

Ausarbeitung zu "Brennstoffzelle"

Anfängerpraktikum Teil 2
Technische Universität München

Clara Donat, Matthias Quintern
Kurs 5, Team 7
Canio Himmelmann
Kurs 5, Team 8

27. August 2020

Einleitung

In diesem Versuch wird die Funktionsweise von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren näher untersucht. Während in einer Brennstoffzelle Wasser erzeugt und dabei Energie freigesetzt wird, muss eine Spannung an einen Elektrolyseur angelegt werden, um Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff aufzuspalten.

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	2
1.1 PEM-Brennstoffzelle	2
1.2 Elektrolyseur	2
1.3 Kennlinie einer Brennstoffzelle	2
1.3.1 Elektro-kinetischer Bereich	3
1.3.2 Ohmscher Bereich	3
1.3.3 Diffusions-kontrollierter Bereich	3
1.3.4 Gesamter Bereich	4
1.4 Faraday-Wirkungsgrad	4
1.5 Energiewirkungsgrad	4
2 Experimentelles Vorgehen	5
2.1 Charakterisierung des Elektrolyseurs	5
2.2 Wirkungsgrad des Elektrolyseurs	5
2.3 Wirkungsgrad der Brennstoffzelle	5
2.4 Kennlinie und Charakterisierung der Brennstoffzelle	5
3 Ergebnisse und Diskussion	6
3.1 Charakterisierung des Elektrolyseurs	6
3.2 Wirkungsgrad des Elektrolyseurs	6
3.3 Wirkungsgrad der Brennstoffzelle	7
3.4 Kennlinie der Brennstoffzelle	7
3.5 Charakterisierung der elektrochemischen Zelle	9
4 Anhang	10
5 Literaturverzeichnis	10

1 Grundlagen

1.1 PEM-Brennstoffzelle

Brennstoffzellen bestehen im Allgemeinen aus zwei Elektroden - der Kathode und Anode - welche aus porösem, mit Platin beschichteten Kohlenstoff aufgebaut sind. Das Edelmetall dient hierbei als Katalysator, der die Reaktion beschleunigt, ohne dabei verbraucht zu werden. Zwischen den Elektroden befindet sich noch eine sogenannte Polymerelektrolytmembran (PEM = proton exchange membrane), die nur für H^+ -Ionen durchlässig ist. Wie in folgender Abbildung sichtbar, werden die Elektroden von außen zusätzlich durch Gasflussplatten begrenzt, welche die Gasmoleküle über die gesamte Elektrodenoberfläche verteilen und das bei der chemischen Reaktion entstehende Wasser abführen sollen.

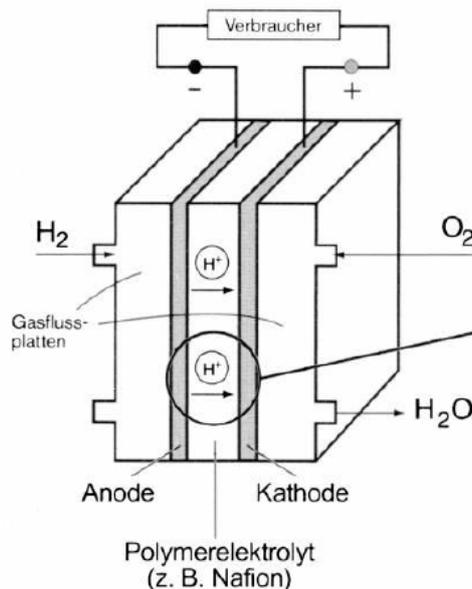


Abbildung 1: Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle [2]

Wird an der Anode nun Wasserstoff zugeführt, der hier als Brennstoff fungiert, so findet eine Oxidation statt. Die H_2 -Moleküle geben jeweils zwei Elektronen ab, die bei einem geschlossenen Stromkreis über einen Verbraucher zur Kathode geleitet werden und dort die Sauerstoffmoleküle reduzieren. Bei der Oxidation von Wasserstoff entstehen zudem H^+ -Ionen, welche durch die Membran zu den reduzierten Sauerstoffionen wandern und zusammen zu H_2O reagieren. Die hier beschriebene Reaktion ist exotherm, daher läuft sie freiwillig ab und es wird Energie dabei frei.

1.2 Elektrolyseur

Das Funktionsprinzip des Elektrolyseurs ist genau umgekehrt zu dem einer Brennstoffzelle. Hier wird kein Wasser erzeugt, sondern durch das Anlegen einer Spannung zu H^+ und O_2 aufgespalten. Die Reaktion ist also endotherm; d.h. ihr muss Energie zugeführt werden. Der an der Kathode hergestellte Wasserstoff diffundiert durch die Membran zur Anode.

1.3 Kennlinie einer Brennstoffzelle

Unter der Kennlinie einer Brennstoffzelle versteht man den Graphen, der die Zellspannung U in Abhängigkeit vom Zellstrom I darstellt. Mithilfe dieser Kennlinie lassen sich die Abweichungen von einer idealen elektrochemischen Zelle ermitteln, die konstant eine Spannung von bis zu 1,23 V erzeugen würde. Die Differenz zwischen der theoretisch möglichen Spannung E_0 und der experimentell erzeugten Spannung

U_0 wird dabei **Überspannung** genannt. Diese kann abhängig von verschiedenen Faktoren in drei Bereiche unterteilt werden, wie es auch in folgender Abbildung dargestellt ist.

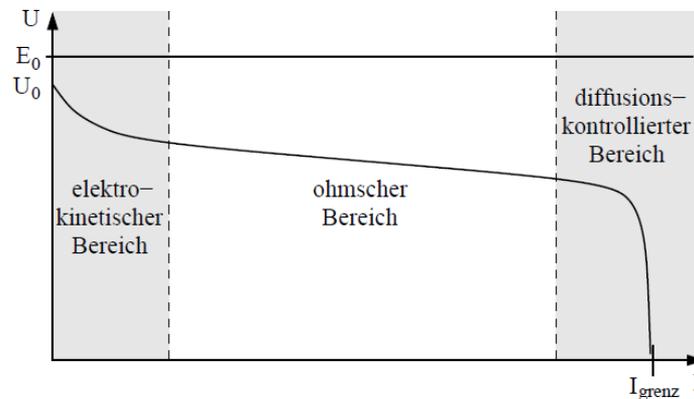


Abbildung 2: typische Kennlinie einer Brennstoffzelle [2]

1.3.1 Elektro-kinetischer Bereich

Das deutliche Absinken der Funktion in diesem Bereich hängt mit der Durchtrittsgeschwindigkeit der Elektronen durch die Grenze zwischen Elektroden und Elektrolyt zusammen. Diese Geschwindigkeit wird vom Elektrolyten und vom Katalysator beeinflusst, was in der sogenannten Tafelgleichung zur Berechnung der Durchtrittsüberspannung η_{Durch} berücksichtigt wird.

$$\eta_{Durch} = \frac{RT}{(1 - \alpha) \cdot z \cdot F} \ln \left(\frac{I}{-I_0} \right) \quad (1)$$

R bezeichnet hier die ideale Gaskonstante mit einem Wert von $R = 8,3144621 \frac{J}{mol \cdot K}$, T steht für die Temperatur in Kelvin und $F = 96485 \frac{C}{mol}$ ist die Faradaykonstante. Als weitere Größen treten die Anzahl z der durchtretenden Elektronen und der Austauschstrom I_0 auf, der beschreibt, wie groß der Stoffaustausch durch die Redoxreaktion ist. $(1 - \alpha)$ mit $0 < \alpha < 1$ beschreibt schließlich den Anteil von η_{Durch} , der für die Absenkung der Aktivierungsenergie der kathodischen Reduktion erforderlich ist.

1.3.2 Ohmscher Bereich

Wie man in Abbildung 2 deutlich erkennt, fällt in diesem Bereich die Zellspannung linear mit dem steigendem Strom ab. Die Differenz aus E_0 und U_0 wird dementsprechend immer größer, wobei die Ohmsche Überspannung η_{Ohm} mithilfe von

$$\eta_{Ohm} = R_{in} \cdot I \quad (2)$$

berechnet werden kann. R_{in} bezeichnet hierbei den Innenwiderstand der Zelle.

1.3.3 Diffusions-kontrollierter Bereich

Man kann eine sogenannte Diffusionsüberspannung η_{Diff} feststellen, wenn die Gase schneller bei der chemischen Reaktion am Katalysator verbraucht werden, als sie durch die Elektroden zum Elektrolyten diffundieren können. Dieser Effekt ist bei hohen Strömen bemerkbar und sorgt ab einem gewissen Stromwert I_{grenz} dafür, dass die Zellspannung auf Null abfällt.

1.3.4 Gesamter Bereich

Die resultierende Zellspannung kann insgesamt mithilfe von

$$U = E_0 - \eta_{Durch} - \eta_{Ohm} - \eta_{Diff} = E_0 - \frac{RT}{(1-\alpha) \cdot z \cdot F} \ln \left(\frac{I}{-I_0} \right) - R_{in} \cdot I - \eta_{Diff} \quad (3)$$

berechnet werden. Während η_{Ohm} im gesamten Bereich relevant ist, spielt η_{Diff} erst bei großen Stromwerten eine Rolle. Im Gegensatz dazu steigt η_{Durch} bei kleinen Strömen sehr stark an und bleibt dann konstant.

1.4 Faraday-Wirkungsgrad

Wirkungsgrade beschreiben im Allgemeinen das Verhältnis von Nutzen zu dafür aufgebrachtem Aufwand. Der Faraday-Wirkungsgrad ε_F gibt nun das Verhältnis vom theoretisch berechneten zum tatsächlich pro Zeit umgesetzten Wasserstoff-Volumen an. Dabei kann man die theoretische zeitliche Volumenänderung mit folgender Gleichung bestimmen, wobei V_m das molare Gasvolumen bei Laborbedingungen bezeichnet.

$$\dot{V}_{H_2,theo} = \frac{dV_{H_2,theo}}{dt} = \frac{I \cdot V_m}{z \cdot F} \quad (4)$$

Die experimentell pro Zeit umgesetzte Volumen lässt sich mithilfe von

$$\dot{V}_{H_2,exp} = \frac{\Delta V_{H_2,exp}}{\Delta t} \quad (5)$$

ermitteln, wobei Δt hier für die betrachteten Zeitintervalle steht.

Da bei der Brennstoffzelle die Gase verbraucht werden, gilt:

$$\varepsilon_{F,BRZ} = \frac{\dot{V}_{H_2,theo}}{\dot{V}_{H_2,exp}} \quad (6)$$

Beim Elektrolyseur wird hingegen unter Verwendung von Strom Wasserstoff erzeugt. Der Faraday-Wirkungsgrad wird also genau umgekehrt berechnet:

$$\varepsilon_{F,Elektrolyseur} = \frac{\dot{V}_{H_2,exp}}{\dot{V}_{H_2,theo}} \quad (7)$$

1.5 Energiewirkungsgrad

Den Energiewirkungsgrad ε_E kann man bei der Brennstoffzelle folgendermaßen ermitteln.

$$\varepsilon_{E,BRZ} = \frac{W_{erh}}{W_{ein}} \quad (8)$$

Die **erhaltene** (W_{erh}) und die benötigte Leistung (W_{ein}) wird dabei mit den Gleichungen

$$W_{erh} = U \cdot I; \quad W_{ein} = \frac{\dot{V}_{H_2,exp}}{V_m} \cdot \Delta H^0 \quad (9)$$

bestimmt. ΔH^0 ist der chemische Energieinhalt von Wasserstoff mit einem numerischen Wert von $286 \frac{kJ}{mol}$. Für einen Elektrolyseur sind W_{ein} und W_{erh} in Gleichung 8 jedoch genau vertauscht, da eine Spannung benötigt wird, um die Reaktion in Gang zu setzen.

2 Experimentelles Vorgehen

Für die Versuche wird ein Elektrolyseur zur Gaserzeugung verwendet. An ihm liegt eine Spannung U an, die mit einem Spannungsmessgerät mit Ungenauigkeit $0,5\% \pm 0,002\text{ V}$ gemessen wird. Ein Strommessgerät ermittelt den Stromfluss mit einer Ungenauigkeit von $1\% \pm 0,005\text{ A}$. Das erzeugte Gas gelangt gleichmäßig verteilt in zwei identische PEM-Brennstoffzellen, welche beliebig verschaltbar sind. Vor jedem Versuch werden die Zellen mit Gas durchflutet, um z.B. Wasserrückstände zu beseitigen. Diese würden die Leistung der Zellen negativ beeinflussen.

2.1 Charakterisierung des Elektrolyseurs

Um ein charakteristisches $U - I$ -Diagramm des Elektrolyseurs zu erstellen, wird der Stromfluss I in 0,1 A Schritten von 0 auf 1,4 A geregelt. Bei jedem Schritt wird die am Elektrolyseur anliegende Spannung gemessen. Zudem bestimmt man die Spannung U_0 , bei der der Stromfluss und somit die Elektrolyse (sichtbar durch aufsteigende Gasbläschen) einsetzt.

2.2 Wirkungsgrad des Elektrolyseurs

Zur Ermittlung des Wirkungsgrades des Elektrolyseurs wird ein Strom von $I = 1\text{ A}$ eingestellt. Anschließend wird über 6 Minuten Gas erzeugt. Der Füllstand am Wasserstoff-Behälter wird alle 60 Sekunden abgelesen. Die Versuchsdurchführung erfolgte aufgrund von Corona-Maßnahmen nicht vor Ort, stattdessen wurden die Messwerte einem Video [4] entnommen.

2.3 Wirkungsgrad der Brennstoffzelle

Bei diesem Versuch soll der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle bestimmt werden. Dazu werden die beiden Zellen wie in Abbildung 3a parallel geschaltet und mit einem Lastwiderstand verbunden. Nun wird gestoppt, wie lange es dauert, bis 30 ml Wasserstoff verbraucht sind. Dabei wird alle 30 Sekunden der Strom I durch den Lastwiderstand und die an den Zellen anliegende Spannung U gemessen. Wie auch beim Versuch zum Wirkungsgrad des Elektrolyseurs werden die Messwerte einem Video [3] entnommen.

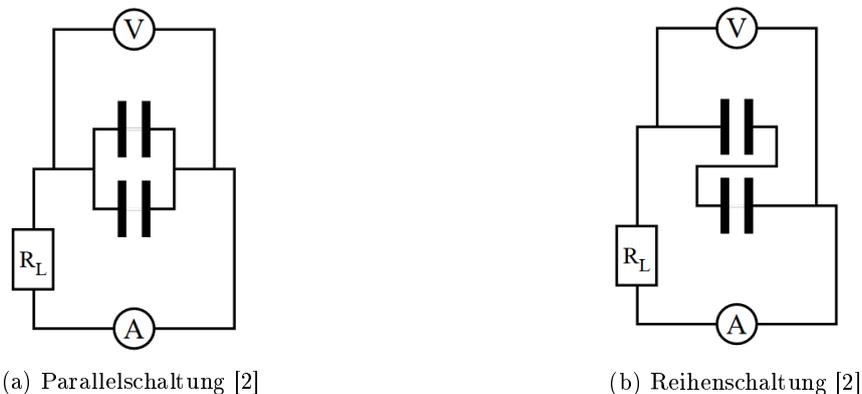


Abbildung 3: Schaltplan Brennstoffzelle

2.4 Kennlinie und Charakterisierung der Brennstoffzelle

Um die Kennlinie der Brennstoffzelle zu erhalten, werden zwei Versuchsreihen mit je drei Messungen durchgeführt. Einmal mit einer Parallelschaltung (Abbildung 3a) und einmal mit einer Reihenschaltung (Abbildung 3b) der beiden Zellen. Diese werden mit dem regelbaren Lastwiderstand verbunden und es wird für alle Widerstände der Strom- und Spannungswert notiert.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Charakterisierung des Elektrolyseurs

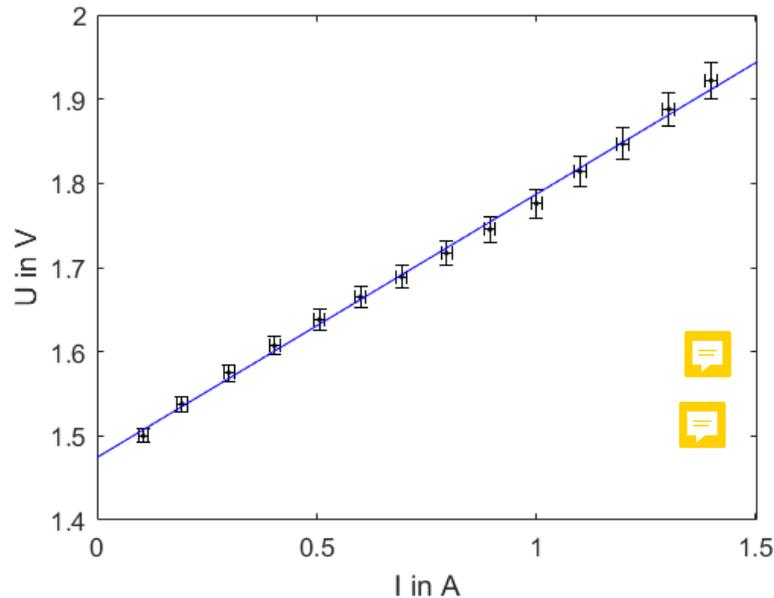


Abbildung 4: $U - I$ Diagramm Elektrolyseur

Die Messergebnisse ergeben zwar eine kubische Kennlinie, doch innerhalb der Unsicherheiten lässt sich ein linearer Fit der Spannungen anfertigen. Da die Werte am Messgerät während der Versuchsdurchführung recht stark geschwankt haben und sich der Fit vollständig in den ermittelten Unsicherheiten befindet, ist es durchaus annehmbar, die $U - I$ - Kennlinie als linear anzusehen. Der Quotient von Spannung und Strom ist damit also konstant, was darauf hindeutet, dass sich der Elektrolyseur wie ein ohmscher Widerstand verhält. Die Verbauung eines ohmschen Widerstandes und keiner komplizierten Impedanz scheint sinnvoll, was ebenfalls die Annahme einer linearen Kennlinie bestätigt. Der Stromfluss setzt etwa bei 1,413 V ein. Zu erwarten wäre 1,23 V, die Mindestspannung für die Elektrolyse von Wasser. Diese Abweichung kommt womöglich durch den ohmschen Widerstand der Verbindungskabel von der Spannungsquelle zum Elektrolyseur zustande. Mit der Spannungsdifferenz von 0,183 V und etwa 0,1 A bei Einsetzen des Stromflusses, erhält man einen Widerstand von $1,83 \Omega$, was in der Größenordnung der Kabelwiderstände liegt.

3.2 Wirkungsgrad des Elektrolyseurs

Die Auswertung des Videos [4] ergibt für die Erzeugungsrate von Wasserstoff einen Mittelwert von $\dot{V}_{H_2,exp} = (0,1250 \pm 0,0010) \frac{\text{ml}}{\text{s}}$. Da Sauerstoff und Wasserstoff annähernd ideale Gase sind, gilt bei $T_0 = 0^\circ\text{C}$ $V_{m_0} = 22,4140 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$ [5]. Mithilfe der idealen Gasgleichung lässt sich damit das molare Volumen bei einer Labortemperatur von $T_L = (20 \pm 3)^\circ\text{C}$ berechnen: $V_m = V_{m_0} \cdot \frac{T_L}{T_0} = (22,06 \pm 0,25) \frac{\text{l}}{\text{mol}}$. Da der Strom während des Versuchs schwankte, wird zusätzlich zur Geräteunsicherheit noch $\pm 0,020 \text{ A}$ dazugerechnet, was $I = (1,000 \pm 0,035) \text{ A}$ ergibt. Damit errechnet sich die theoretische Erzeugungsrate zu $\dot{V}_{H_2,theo} = 0,1247 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$. Anschließend nutzt man Gleichung 7 um den Faraday-Wirkungsgrad zu bestimmen: $\epsilon_{F, \text{Elektrolyseur}} = (100,2 \pm 2,4)\%$. Ein Wirkungsgrad $> 100\%$ ist unrealistisch, der wahre Wert muss also im Bereich $97,8\% - 100,0\%$ liegen. Damit ist der Faraday-Wirkungsgrad immer noch sehr hoch, was darauf schließen lässt dass (nahezu) keine Nebenreaktion im System stattfindet.

Der Energiewirkungsgrad des Elektrolyseurs kann mit Gleichung 8 bestimmt werden. Für die eingesetzte Leistung gilt $W_{ein} = U \cdot I = (1,615 \pm 0,075) \frac{\text{J}}{\text{s}}$ und für die erhaltene Leistung $W_{erh} = \frac{\dot{V}_{H_2,exp}}{V_m} \cdot \Delta H^0 = (1,486 \pm 0,013) \frac{\text{J}}{\text{s}}$. Dabei wurden die Unsicherheiten von U , I , V_m und $\dot{V}_{H_2,exp}$ berücksichtigt. Damit gilt für den Energiewirkungsgrad $\varepsilon_{E, Elektrolyseur} = (92,0 \pm 3,4)\%$. Der Leistungsverlust lässt sich durch den ohmschen Widerstand der Kabel erklären.

Benutzt man für W_{erh} $\dot{V}_{H_2,theo}$ anstatt $\dot{V}_{H_2,exp}$ und setzt dies in Gleichung 8 ein, bekommt man

$$\varepsilon_{E, Elektrolyseur} = \frac{U \cdot I \cdot \dot{V}_m}{\Delta H^0} \cdot \frac{z \cdot F}{V_m \cdot I} = \frac{U \cdot z \cdot F}{\Delta H^0} \quad (10)$$

Der Energiewirkungsgrad ist demnach nicht vom Strom I abhängig.

3.3 Wirkungsgrad der Brennstoffzelle

Die Messwerte aus dem Video [3] sind in Tabelle 1 festgehalten. Nach $\Delta t = 360 \text{ s}$ war ein Wasservolumen von 30 ml verbraucht. Für die Änderungsrate des Wasserstoffvolumens ergibt sich einen Mittelwert von $\dot{V}_{H_2,exp} = (8,33 \pm 0,50) \cdot 10^{-2} \frac{\text{ml}}{\text{s}}$. Die theoretisch erwartete Volumenänderung $\dot{V}_{H_2,theo}$ wird für jeden gemessenen Wert von I berechnet und anschließend der gewichtete Mittelwert gebildet, wobei die Fehler für V_m und I berücksichtigt werden: $\dot{V}_{H_2,theo} = (7,07 \pm 0,16) \cdot 10^{-2} \frac{\text{ml}}{\text{s}}$. Damit folgt $\varepsilon_{F, BRZ} = \frac{\dot{V}_{H_2,theo}}{\dot{V}_{H_2,exp}} = (84,9 \pm 5,4)\%$. Man hat also Verluste in der Brennstoffzelle. Grund dafür könnte u.a. sein, dass die bei der exothermen Rekombination von Wasser- und Sauerstoffionen zu Wasser freiwerdende Energie nicht nur in Form von elektrischer, sondern auch Wärmeenergie freigesetzt wird. Zudem kann es sein, dass sich die beiden Gase nicht nur zu Wasser, sondern auch zu anderen Stoffen (Wasserstoffperoxid H_2O_2 wäre beispielsweise vorstellbar) verbinden.

Für die Bestimmung der gewonnenen elektrischen Leistung W_{erh} gilt $W_{erh} = U \cdot I$. Es wird unter Berücksichtigung der Unsicherheiten von U und I der gewichtete Mittelwert gebildet: $\bar{W}_{erh} = (0,2578 \pm 0,0091) \frac{\text{J}}{\text{s}}$. Für die eingesetzte Leistung gilt: $W_{ein} = \frac{\dot{V}_{H_2,exp}}{V_m} \cdot \Delta H^0 = (0,9902 \pm 0,060) \frac{\text{J}}{\text{s}}$. Damit ergibt sich der energetische Wirkungsgrad zu: $\varepsilon_{E, BRZ} = \frac{\bar{W}_{erh}}{W_{ein}} = (26,0 \pm 1,8)\%$. Der Wert liegt damit unter dem Literaturwert für die Effizienz von PEM-Brennstoffzellen von 45 – 50% [1]. Dies könnte an einer generell schlechteren Brennstoffzelle liegen, oder auch daran, dass die Zelle vor dem Versuch nicht ausreichend gespült wurde und sich noch Wasser in ihr befand. Da der Versuch nur auf Video aufgezeichnet wurde, kann darüber aber keine Aussage getroffen werden.

3.4 Kennlinie der Brennstoffzelle

Da das Ziel die Erstellung einer Kennlinie für eine einzelne Brennstoffzelle ist, werden die Messdaten auf eine Zelle umgerechnet. Für die Daten bei der Parallelschaltung werden die Stromwerte halbiert, für die der Reihenschaltung die Spannungswerte. Anschließend wird unter Berücksichtigung der Messgeräteunsicherheiten für jeden Widerstand der gewichtete Mittelwert aus den drei Messungen gebildet. Die Werte der Parallelschaltung sind in Abbildung 5 und die der Reihenschaltung in Abbildung 6 aufgetragen. Zusätzlich wurde jeweils eine Ausgleichsgerade zur Bestimmung des Innenwiderstands der Zelle gefittet. Die beiden Geradengleichungen lauten:

$$U(I)_{\text{Parallel}} = -1,297 \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot I + 0,7505 \text{ V} \quad (11)$$

$$U(I)_{\text{Reihe}} = -1,131 \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot I + 0,7400 \text{ V} \quad (12)$$

Die Steigung entspricht dabei dem Innenwiderstand der Brennstoffzelle. Der Mittelwert ist $\bar{R}_{in} = 1,214 \Omega$. Dieser Widerstand trägt auch zu dem geringen Energiewiderstand $\varepsilon_{E, BRZ}$ bei.

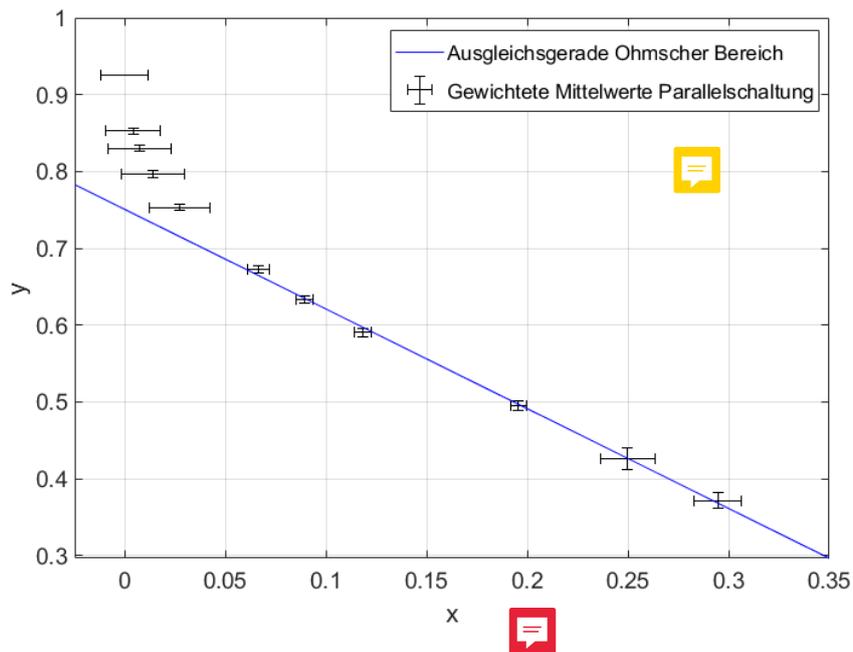


Abbildung 5: $U - I$ Diagramm zur Parallelschaltung

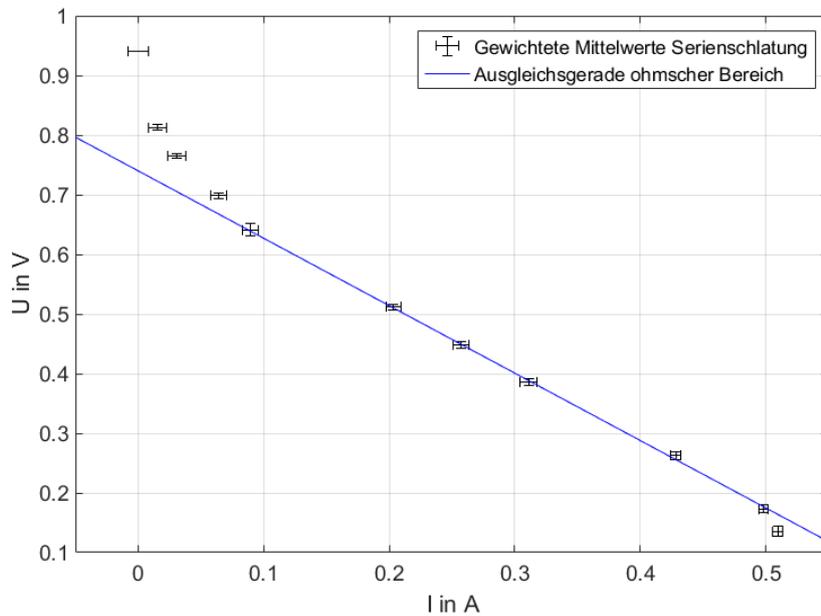


Abbildung 6: $U - I$ Diagramm zur Reihenschaltung

Aus den beiden Diagrammen ist zu erkennen, dass die Messungen bei größer werdenden Strömen innerhalb der Unsicherheiten nicht mehr übereinstimmen. (BEGRÜNDUNG??) Im Diagramm für die Reihenschaltung (Abbildung 6 sind die drei verschiedenen Bereiche einer typischen Brennstoffzellen-Kennlinie gut zu sehen. Zwischen ca. 0,08 und 0,5 A befindet man sich im ohmschen Bereich, daher fällt die Kurve linear. Für $I < 0,08$ A ist man im elektrokinetischen, für $I > 0,5$ A im diffusions-kontrolliertem Bereich. U_0 liegt bei ca. 0,95 V.

3.5 Charakterisierung der elektrochemischen Zelle

Obwohl bei der Reihenschaltung höhere Werte für η_{Durch} errechnet wurden, ergeben sich bei beiden Schaltungen ähnliche Kennlinien. Die logarithmische Funktion aus Gleichung 1 ist hierbei erkennbar. Teilweise Abweichungen von der Idealkurve lassen sich durch starke Schwankungen der Messwerte während der Versuchsdurchführung erklären. Um dies etwas entgegenzuwirken, wurden für beide Schaltungen drei Messreihen durchgeführt und für die Bestimmung von η_{Durch} jeweils der Mittelwert der Ströme mit Abweichung verwendet. ~~Durch~~ Außerdem wurde für die Reihenschaltung, bei der die Schwankungen besonders hoch waren, ein Zeitintervall von 10 Sekunden festgelegt, nach dem die Messungen durchgeführt wurden. Anhand der Messwerte ergibt sich für die Parameter aus Gleichung 1 $\alpha = 0,987$, $I_0 = -0,2936$ A für die Reihen- und $\alpha = 0,961$, $I_0 = -0,0743$ A für die Parallelschaltung. ~~Hierbei wurde ein Funktionsfit durchgeführt.~~ Die Durchtrittsfaktoren liegen wie erwartet zwischen 0 und 1 und bei beiden Schaltungen nahe aneinander. Die Austauschströme hingegen weichen deutlich voneinander ab. Da die Durchtrittsfaktoren ein sinnvolles Resultat ergeben, kann ein Messfehler bei den Strömen eher ausgeschlossen werden. Es gibt also vermutlich eine physikalische Erklärung für diese Abweichung, die uns allerdings unbekannt ist.

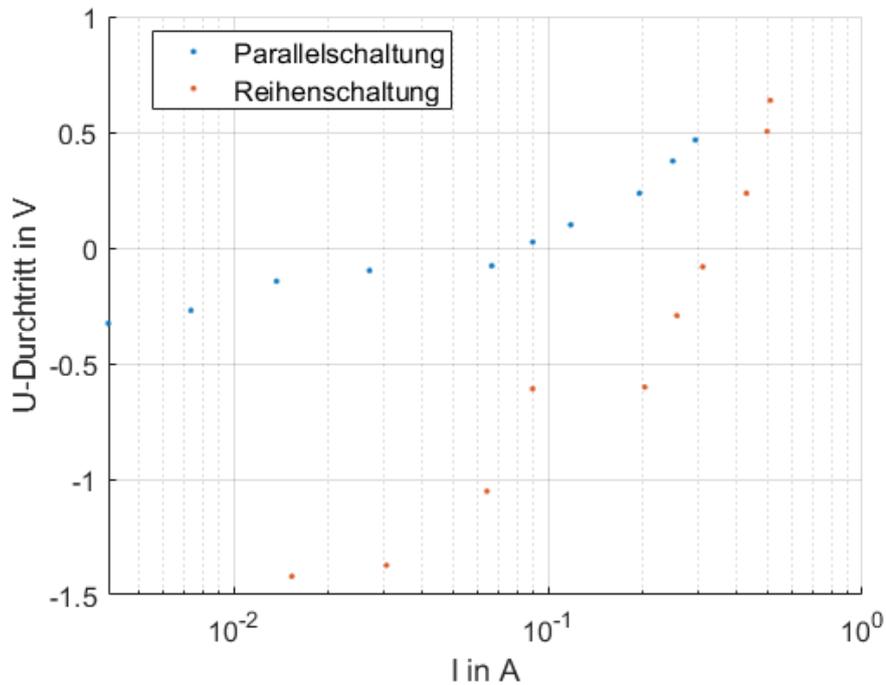


Abbildung 7: $U - I$ Diagramm zur Reihenschaltung

4 Anhang

t [s]	V [ml]	U [V]	I [A]
0	46	0,514	0,687
30	43	0,490	0,644
60	40	0,477	0,611
90	38	0,468	0,589
120	35	0,461	0,574
150	32	0,456	0,564
180	30	0,453	0,555
210	28	0,449	0,548
240	25	0,446	0,543
270	20	0,443	0,537
300	20	0,440	0,532
330	18	0,438	0,527
360	16	0,436	0,523

Tabelle 1: Messdaten zu Wirkungsgrad der Brennstoffzelle

5 Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] *Emerging electrochemical energy conversion and storage technologies*. Front Chem. 24. Sep. 2014. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4174133/>.
- [2] Fakultät für Physik. *Brennstoffzelle (BRZ)*. Technische Universität München. 20. Dez. 2018. URL: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/ap/ap2/BRZ.pdf>.
- [3] Fakultät für Physik. *WG-BRZ-0*. Technische Universität München. URL: <https://tum.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=e3bd743b-d567-4dd4-ab46-ac15012db036&start=0>.
- [4] Fakultät für Physik. *WG-Elec-0*. Technische Universität München. URL: <https://tum.cloud.panopto.eu/Panopto/Pages/Viewer.aspx?id=295f6af2-4347-439a-ba7c-ac15012db08c&start=0>.
- [5] National Institute of Standards und Technology. *Reference on Constants, Units and Uncertainty*. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mvolstd>.



Brennstoffzelle

$$\pm 3 \text{ mA}, \quad \pm 2 \text{ mV}$$

Aufgabe 2

Reaktion bei:

$$\approx 1,413 \text{ V}$$

I in A	U in V
0,104	1,501
0,192	1,538
0,299	1,575
0,403	1,607
0,505	1,638
0,599	1,665
0,693	1,689
0,795	1,716
0,894	1,745
1,000	1,776
1,099	1,814
1,196	1,847
1,301	1,888
1,398	1,922

Aufgabe 4

$$u(I) = \pm 2 \text{ mA}$$

$$u(U) = \pm 2 \text{ mV}$$

1. Messreihe	R in Ω	Strom in A	U in V
	100 Ω	0,008	0,826
	50 Ω	0,016	0,801
	20 Ω	0,034	0,769
	10 Ω	0,064	0,727
	5 Ω	0,131	0,661
	3 Ω	0,175	0,625
	2 Ω	0,234	0,583
	1,0 Ω	0,395	0,490
	0,5 Ω	0,4 $\pm 5 \text{ nA}$ 0,460	0,443
	0,3 Ω	0,592	0,360

offener Stromer: 0,903 V

2. Messreihe	R in Ω	Strom in A	U in V
	100 Ω	0,008	0,866
	50 Ω	0,011	0,859
	20 Ω	0,025	0,815
	10 Ω	0,053	0,765
	5 Ω	0,134	0,677
	3 Ω	0,181	0,635
	2 Ω	0,238	0,592
	1,0 Ω	0,383	0,500
	0,5 Ω	0,489	0,437
	0,3 Ω	0,556	0,396

offener Stromer: 0,938 V

3. Messreihe

R in Ω	I in A	U in V
100 Ω	0,008	0,867
50 Ω	0,017	0,838
20 Ω	0,024	0,814 $\pm 4 \mu V$
10 Ω	0,046	0,778 $\pm 4 \mu V$
5 Ω	0,133	0,670
3 Ω	0,181	0,639
2 Ω	0,237	0,596
1,0 Ω	0,304	0,495
0,5 Ω	0,557	0,400
0,3 Ω	0,623	0,361

offen: 0,938V

U: 0,5% vom Messwert $\pm 2 \text{ mV}$

I: 1,0% vom Messwert $\pm 5 \text{ mA}$, V: 1% Unvor.

martin.woerle@tum.de

Reihenschaltung

1. Messreihe

R in Ω	I in A	U in V
100 Ω	0,015	1,616
50 Ω	0,030	1,516
20 Ω	0,060	1,390
10 Ω	0,098	1,262
5 Ω	0,199	1,001
3 Ω	0,252	0,872
2 Ω	0,305	0,750
1,0 Ω	0,421	0,511
0,5 Ω	0,495	0,344
0,3 Ω	0,462	0,383

offen:

1,877 V

2. Messreihe

Widerstand in Ω	Strom in A	Spannung in V
100 Ω	0,016	1,627
50 Ω	0,031	1,533
20 Ω	0,066	1,392
10 Ω	0,096	1,293
5 Ω	0,203	1,030
3 Ω	0,259	0,898
2 Ω	0,315	0,769
1,0 Ω	0,416	0,529
0,5 Ω	0,496	0,344
0,3 Ω	0,507	0,271

offen: 1,882V

3. Messreihe

Widerstand in Ω	Strom in A	Spannung in V
100.	0,015	1,636
50	0,031	1,543
20	0,066	1,408
10	0,103	1,294
5	0,208	1,040
3	0,261	0,916
2	0,313	0,797
1,0	0,438	0,535
0,5	0,503	0,352
0,3	0,512	0,272

offen: 1,884V