJ/mol]
U	Zellspannung [V]
U_0	Zellspannung unter Standartbedingungen [V]
R	Gaskonstante = 8,314 [J/(K mol)]
c_j	Konzentration der Komponente J [mol/l]
T	Temperatur [K]
R_w	Widerstand [Ω]
I	Strom [A]
eq	elektrochemisches Äquivalent
t	Zeit [s]
m	Masse [kg]
M	Molekulargewicht [g/mol]
P	Leistung [W]
Q	Ladung [C]
I_{Stack}	Stackstrom [A]
U_{Stack}	Stackspannung [V]
U_{Klemm}	Klemmspannung [V]
V_{H_2}	Wasserstoffvolumenstrom [ml/min]
ν_i	Stöchiometrischer Koeffizient der Spezies i