

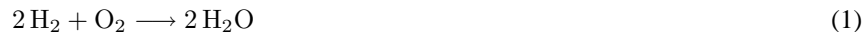
Die Brennstoffzelle

Grolik Benno, Kopp Joachim

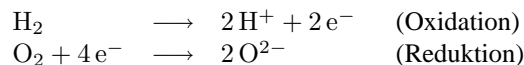
20. Januar 2003

1 Einleitung

Seit die Menschheit in der zweiten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts erkannt hat, dass die fossilen Rohstoffe wie Kohle und Öl zur Neige gehen, wird die Entwicklung alternativer Energiequellen stetig vorangetrieben. Ein vielversprechender Ansatz ist die Brennstoffzelle. Dabei handelt es sich um ein galvanisches Element, bei dem aus der Reaktion von elementarem Wasserstoff mit Sauerstoff elektrische Energie gewonnen wird. Die ablaufende chemische Reaktion lautet



Sie setzt sich aus folgenden Teilreaktionen zusammen:



Die Oxidation des Wasserstoffs und die Reduktion des Sauerstoffs finden in zwei getrennten Reaktionsräumen statt, zwischen denen sich eine Membran befindet, die nur für H^+ -Ionen durchlässig ist. Der Elektronenaustausch erfolgt über den externen Verbraucher.

Für weitere Informationen zu den chemischen Prozessen und zur technischen Realisierung des Verfahrens verweisen wir auf einschlägige Fachliteratur, insbesondere auf die gängigen Chemie-Lehrbücher sowie auf die Beschreibung des vorliegenden Praktikumsversuchs unter

[www.ph.tum.de/studium/angebot/praktika/
anfaenger/anleitungen/BRZ.pdf](http://www.ph.tum.de/studium/angebot/praktika/anfaenger/anleitungen/BRZ.pdf)

Im Folgenden wollen wir die Ergebnisse vorstellen, die wir bei Experimenten zum physikalischen Verhalten zweier baugleicher Brennstoffzelle erhalten haben. Die Zellen wurden aus einem Elektrolyseapparat mit Wasserstoff und Sauerstoff versorgt. Im einzelnen wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Eine Leckstrommessung zur Bestimmung des Energieverlusts an der Zelle im Ruhezustand.
- Die Aufnahme von Spannungs-Strom-Kennlinien bei Reihen- und Parallelschaltung der beiden Zellen.
- Die Aufnahme von Kennlinien bei unterschiedlicher H_2 - und O_2 -Zufuhr.

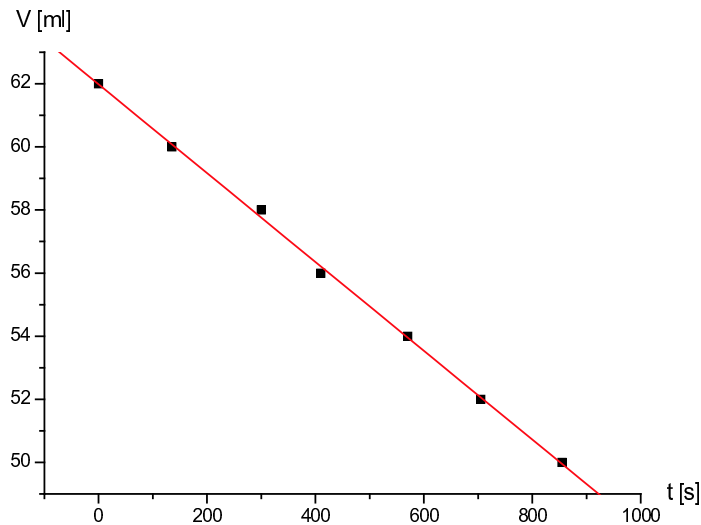


Abbildung 1: Abnahme der H_2 -Menge im Vorratsbehälter durch Leckströme

2 Leckströme

Beobachtet man die Brennstoffzellen ohne angeschlossene Verbraucher über einige Zeit hinweg, so fällt auf, dass die H_2 -Menge im Vorratsbehälter stetig abnimmt, obwohl der Zelle keine elektrische Leistung entnommen wird. Dieses Verhalten ist in Abbildung 1 dargestellt.

Erwartungsgemäß ergibt sich ein linearer Zusammenhang, d.h. die Verlustrate ist zeitlich konstant. Mit Hilfe eines numerischen Regressionsalgorithmus wurde aus den Messwerten ein Gasverlust von $dV/dt = 0.844 \pm 0.012$ ml/min ermittelt. Der Fehler beinhaltet dabei die rein statistischen Abweichungen der Messwerte von der Regressionsgeraden. Systematische Fehler, wie ein etwaiger Skalierungsfehler der Volumenskala am Vorratsbehälter sind hier vernachlässigbar klein.

Um nun berechnen zu können, welchem Leckstrom der beobachtete Gasverlust entspricht, benötigen wir zunächst das molare Volumen des Gases. Aus der allgemeinen Gasgleichung ergibt sich bei einem Luftdruck von $p_0 = 1013$ mbar und einer Temperatur von $T_0 = 20$ °C = 293 K

$$V_{\text{mol}} = \frac{RT_0}{p_0} = 24.05 \pm 3.89 \text{ l/mol} \quad (2)$$

$$\Delta V_{\text{mol}} = \Delta T_0 \frac{R}{p_0} + \Delta p_0 \frac{RT_0}{p_0^2} = 3.89 \text{ l/mol}$$

Der relativ große Fehler resultiert daraus, dass unsere Werte für T_0 und p_0 nur grobe Abschätzungen sind. Für die Temperatur wurde ein Fehler von $\Delta T_0 = 4$ K angenommen, für den Luftdruck dagegen $\Delta p_0 = 150$ mbar. Das liegt daran, dass der äußere Luftdruck auf Grund der Höhenlage von München (ca. 500 m über N.N.) niedriger ist

als der Standarddruck p_0 . Andererseits könnte in dem Vorratsgefäß auch ein sehr viel höherer Druck herrschen, da das System abgeschlossen war und deshalb kein Druckausgleich stattfinden konnte.

Da bereits die Messung so ungenau war, wurde für die Fehlerrechnung das oben angegebene lineare Fehlerfortpflanzungsgesetz verwendet, das größere Abschätzungen liefert als z.B. die Gauß-Formel.

Aus (2) lässt sich die mengenmäßige Verlustrate berechnen:

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= \frac{dV/dt}{V_{\text{mol}}} = \frac{0.844 \text{ ml/min}}{24.05 \text{ l/mol}} = 58.5 \pm 8.6 \mu\text{mol/s} \\ \Delta \frac{dn}{dt} &= \Delta \frac{dV}{dt} \frac{1}{V_{\text{mol}}} + \Delta V_{\text{mol}} \frac{dV/dt}{V_{\text{mol}}^2} = 8.6 \mu\text{mol/s}\end{aligned}\quad (3)$$

Daraus erhält man den Leckstrom

$$\begin{aligned}I_{\text{Leck}} &= zF \frac{dn}{dt} = 2 \cdot 96500 \text{ C/mol} \cdot 58.5 \mu\text{mol/s} = 112.9 \pm 16.6 \text{ mA} \\ \Delta I_{\text{Leck}} &= zF \cdot \Delta \frac{dn}{dt} = 16.6 \text{ mA}\end{aligned}\quad (4)$$

Der relativ große Fehlerbereich von I_{Leck} kommt von der ungenauen Kenntnis des Molvolumens (Gleichung (2)).

Auch wenn der Leckstrom hier formal als elektrischer Strom angegeben wird, muss man daran denken, dass es sich dabei nicht unbedingt um tatsächlich vorhandenen Elektronentransport in der Zelle handelt. Im Laufe unserer Versuche haben wir bemerkt, dass auch Lecks im Gasleitungssystem vorkommen können, z.B. wenn die Schlauchklemmen nicht richtig schließen.

3 Kennlinien von Brennstoffzellen

Die vielen chemischen und physikalischen Prozesse in einer Brennstoffzelle schlagen sich auf ihre Kennlinie durch, die den Spannungsabfall an der Zelle in Abhängigkeit vom Stromfluss angibt. Der Stromfluss wurde mit Hilfe eines Potentiometers als "Verbraucher" gesteuert.

3.1 Serienschaltung von zwei Brennstoffzellen

Wir werden zunächst die Ergebnisse vorstellen, die sich bei der Serienschaltung von zwei Brennstoffzellen ergaben. In drei aufeinanderfolgenden Messreihen erhielten wir die in Abbildung 2 gezeigten Kennlinien. Wie man sieht, waren die Ergebnisse gut reproduzierbar, so dass wir im Folgenden mit der gemittelten Kennlinie weiterrechnen können, die in Abbildung 3 dargestellt ist.

Im Bereich niedriger Ströme nimmt die Spannung nichtlinear ab. Hier bestimmen elektrokinetische Prozesse das Verhalten der Zellen. Insbesondere baut sich an den Elektroden durch nicht verbrauchte Ladungsträger eine hohe Spannung auf, die die Reaktion hemmt. In unserem Fall wurde diese Leerlaufspannung zu $U_{\text{Leer}} = 1.836 \text{ V}$ gemessen.

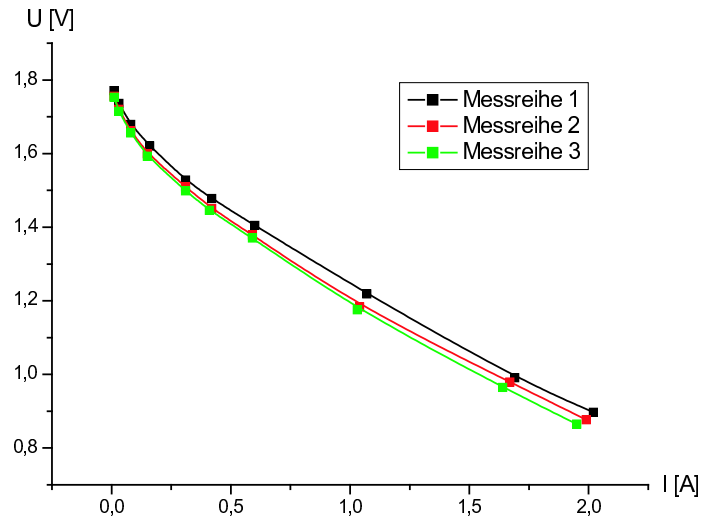


Abbildung 2: U - I -Kennlinien der in Reihe geschalteten Brennstoffzellen aus drei Messreihen

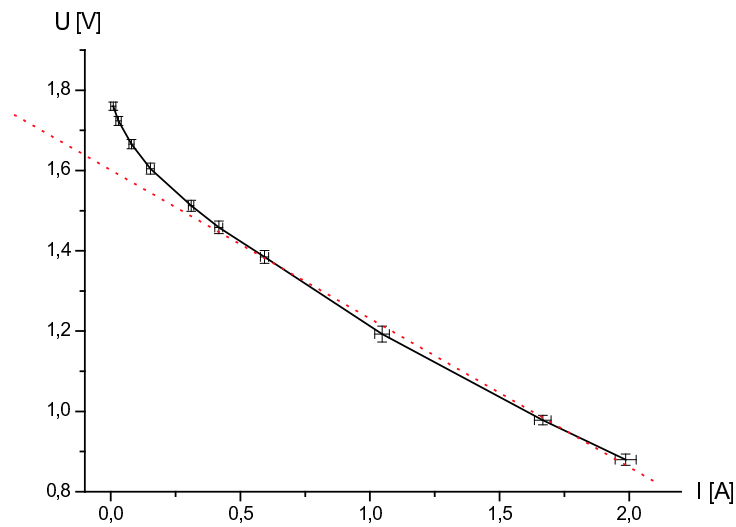


Abbildung 3: Die aus drei Messreihen gemittelte U - I -Kennlinien der in Reihe geschalteten Brennstoffzellen. Eingezeichnet ist auch die Regressionsgerade für den linearen Bereich der Kurve, aus der der Innenwiderstand ermittelt werden kann.

Bei höheren Strömen geht die Kennlinie in eine Gerade über, was auf die Dominanz ohmscher Widerstände hindeutet. In der Tat bewirkt der Innenwiderstand der Zelle in diesem Bereich den Spannungsabfall.

Interessant ist auch das Verhalten der Zellen bei einem Kurzschluss, d.h. unter Vollast. Hier brach die Spannung auf 0.316 V zusammen, während ein Strom von 4.83 A floss.

3.2 Parallelschaltung von zwei Brennstoffzellen

Bei Parallelschaltung der beiden Brennstoffzellen erhält man ähnliche Kennlinien wie bei der Reihenschaltung (vgl. Abbildung 4). Allerdings unterscheidet sich die erste Messreihe deutlich von den anderen beiden. Da es sich dabei um den ersten Versuch des Praktikumsstages handelte, waren möglicherweise die Brennstoffzellen noch nicht gut genug mit H_2 und O_2 durchgespült, so dass sie noch nicht ihre volle Leistung bringen konnten. Deshalb wird die erste Messreihe verworfen und im Folgenden mit den Mittelwerten der Messreihen 2 und 3 gerechnet, die in Abbildung 5 dargestellt sind.

Natürlich ist die erreichbare Spannung bei der Parallelschaltung nur noch halb so groß wie bei der Reihenschaltung. So betrug die Leerlaufspannung hier nur 0.888 V (im Vergleich zu dem ungefähr doppelt so großen Wert von 1.836 V bei der Serienschaltung).

Auch bei der Parallelschaltung erkennt man jedoch bei niedrigen Strömen die Dominanz der elektrokinetischen Reaktionshemmung, während bei hohen Strömen der Einfluss der ohm'schen Innenwiderstände dominiert — die Kennlinie geht in eine Gerade über.

3.3 Kennlinien von Brennstoffzellen bei verminderter Gaszufuhr

Wir werden nun das Verhalten einer Brennstoffzelle untersuchen, wenn die verfügbare Gasmenge gedrosselt wird. Praktisch wurde dies dadurch erreicht, dass der Elektrolyseur, der für die Gaserzeugung zuständig war, mit weniger Leistung betrieben wurde. Dafür wurden die Schlauchklemmen geöffnet, so dass statt reinem H_2 bzw. O_2 auch Umgebungsluft angesaugt werden konnte. Für diese Versuche waren beide Brennstoffzellen in Reihe geschaltet.

Abbildung 6 zeigt die Messergebnisse. Um sie aussagekräftiger zu machen, wurde zu den Stromwerten der in Abschnitt 2, Gleichung (4) berechnete Leckstrom hinzuaddiert.

Qualitativ ist festzustellen, dass keine so hohen Ströme mehr möglich sind wie zuvor, da die Primärenergie in Form von H_2 und O_2 nicht mehr in ausreichender Geschwindigkeit geliefert wird.

Außerdem tritt jetzt bei hohen Strömen ein rapider Spannungszusammenbruch auf, der nicht mehr durch den ohm'schen Innenwiderstand erklärt werden kann. Das liegt ebenfalls daran, dass nicht schnell genug Gas zugeführt wird um die Spannung zwischen den Elektroden aufrecht zu erhalten.

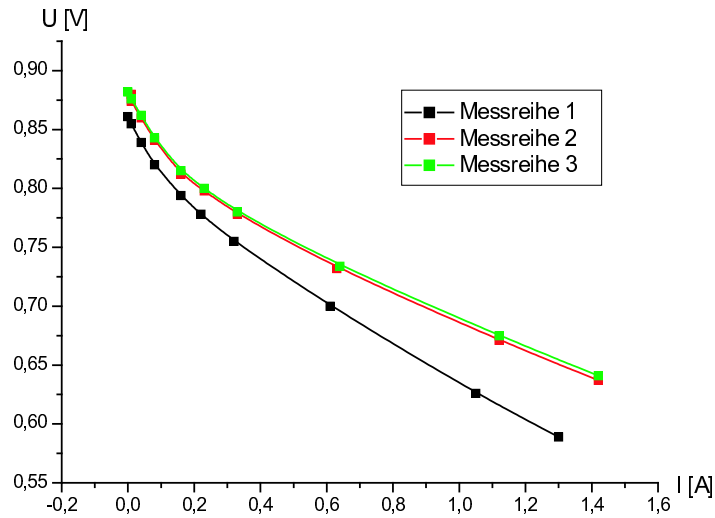


Abbildung 4: U - I -Kennlinien von zwei parallel geschalteten Brennstoffzellen aus drei Messreihen

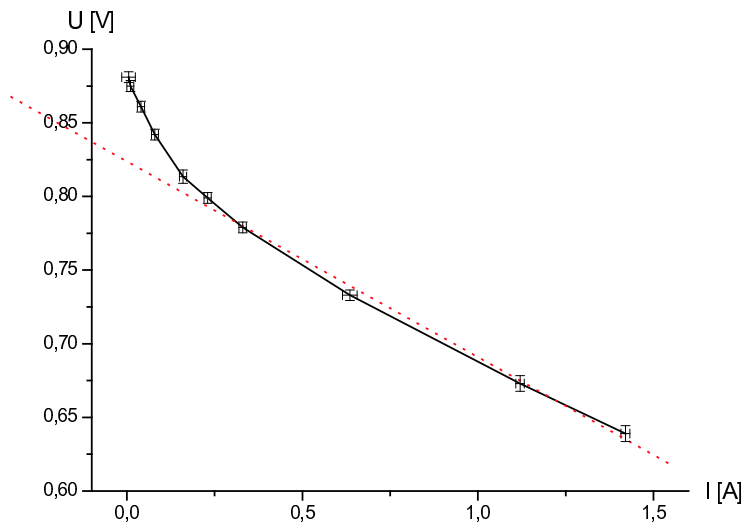


Abbildung 5: Die aus zwei Messreihen gemittelte U - I -Kennlinien der parallel geschalteten Brennstoffzellen. Eingezeichnet ist auch die Regressionsgerade für den linearen Bereich der Kurve, aus der der Innenwiderstand ermittelt werden kann.

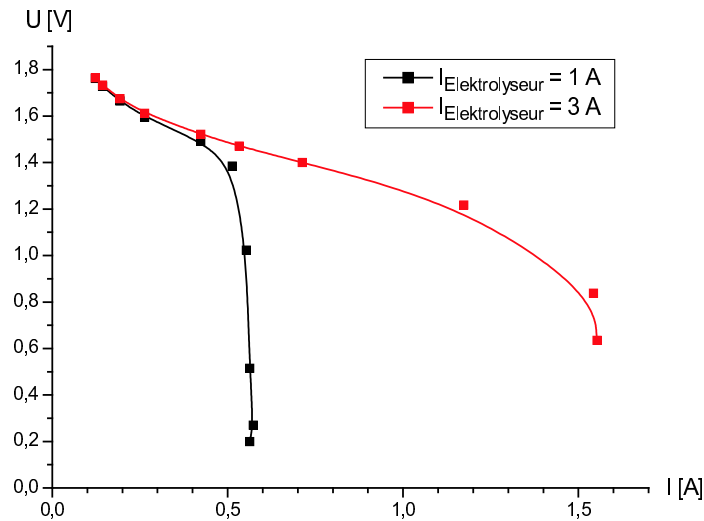


Abbildung 6: Kennlinien der Reihenschaltung zweier Brennstoffzellen bei verminderter Gaszufuhr. Die Strommessungen wurden bereits um den Leckstrom korrigiert

4 Innenwiderstand

In den folgenden Abschnitten wollen wir einige Eigenschaften der Brennstoffzelle anhand der Kennlinien quantitativ untersuchen. Sofern nicht anders angegeben beziehen wir uns dabei immer auf die Kennlinien in den Abbildungen 3 (Reihenschaltung) und 5 (Parallelschaltung), die bei maximaler Elektrolyseurleistung aufgenommen wurden.

Gemäß dem ohmschen Gesetz kann man aus der bei höheren Strömen linearen Kennlinie den Innenwiderstand \tilde{R}_i der Serien- bzw. Parallelschaltung von zwei Zellen auch quantitativ bestimmen: Es ist gerade die Steigung der U - I -Kennlinie im linearen Bereich.

Wir werden diese Rechnung nun für die Kennlinie der Serien- und Parallelschaltungen durchführen. Dazu interpolieren wir die Kennlinien im Bereich hoher Ströme, (bei den fünf jeweils größten Stromwerten) durch Regressionsgeraden. Diese sind in Abbildung 3 und 5 als rot gestrichelte Linien dargestellt.

Für die Reihenschaltung erhielten wir durch numerische Berechnung die Steigung der Geraden und damit der Innenwiderstand zu

$$\tilde{R}_{i,S} = 0.370 \pm 0.012 \, \Omega \quad (5)$$

Für die Parallelschaltung ergab sich

$$\tilde{R}_{i,P} = 0.133 \pm 0.005 \, \Omega \quad (6)$$

Der angegebene Fehler enthält nur die statistischen Abweichungen der Punkte von der Geraden. Die systematischen Fehler der Messgeräte sind verschwindend klein.

Aus den Innenwiderständen der Serienschaltung ($\tilde{R}_{i,S}$) und der Parallelschaltung ($\tilde{R}_{i,P}$) errechnet sich der Innenwiderstand einer einzelnen Zelle nach den Gesetzen für Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen:

$$R_{i,S} = \frac{\tilde{R}_{i,S}}{2} = 0.185 \pm 0.006 \, \Omega \quad (7)$$

$$R_{i,P} = 2\tilde{R}_{i,P} = 0.266 \pm 0.010 \, \Omega \quad (8)$$

Seltsamerweise ist $R_{i,P}$ sehr viel größer als $R_{i,S}$. Dies hängt möglicherweise mit der Art der Gasversorgung zusammen: Bei den hohen Strömen, bei denen die für den Innenwiderstand relevanten Messwerte aufgenommen wurden, verbraucht die erste der Zellen bereits den Großteil des Wasserstoffs, so dass die zweite nicht mehr ihre volle Leistung bringen kann. Im Grenzfall würde sich das System so verhalten als ob nur eine einzige Zelle vorhanden wäre. Diese hätte natürlich einen höheren Innenwiderstand als die Parallelschaltung von zwei Zellen. Beim vorliegenden Experiment spielte dieser Effekt vermutlich bereits eine Rolle, so dass $R_{i,P} > R_{i,S}$.

5 Maximalleistung

Interessant für technische Anwendungen der Brennstoffzelle als Stromquelle ist die maximal erreichbare elektrische Leistung. Mit der Serienschaltung unserer beiden Zellen erhielten wir die Maximalleistung bei einem Strom von 1.99 A und einer Spannung von 0.880 V zu

$$P_{\max,S} = 1.75 \, \text{W} \quad (9)$$

Bei dieser Messung betrug der externe Widerstand (Verbraucher) nur 0.3 Ω . Bei größeren oder noch kleineren Widerständen (Kurzschluss) war die Leistung geringer.

Bei Parallelschaltung von zwei Zellen lag die Maximalleistung in der gleichen Größenordnung:

$$P_{\max,P} = 1.60 \, \text{W} \quad (10)$$

Dieser Wert wurde bei einem Kurzschluss erreicht ($U = 0.345 \, \text{V}$, $I = 4.65 \, \text{A}$).

6 Die Koeffizienten der Tafelgleichung

Im Bereich niedriger Ströme sind die U - I -Kennlinien nicht linear, sondern zeigen einen annähernd exponentiellen Abfall (vgl. Abbildung 3 und 5). Wie oben bereits erwähnt, ist der bestimmende Faktor in diesem Fall eine elektrokinetische Hemmung der Reaktion durch die aufgebaute Spannung. Aus Überlegungen zur Kinetik chemischer Reaktionen kann man dafür folgende Formel herleiten

$$I = I_0 \left(e^{-\frac{\alpha F U}{R T}} - e^{-\frac{(1-\alpha) F U}{R T}} \right) \quad (11)$$

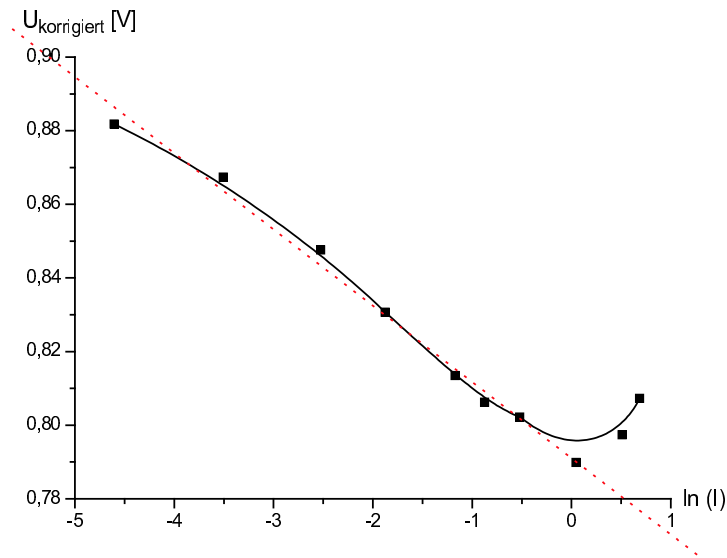


Abbildung 7: Auftragung von U über $\ln I$ zur Überprüfung der Tafel-Gleichung bei der Reihenschaltung der Zellen. Im Bereich kleiner Ströme wurden die Messdaten durch eine Gerade interpoliert.

Dabei ist F die Faraday-Konstante, R die allgemeine Gaskonstante und T die absolute Temperatur. I_0 und α sind charakteristische Koeffizienten der Zelle. Für großes U wird einer der beiden Exponentialterme in (11) vernachlässigbar und durch Umkehrung der so vereinfachten Gleichung erhält man die Tafelgleichung

$$U = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = \frac{RT}{\alpha F} (\ln I_0 - \ln I) \quad (12)$$

Für nähere Informationen zur Herleitung und Bedeutung diese Gleichungen verweisen wir auf die Versuchsbeschreibung aus dem Internet.

6.1 Reihenschaltung

Wir werden die Koeffizienten der Tafelgleichung zunächst für die Reihenschaltung der Brennstoffzellen berechnen.

Dabei ist zu beachten, dass für die Tafelgleichung die Spannung benötigt wird, die direkt an den Elektroden anliegt. Deshalb muss aus den Messwerten für U zunächst der Einfluss des Innenwiderstandes herausgerechnet werden. Außerdem muss man sich bei der Rechnung auf eine einzelne Zelle beschränken, d.h. die gemessenen Werte für die Reihenschaltung müssen zuvor halbiert werden. Wir werden im Folgenden mit der korrigierten Spannung $U_{\text{kor}} = \frac{U_{\text{mess}}}{2} + R_{i,S}I$ rechnen. (Zur Berechnung des Innenwiderstandes, vgl. Abschnitt 4.)

Um das exponentielle Verhalten zu überprüfen, tragen wir die Spannung über $\ln I$ auf (Abbildung 7). Wie man sieht, ist der erwartete lineare Zusammenhang auch im Bereich kleiner Ströme nicht sehr ausgeprägt. Wir haben trotzdem versucht, die ersten sieben Messpunkte durch eine Regressionsgerade anzunähern. Eine numerische Rechnung lieferte uns hierfür folgende Gleichung

$$U_{\text{korr}} = a_0 + a_1 \cdot \ln I = (0.7910 \pm 0.0025) - (0.0207 \pm 0.0010) \cdot \ln I \quad (13)$$

Durch Vergleich mit der Tafelgleichung (12) erhält man als Berechnungsformel für α

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{RT}{a_1 F} = 1.219 \pm 0.058 \\ \Delta\alpha &= \Delta a_1 \cdot \frac{RT}{a_1^2 F} = 0.058 \end{aligned} \quad (14)$$

Für die Berechnung des Messfehlers wurde nur der statistische Fehler von a_1 berücksichtigt, denn da die Messwerte relativ stark von der Geraden abweichen ist dies der dominante Einfluss.

Der erhaltene Wert für α ist offensichtlich sinnlos, denn aus der theoretischen Herleitung der Tafelgleichung (siehe Versuchsbeschreibung) folgt, dass α angibt, welchen Prozentsatz der an den Elektroden liegenden Gegenspannung die Reaktionspartner überwinden müssen, um in den angeregten Zustände zu gelangen, in dem sie miteinander reagieren können. Demzufolge müsste $\alpha < 1$ sein.

Trotz dieses sehr problematischen Ergebnisses haben wir versucht, auch für I_0 einen Wert zu ermitteln. Aus der Tafelgleichung folgt dafür

$$I_0 = e^{\frac{a_0 \alpha F}{RT}} \approx e^{38} \text{ A} \quad (15)$$

Dieser Wert liegt in der Größenordnung 10^{16} und ergibt daher keinen Sinn.

Der Grund für diese offensichtlich falschen Ergebnisse könnte sein, dass in dem untersuchten Wertebereich die Tafelgleichung noch nicht gilt, sondern noch andere Einflüsse wie der ohmsche Innenwiderstand oder ein unbekannter Effekt das Verhalten der Brennstoffzelle beeinflussen.

Außerdem gilt bei der Herleitung der Tafelgleichung der Schritt von Gleichung (11) auf (12) nur für große Spannungen. Möglicherweise sind die von uns maximal erreichten 1.8 V noch viel zu niedrig, so dass man die Tafelgleichung überhaupt nicht anwenden dürfte.

Diese Vermutung wird dadurch bestätigt, dass der angenommene lineare Zusammenhang in Abbildung 7 nur mit viel Phantasie zu erkennen ist.

6.2 Parallelschaltung

Bei der Parallelschaltung der Brennstoffzellen waren die erhaltenen Werte noch unsinniger als bei der Reihenschaltung.

Auch hier gingen wir von der Auftragung der korrigierten Spannung $U_{\text{korr}} = U_{\text{mess}} + R_{i,P}I$ über $\ln I$ aus, wie sie in Abbildung 8 gezeigt ist.

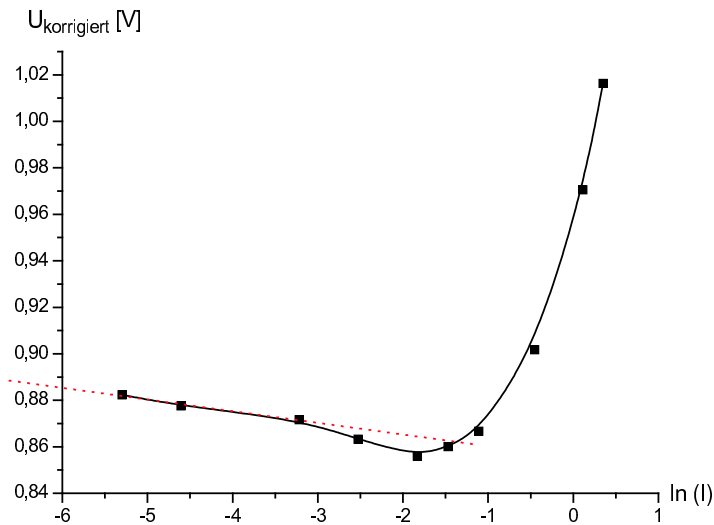


Abbildung 8: Auftragung von U über $\ln I$ zur Überprüfung der Tafel-Gleichung bei Parallelschaltung der Zellen. Im Bereich kleiner Ströme wurden die Messdaten durch eine Gerade interpoliert.

Hier liegen nur die ersten drei Messwerte auf einer Geraden. Völlig analog zum Vorgehen bei der Serienschaltung wurden sie durch eine Regressionsgerade angefitet. Deren Gleichung lautet hier:

$$U_{\text{korrt}} = a_0 + a_1 \cdot \ln I = (0.8552 \pm 0.0026) - (0.0050 \pm 0.0006) \cdot \ln I \quad (16)$$

Daraus errechnen sich α und I_0 wie oben:

$$\alpha = \frac{RT}{a_1 F} = 5.017 \pm 0.590 \quad (17)$$

$$\Delta\alpha = \Delta a_1 \cdot \frac{RT}{a_1^2 F} = 0.590$$

$$I_0 = e^{\frac{a_0 \alpha F}{RT}} \approx e^{170} \text{ A} \quad (18)$$

Diese Ergebnisse legen wie oben nahe, dass wir uns außerhalb des Gültigkeitsbereichs der Tafelgleichung befinden.

7 Untersuchungen zum Wirkungsgrad

7.1 Der Wirkungsgrad einer Zelle

Besonders unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten ist der technische Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle interessant, d.h. der Prozentsatz der Primärener-

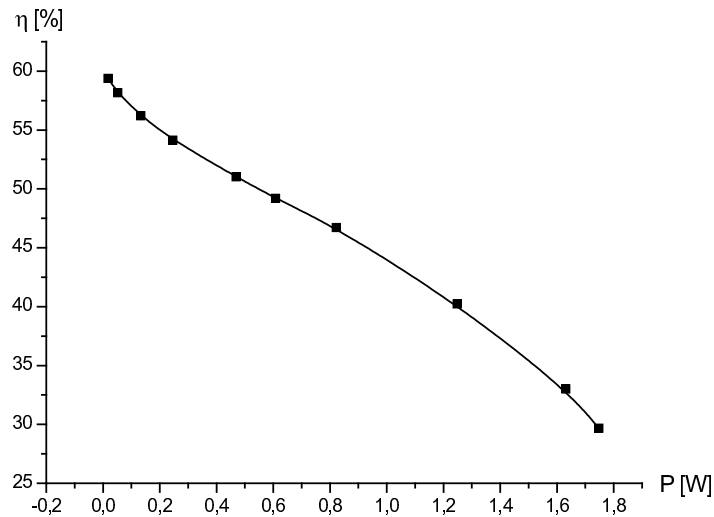


Abbildung 9: Der Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung. Die Daten wurden aus den Messwerten bei Serienschaltung zweier Brennstoffzellen ermittelt.

gie, der am Ausgang der Zelle nutzbar ist. Er ist definiert durch

$$\eta_{\text{tech}} = \frac{zFU}{\Delta H} \quad (19)$$

Dabei ist z die Anzahl der Ladungsübergänge, die zur Bildung eines Moleküls des Endprodukts nötig sind — für Wasser also 2. F ist die Faraday-Konstante, U die Ausgangsspannung der Zelle und ΔH die Reaktionsenthalpie der Zellenreaktion. Für genauere Informationen zu dieser Definition verweisen wir wiederum auf die Versuchsbeschreibung.

Wir werden die Formel (19) nun auf die Kennlinie für die Reihenschaltung (Abbildung 3) anwenden. Dabei ist zu beachten, dass hier mit U die Spannung an *einer* Zelle gemeint ist, d.h. die Messwerte müssen zuvor durch 2 geteilt werden.

In Abbildung 9 ist der so berechneten Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung dargestellt. Charakteristisch ist der monotone Abfall des Wirkungsgrades mit zunehmender Leistung.

Darin unterscheidet sich die Brennstoffzelle grundlegend von anderen Energiequellen wie Verbrennungsmotoren. Diese haben sowohl bei sehr niedrigen als auch bei sehr hohen Leistungen einen geringen Wirkungsgrad. Bei niedriger Leistung geht dort sehr viel thermische Energie ungenutzt verloren, bei hohen Leistungen begrenzen die Reibungsverluste den Wirkungsgrad. Dazwischen liegt ein Maximum von η .

Insgesamt ist der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle deutlich höher als bei Verbrennungsmotoren. Während unsere einfache Brennstoffzelle bereits einen Wirkungsgrad von 60 % erreichte, kommt ein Ottomotor gerade auf 20 % und selbst die besten Die-

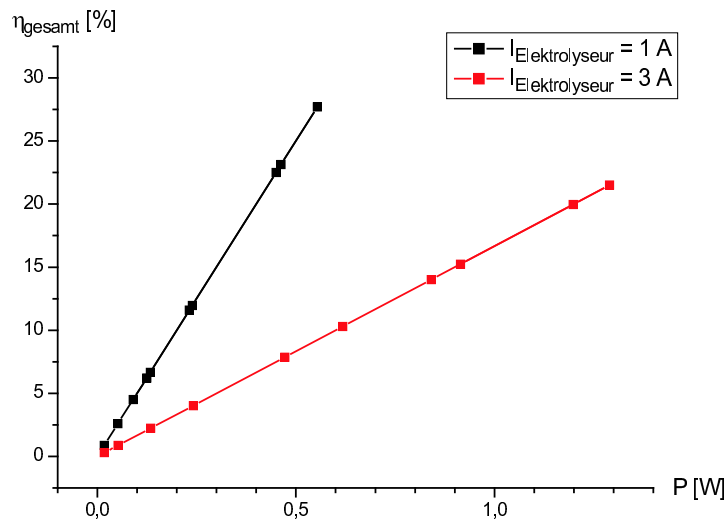


Abbildung 10: Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems aus Elektrolyseur und Brennstoffzelle in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung.

selbstmotoren schaffen nicht über 50 %. Technisch ausgereifte Brennstoffzellen erreichen Wirkungsgrade bis zu 80 %.

7.2 Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems aus Elektrolyseur und Brennstoffzelle

Abschließend wollen wir noch den Wirkungsgrad der gesamten Versuchsanordnung aus Elektrolyseur und Brennstoffzelle bestimmen. Dies ist interessant, da ja auch bei praktischen Anwendungen der Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser gewonnen werden muss.

Der Elektrolyseur wurde dazu bei einer konstanten Spannung von 2 V und Strömen von 1 A bzw. 3 A betrieben. Dies entspricht Leistungen von 2 bzw. 6 W.

Abbildung 10 zeigt den Wirkungsgrad des Systems in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung für verschiedene Elektrolyseurströme.

Es ist nicht überraschend, dass ein linearer Zusammenhang vorliegt, denn da der Elektrolyseur mit konstanter Leistung betrieben wird, ist das System umso effizienter, je mehr Leistung am Ausgang der Brennstoffzelle abgreifbar ist.

Insgesamt sind die Wirkungsgrade deutlich niedriger als die in Abschnitt 7.1 für eine Brennstoffzelle allein ermittelten. Dies zeigt, dass bereits im Elektrolyseur ein Teil der Leistung ungenutzt verloren geht, z.B. durch Wärmeverluste oder durch spontane Rekombination von bereits getrennten Wasserstoff- und Sauerstoffmolekülen.

Bei niedrigerem Elektrolyseurstrom ist der Wirkungsgrad generell größer. Dies deutet darauf hin, dass die Zelle den zur Verfügung stehenden Wasserstoff nur bei geringen Gaskonzentrationen vollständig nutzen kann.

8 Fazit

Aus unseren Experimenten ist ersichtlich, dass eine Brennstoffzelle ein kompliziertes elektrochemisches System ist, das oft nur unzureichend durch einfache Gleichungen beschrieben wird. Dennoch ist eine Brennstoffzelle viel einfacher aufgebaut als andere Energiewandler wie z.B. Verbrennungsmotoren.

Ihr hoher Wirkungsgrad lässt die Brennstoffzelle als eine sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvolle Alternative zu fossilen Brennstoffen erscheinen.

Allerdings ist zu bedenken, dass die Primärenergie in Form von Wasserstoff auch zuerst durch Elektrolyse von Wasser gewonnen werden muss. Hierzu benötigt man elektrischen Strom aus anderen Energiequellen wie z.B. großen Photovoltaikanlagen in Wüstengebieten oder der Kernkraft. Solange dieses Problem nicht gelöst ist, wird die Brennstoffzelle nur in Nischen wie z.B. der Raumfahrt Einsatz finden.