

# **Versuch: Brennstoffzelle (17.11.2002)**

## **Inhalt:**

- |    |                          |         |
|----|--------------------------|---------|
| 1. | Einführung zum Versuch   | Seite 1 |
| 2. | Messungen und Auswertung | Seite 1 |

## **1. Einführung zum Versuch**

Im Zusammenhang mit regenerativen Energiequellen werden gerade auch in letzter Zeit Brennstoffzellen als eine von möglichen Alternativen zu den herkömmlichen (meist fossilen) Energieträgern diskutiert. Die Beschäftigung mit dieser Art der Energie-, „Erzeugung“ steht nun auch bei diesem Versuch im Fordergrund. Dabei sollen Kennlinien einer Brennstoffzelle (d.h. die Zellspannung in Abhängigkeit vom Entnahmestrom) unter verschiedenen Bedingungen aufgezeichnet werden, um daraus charakteristische Größen der Zelle (z.B. Innenwiderstand und Wirkungsgrad) zu bestimmen.

## **2. Messungen und Auswertung**

### **2.1 Bestimmung der Leckströme**

Bei einer Brennstoffzelle kann es vorkommen, dass Elektronen innerhalb einer Zelle transportiert werden, anstatt dass sie zum nutzbaren Strom zwischen den Elektroden beitragen. Außerdem kann Wasserstoff wegen seiner großen Diffusionsfähigkeit aus der Zelle durch deren Wände austreten. Im folgenden soll nun der gesamte sog. Leckstrom abgeschätzt werden, welcher durch die beiden genannten Verlustmechanismen zustande kommt.

Zu diesem Zweck wird der Wasserstoffbehälter gefüllt und die Zelle von jeglichen Stromkreisen getrennt. Man misst dann anhand der auf dem Behälter aufgedruckten Skala die noch vorhandene  $H_2$ -Menge<sup>1</sup> nach 5, 10 und 15 Minuten. Aus diesem Volumenverlust kann man dann auf den Ladungsverlust (d.h. den entsprechenden elektrischen Strom zurückrechnen (siehe unten).

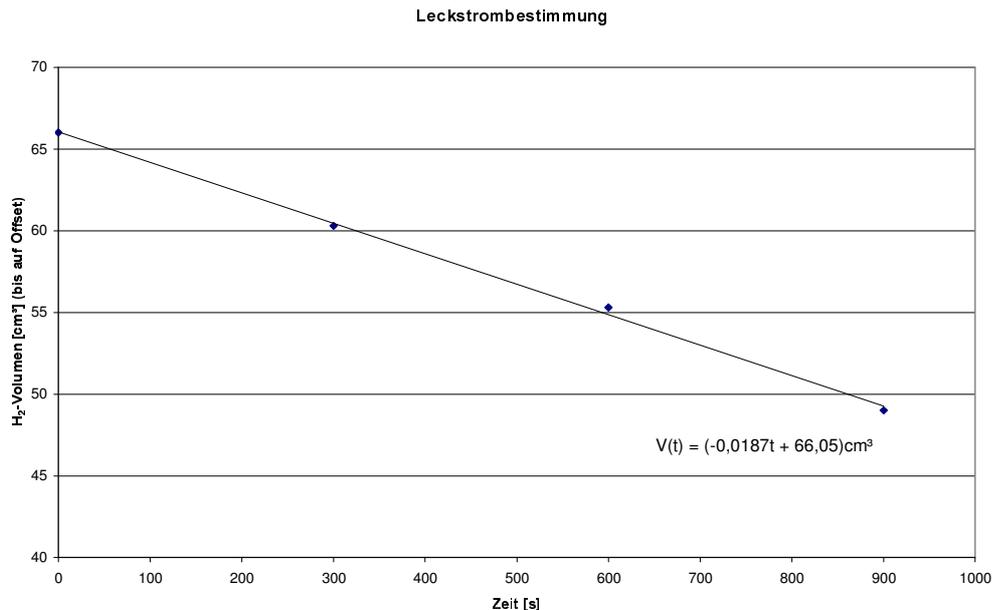
Wir erhielten folgende Ergebnisse:

---

<sup>1</sup> Der Nullpunkt auf der Skala entspricht genau genommen nicht dem Volumennullpunkt, jedoch liegt eine konstante Differenz vor und der im folgenden wichtige Volumenverlust pro Zeit wird durch die Skalenwahl nicht beeinflusst.

Zeit [s]	Wasserstoffvolumen [ml]
0	66,0
300	60,3
600	55,3
900	49,0

Trägt man die Werte in ein Diagramm ein, so erkennt man, dass sich in sehr guter Näherung eine Gerade ergibt, d.h. der Volumenverlust pro Zeiteinheit ist konstant.



Das Diagramm enthält auch bereits die Regressionsgerade einschließlich deren Geradengleichung. Man erhält für die Volumenänderung pro Zeit, also die Steigung der Geraden:

$$\frac{dV}{dt} = -0,0187 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \quad (\text{rel. Fehler: ca. } \pm 3\%)$$

Der (statistische) Fehler wurde dabei mit der linearen Regressionsfunktion des Tabellenkalkulationsprogramms bestimmt.

Um aus diesem „Volumenstrom“ nun auf einen elektrischen Strom schließen zu können, nehmen wir an, dass der Wasserstoff in der Zelle unter Atmosphärendruck steht. Dann nimmt 1 Mol  $\text{H}_2$  ein Volumen von 22,4l ein. Unter Verwendung der Faraday-Konstanten  $F = N_A \cdot e$  ( $N_A$ : Avogadrozahl,  $e$ : Elementarladung) erhält man schließlich den gesuchten Leckstrom:

$$I_{\text{Leck}} = \left| \frac{dQ}{dt} \right| = \left| -0,0187 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{22,4 \text{ l}} \cdot 2 \cdot F \right| \approx 0,16 \text{ A} \quad (\pm 3\%)$$

Man beachte dabei, dass pro Wasserstoffmolekül zwei Elektronen eingerechnet werden müssen!

## 2.2 Messung der Kennlinie ohne Volumenbeschränkung

Nun kommen wir zur Bestimmung der Kennlinien. Dazu wird im ersten Versuchsteil der Elektrolyseur mit einem Strom von 4A betrieben und die Schlauchklemmen an den Ausgängen der Zellen werden geschlossen. Dann füllen sich die Vorratsbehälter mit Wasserstoff bzw. Sauerstoff

und die Zelle kann praktisch unbegrenzt viel Gas verbrauchen (d.h. es steht mehr Gas zur Verfügung als in der Brennstoffzelle umgesetzt werden kann). Man spricht hier daher von einer Messung ohne Volumenstrombeschränkung.

Zum Aufzeichnen der Kennlinie wird die Zelle mit verschiedenen Widerständen belastet und die Zellspannung in Abhängigkeit vom abgegebenen Strom gemessen. Dabei ist darauf zu achten, dass man vor dem Ablesen so lange wartet, bis sich die von den Messgräten angezeigten Werte einigermaßen stabilisiert haben.

Der Versuchsaufbau im Praktikum enthält zwei Brennstoffzellen, die sich bei den Messungen wahlweise parallel oder in Reihe schalten lassen.

**a) Parallelschaltung**

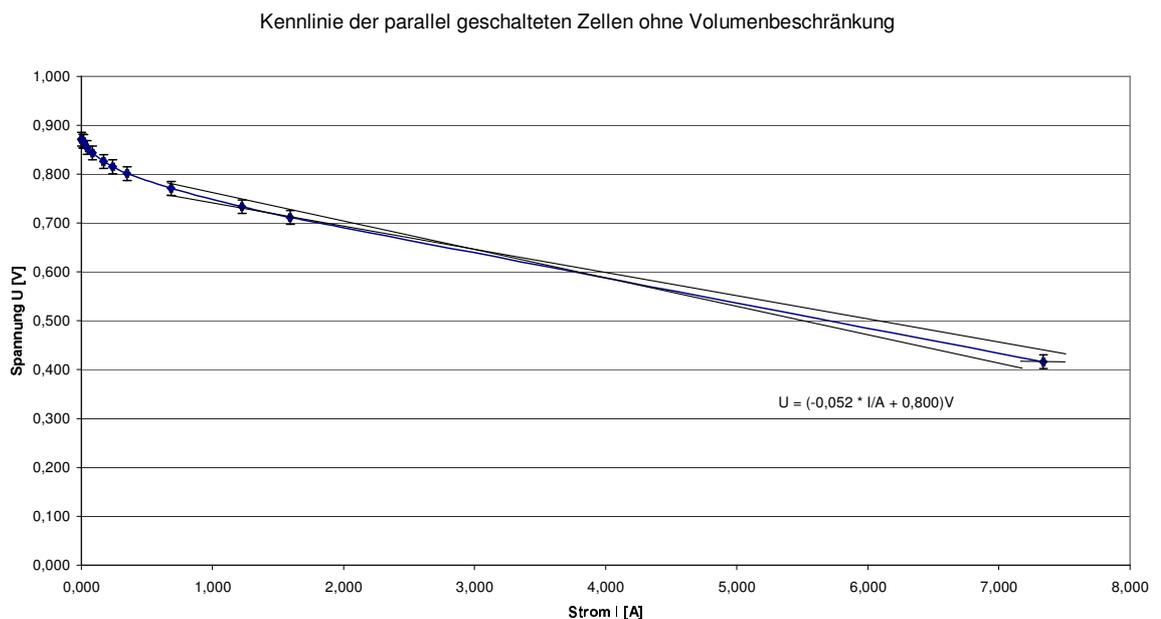
Mit den parallel geschalteten Zellen wurden insgesamt drei Strom-Spannungs-Messreihen aufgenommen.

*Anmerkung: Im Protokollheft sind vier Messreihen zu finden. Allerdings stellte sich schon im Praktikum heraus, dass die erste davon stark von den anderen abweicht. Aus diesem Grund haben wir sie in der Auswertung nicht berücksichtigt.*

Aus den drei Messreihen wurde nun für jeden Lastwiderstand ein Durchschnitt für die jeweiligen Ströme und Spannungen berechnet. Dabei erhält man folgendes Ergebnis (wobei für den Widerstand  $R=0$  die Zelle kurzgeschlossen und im Fall  $R=\infty$  die Leerlaufspannung der Zelle (ohne Belastung) gemessen wurde):

R [ $\Omega$ ]	$\infty$	100	50	20	10	5	3	2	1,0	0,5	0,3	0
U [V]	0,871	0,867	0,867	0,854	0,843	0,826	0,815	0,801	0,771	0,734	0,711	0,416
I [A]	0,000	0,009	0,019	0,043	0,084	0,168	0,239	0,349	0,685	1,225	1,593	7,340

Im Diagramm dargestellt, sieht die erhaltene Kennlinie wie folgt aus:



Im Diagramm sind bereits Fehlerbalken für die einzelnen Durchschnittswerte sowie neben der Messkurve zwei weitere Geraden eingezeichnet, auf die wir weiter unten zurückkommen werden. Nun aber zunächst zur Berechnung der Fehlerbalken:

Während der Auswertung zeigte sich, dass zwischen den Werten der drei verwendeten Messreihen, ganz abgesehen davon, dass die Messwerte für  $I$  schon teilweise während des Ablesens relativ stark schwankten, so große Differenzen bestehen, dass die durch die Messgeräte verursachten Fehler im Vergleich hierzu vernachlässigbar sind. Zu den beobachteten Schwankungen fiel konkret noch auf, dass nach dem Kurzschließen der Zelle (bei der Aufzeichnung der Werte für „ $0\Omega$  Widerstand“) die Leerlaufspannung beim Beginn der jeweils folgenden Reihe deutlich höher war als zuvor. Der Betreuer erklärte uns, dass bei Kurzschluss durch den hohen Stoffumsatz am Katalysator in der Zelle derselbe „freigewaschen“ wird, und hierdurch eine Optimierung der Vorgänge in der Zelle für die folgende Zeit eintritt. Es stellt sich nun die Frage, wie dieser übermächtige, durch die Chemie verursachte Fehler zu quantifizieren und zu verrechnen ist. Wir haben hier den – freilich sehr groben – Ansatz gewählt, den Fehler für die Diagrammwerte anhand der höchsten Differenz, die zwischen den Werten der Reihen auftritt, abzuschätzen. Dabei werden hier die untersten Stromwerte der Reihen gesondert betrachtet, um den besonders starken Schwankungen derselben Rechnung zu tragen. Es ergibt sich für die Spannung  $U$  der Fehler als Differenz zwischen den im Protokollheft dunkelblau eingekringelten Werten von  $0,01\text{V}$  (die gestrichelt markierten Werte differieren zwar noch mehr, jedoch scheint es sich hier bei Betrachtung der Messreihe um einen Ausreißer zu handeln). Der Strom  $I$  für die ersten 11 Messwerte ist nach derselben Methode (orange Kringel) mit einem Fehler von  $0,014\text{A}$  behaftet, der letzte Strom-Messwert (graue Kringel) mit einem Fehler von ca.  $0,3\text{A}$ .

Nun werden wir mithilfe der Messwerte die maximale **Leistung** der parallelgeschalteten Zellen bestimmen. Für jedes Messwertpaar wurde hierzu der Wert  $U \cdot I$  berechnet; die maximale Leistung ergab sich schließlich im Kurzschlussfall. Ihr Wert beträgt:

$$P_{\max} \approx 3,1\text{W}$$

Der Fehler der maximalen Leistung wird mittels linearer Fehlerfortpflanzung berechnet, da die Fehler für  $U$  und  $I$  statistisch nicht als unabhängig angesehen werden können ( $U/I = \text{const} !$ ). Es ergibt sich ein Fehler von:

$$\Delta P_{\max} \approx \pm 0,2\text{W}$$

Wir bestimmen jetzt den **Innenwiderstand** der Zellenkombination. Hierzu betrachten wir den Ohmschen Bereich der Kennlinie, das sind in unserem Fall die letzten 4 Messwerte; es ergibt sich hierfür ein linearer Zusammenhang zwischen  $U$  und  $I$  wie im Diagramm angegeben. Der Betrag der Steigung in der Geradengleichung ist der Ohmsche Widerstand der Zelle von

$$R_i \approx 0,052\Omega$$

Der Fehler für den Widerstand wird nun eruiert, indem man zunächst ins  $U$ - $I$ -Diagramm die erwähnten zwei Geraden einzeichnet, die die im Rahmen der Fehlerbalken maximal bzw. minimal mögliche Steigung für die  $U(I)$ -Gerade besitzen. Man betrachtet nun die beiden Winkel der eingezeichneten Geraden zur Horizontalen und erhält hiermit einen „Winkelfehler“ von  $\pm 1,5^\circ \approx \pm 0,026(\text{rad})$ . Dieser Winkelfehler entspricht mit der Kleinwinkelnäherung für den Tangens einem Steigungsfehler  $\Delta y/\Delta x$  von genau demselben Wert. Hier ist jedoch noch nicht eingerechnet, dass die Achsen im Diagramm nicht gleich skaliert sind. Entspräche einem Skalenteil jeweils ein cm, so erhielte man beim betrachteten Ausdruck des Diagramms (Dieser war gegenüber dem hier vorliegenden zweckmäßigerweise noch vergrößert) statt einem gedachten, mit dem Lineal gemesse-

nen Höhenwert  $y$  eines Punktes einen Wert  $y_{norm} \approx y/11,9$ ; für einen Rechtswert entsprechend  $x_{norm} \approx x/2,9$ . Es gilt also für den tatsächlichen Steigungsfehler:

$$\Delta m = \Delta \left( \frac{y_{norm}}{x_{norm}} \right) \approx \frac{2,9}{11,9} \cdot \Delta \left( \frac{y}{x} \right) \approx \pm 0,006$$

Dieser tatsächliche Steigungsfehler im Diagramm entspricht, wenn man die Einheiten im Diagramm betrachtet, direkt einem Widerstandsfehler von:

$$\Delta R_i \approx \pm 0,006 \Omega$$

Zuletzt möchten wir für die Parallelschaltung noch **Austauschstrom**  $I_0$  und **Transferkoeffizienten**  $\alpha$  der Zelle bestimmen. Dazu benutzen wir die sog. Tafelgleichung

$$U = \frac{RT}{\alpha F} \cdot \ln \frac{I_0}{I}$$

Hier ist  $\alpha$  der Transferkoeffizient,  $I_0$  der Austauschstrom,  $R$  die allg. Gaskonstante,  $T$  die Temperatur,  $F$  die Faradaykonstante,  $I$  der von der Zelle abgegebene Strom und  $U$  der elektrokinetisch bedingte Spannungsabfall, der bei diesem Strom auftritt. In der Anleitung wird beschrieben, dass es sich bei diesem Spannungsabfall praktisch ausschließlich um den an der Sauerstoffelektrode auftretenden Effekt handelt, da die Vorgänge an der Wasserstoffelektrode vernachlässigbar sind. Für die zu verwendende Spannung  $U$  ist zu beachten, dass diese nicht direkt der Messung zugänglich ist. Man misst vielmehr die Leerlaufspannung der Zelle  $U_0$  sowie die zum abgegebenen Strom gehörige Ausgangsspannung  $U_{mess}$  und korrigiert letztere durch den am ohmschen Innenwiderstand auftretenden Spannungsabfall  $U_R$ . Damit ergibt sich für die Spannung  $U$  der Zusammenhang

$$U = U_{mess} - U_R - U_0 = U_{mess} - I \cdot R - U_0$$

Um nun den Austauschstrom aus der Tafelgleichung zu bestimmen, verwenden wir zwei Wertepaare  $(U_1, I_1)$  bzw.  $(U_2, I_2)$  und eliminieren aus der Tafelgleichung die noch unbekannte Größe  $\alpha$ . Auflösen nach  $I_0$  ergibt:

$$I_0 = \frac{I_1 \frac{1}{1 - (U_1/U_2)}}{I_2 \frac{1}{(U_2/U_1)^{-1}}}$$

Die Rechnung führen wir dabei mit den Werten für den Lastwiderstand  $R=0,3\Omega$  und  $R=1\Omega$  durch (diese Wahl ist aber beliebig):

$$\begin{array}{ll} I_1=1,593\text{A} & U_1=-0,243\text{V} \\ I_2=0,685\text{A} & U_2=-0,136\text{V} \end{array}$$

Die beiden Spannungen wurden dabei bereits mit obiger Beziehung errechnet (unter Verwendung des oben bestimmten Innenwiderstands).

Man erhält schließlich

$$I_0 \approx 0,23\text{A}.$$

Wir lösen nun, um  $\alpha$  zu erhalten, die Tafelgleichung entsprechend auf und setzen die Konstanten, das zweite  $(U/I)$ -Wertepaar sowie eine Temperatur von 298K ein:

$$\alpha = \frac{RT}{U_2 F} \ln \left( \frac{I_0}{I_2} \right) \approx 0,21.$$

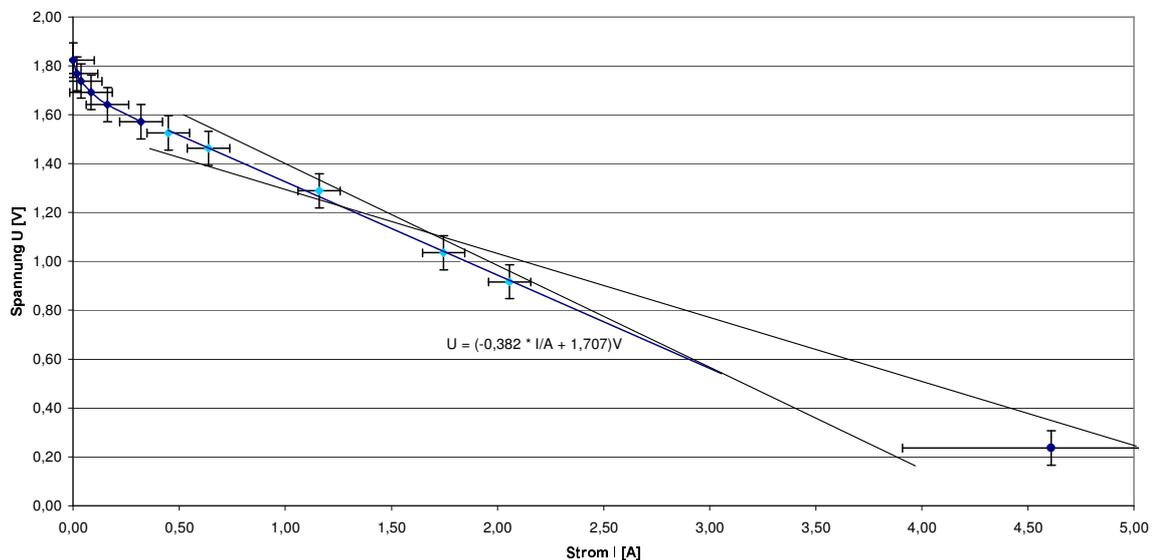
**b) Serienschaltung**

Mit den seriell geschalteten Zellen wurden nun auch drei Strom-Spannungs-Messreihen aufgenommen; hier haben wir keine überzählige Messung durchgeführt.

Für die U-I-Kennlinie erhalten wir hier als Messwerte und Diagramm:

R [Ω]	∞	100	50	20	10	5	3	2	1,0	0,5	0,3	0
U [V]	1,823	1,767	1,737	1,692	1,641	1,571	1,525	1,462	1,289	1,035	0,917	0,236
I [A]	0,000	0,018	0,037	0,085	0,162	0,320	0,449	0,638	1,160	1,746	2,057	4,610

Kennlinie der in Reihe geschalteten Zellen ohne Volumenbeschränkung



Es ergibt sich analog oben bei diesem Versuch für die Spannung  $U$  der Fehler zu ca. 0,07V (siehe im Protokollheft grün markierte Werte). Der Strom  $I$  ist für die ersten elf Werte mit einem Fehler von ca. 0,1A (siehe hellblaue Kringel) behaftet, der letzte Strom-Messwert (graue, gestrichelte Kringel) mit einem Fehler von ca. 0,7A; aufgrund dieser großen Schwankungsbreite wurde dieser Wert auch von der Regression im Diagramm ausgenommen, es tragen hier nur die hellblauen Punkte bei. Die beiden Extremalgeraden sind jedoch sinnvollerweise so ausgelegt, dass sie auch den letzten Messwert innerhalb seines Fehlers überstreichen.

Die maximale **Leistung** der Reihenschaltung findet man beim Lastwiderstand  $R=0,3\Omega$ . Sie beträgt

$$P_{max} \approx 1,9W$$

Der Fehler der maximalen Leistung wird wieder über lineare Fehlerfortpflanzung berechnet, hiermit erhalten wir:

$$\Delta P_{max} \approx \pm 0,2W$$

Den **Innenwiderstand** der Zellenkombination lesen wir wiederum an der Gleichung der Regressionsgeraden ab:

$$R_i \approx 0,38\Omega$$

Mit der oben beschriebenen Methode, aber diesmal ohne Anwendung der Kleinwinkelnäherung (die auftretenden Winkel sind zu groß) ergibt sich hier:

$$\Delta m = \Delta \left( \frac{y_{norm}}{x_{norm}} \right) \approx \frac{4,5}{5,9} \cdot \Delta \left( \frac{y}{x} \right) = \frac{4,5}{5,9} \cdot \pm 0,105 \approx \pm 0,08$$

Dieser tatsächliche Steigungsfehler im Diagramm entspricht wiederum einem gleichwertigen Widerstandsfehler von:

$$\Delta R_i \approx \pm 0,08\Omega$$

Wir berechnen nun wieder den **Austauschstrom** und den **Transferkoeffizienten** aus der Tafelgleichung mittels der oben schon gegebenen Beziehung:

$$I_0 = \frac{I_1 \frac{1}{1 - (U_1/U_2)}}{I_2 \frac{1}{(U_2/U_1)^{-1}}}$$

Die hier verwendeten Wertepaare sind:

$$\begin{array}{lll} I_1 = 2,057\text{A} & U_1 = -1,688\text{V} & (\text{bei } 0,3\Omega) \\ I_2 = 1,160\text{A} & U_2 = -0,975\text{V} & (\text{bei } 1,0\Omega) \end{array}$$

Die beiden Spannungen wurden dabei bereits mit der bekannten Beziehung errechnet (unter Verwendung des oben bestimmten Innenwiderstands).

Man erhält schließlich

$$I_0 \approx 0,53\text{A}.$$

Wir erhalten daraus nun analog oben den Transferkoeffizienten durch einsetzen mit dem Wertepaar  $(I_2, U_2)$ :

$$\alpha = \frac{RT}{U_2 F} \ln \left( \frac{I_0}{I_2} \right) \approx 0,021.$$

Bei der Serienschaltung sollte nun zusätzlich noch der **technische Wirkungsgrad** in Abhängigkeit vom abgegebenen Strom ermittelt werden. Dieser berechnet sich über

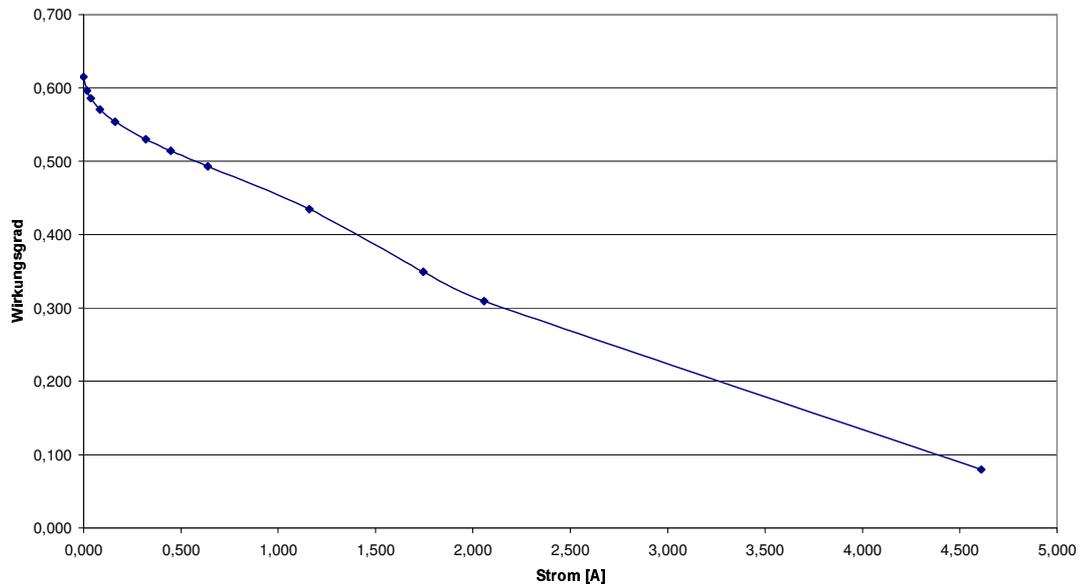
$$\eta_{tech} = \frac{nFU}{|\Delta H|}$$

wobei in unserem Fall  $n=2$  (Anzahl der ausgetauschten Elektronen) und  $|\Delta H| = 286 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kmol}}$  (Reaktionsenthalpie der Knallgasreaktion) ist. Als Spannung ist freilich nur der Wert einer Zelle einzusetzen, also die Hälfte des gemessenen Wertes.

Aus unseren Messwerten ergeben sich folgende Werte:

R [ $\Omega$ ]	$\infty$	100	50	20	10	5	3	2	1,0	0,5	0,3	0
$\emptyset$ U <sub>mess</sub> [V]	1,823	1,767	1,737	1,692	1,641	1,571	1,525	1,462	1,289	1,035	0,917	0,236
I [A]	0,000	0,018	0,037	0,085	0,162	0,320	0,449	0,638	1,160	1,746	2,057	4,610
Wgrad.	0,615	0,596	0,586	0,571	0,554	0,530	0,514	0,493	0,435	0,349	0,309	0,080

Technischer Wirkungsgrad der Brennstoffzelle



Man erkennt, dass der Wirkungsgrad mit zunehmendem Strom, also grob mit zunehmender Leistung (dass dieser Zusammenhang gilt, wurde oben untersucht) abnimmt. In dieser Hinsicht unterscheidet sich eine Brennstoffzelle von einem Kolbenmotor. Beim Ottomotor z.B. ist der Wirkungsgrad an der Stelle mit maximalem Drehmoment am höchsten und nicht etwa bei minimaler Leistung (vielmehr im mittleren Drehzahlbereich und damit auch im Bereich mittlerer Leistungsabgabe).

### 2.3 Messung der Kennlinie mit Volumenbeschränkung

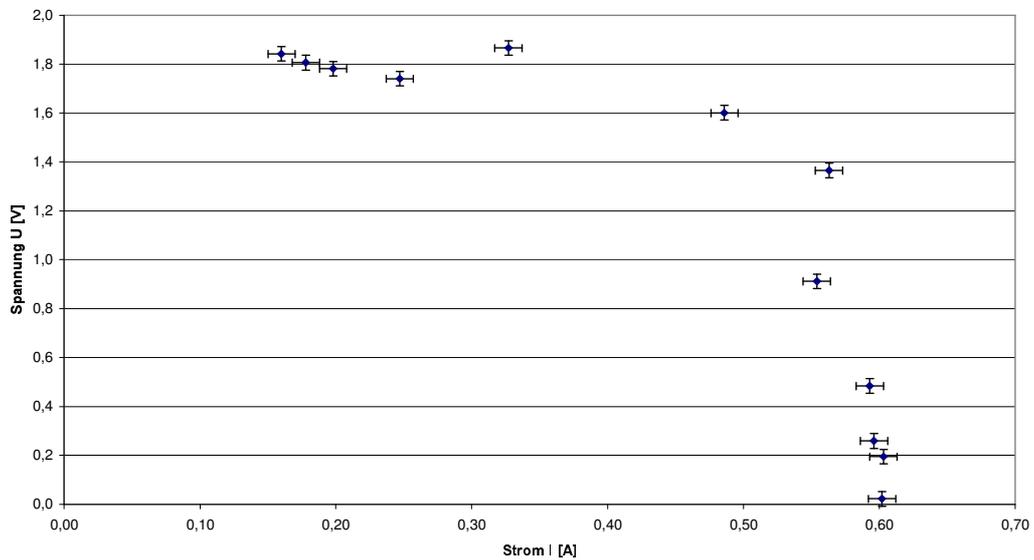
Nun beobachten wir Strom-Spannungs-Kennlinien der Brennstoffzelle, falls diese nur ein bestimmtes  $H_2/O_2$ -Volumen pro Zeit „geliefert“ bekommt. Diese Einschränkung wird im Versuch dadurch erreicht, dass einerseits der Elektrolyseur bei niedrigeren Strömen von 1A bzw. 3A betrieben wird und andererseits die Schlauchklemmen geöffnet werden, so dass in den Vorrattanks keinerlei Gas zum Betrieb bereit gehalten wird, also nur das im Moment erzeugte Gas von der Zelle verwertet werden kann. Die Zellen wurden in diesem Versuchsteil nur in Reihenschaltung betrieben; die Strom-Spannungs-Kennlinien wurden jeweils nur einmal pro Elektrolyseurstrom-Wert aufgezeichnet, da auch die quantitative Auswertung nicht in demselben Maßstab wie unter 2.2 erfolgen wird und eine fehler-senkende Mehrfachmessung nicht verlangt ist. Zu den untenstehenden Strommesswerten wurde der Leckstrom, der die Zelle belastet, aber im Strommesswert freilich zunächst nicht zu sehen ist, als Korrektur addiert.

Das sind also unsere Werte und Diagramme:

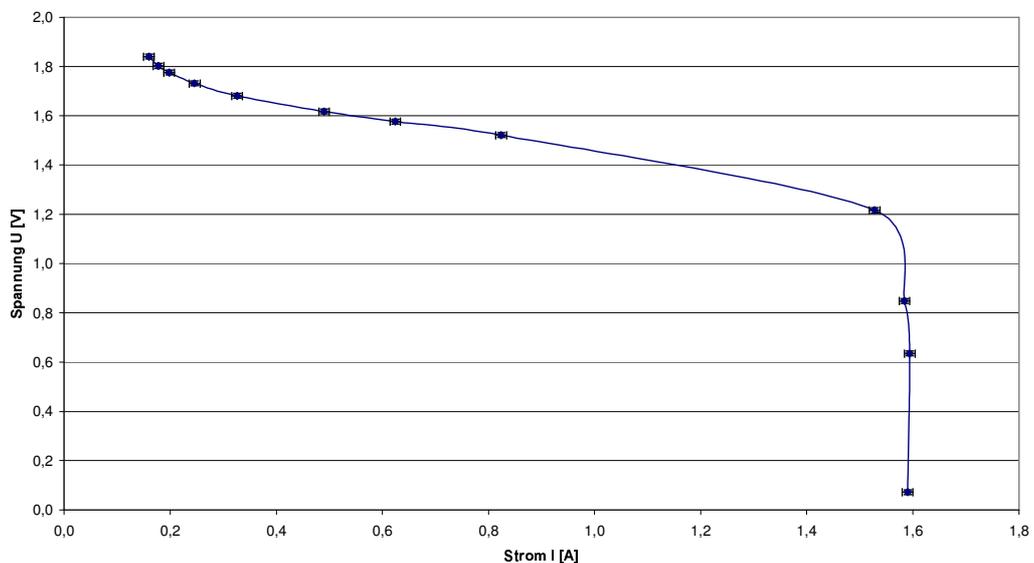
Elektrolyseurstrom: 1A			
R [ $\Omega$ ]	U [V]	I <sub>mess</sub> [A]	I <sub>mit Leck</sub> [A]
0	0,022	0,442	0,602
0,3	0,195	0,443	0,603
0,5	0,259	0,436	0,596
1,0	0,484	0,433	0,593
2	0,912	0,394	0,554
3	1,365	0,403	0,563
5	1,601	0,326	0,486
10	1,866	0,167	0,327
20	1,740	0,087	0,247
50	1,781	0,038	0,198
100	1,806	0,018	0,178
$\infty$	1,842	0,000	0,160

Elektrolyseurstrom: 3A			
R [ $\Omega$ ]	U [V]	I <sub>mess</sub> [A]	I <sub>mit Leck</sub> [A]
0	0,072	1,430	1,590
0,3	0,635	1,434	1,594
0,5	0,848	1,424	1,584
1,0	1,216	1,368	1,528
2	1,522	0,664	0,824
3	1,577	0,464	0,624
5	1,618	0,330	0,490
10	1,681	0,166	0,326
20	1,732	0,086	0,246
50	1,775	0,038	0,198
100	1,802	0,018	0,178
$\infty$	1,840	0,000	0,160

Kennlinie bei beschränktem Volumenstrom (Elektrolyseurstrom: 1A)



Kennlinie mit beschränktem Volumenstrom (Elektrolyseurstrom: 3A)



Im oberen Diagramm wurden zwei Werte von der Kurvenbildung ausgenommen, da diese offensichtlich grobe Fehler zur Ursache haben. Es hatte sich nämlich bei dieser Kennlinie die Notwendigkeit einer kurzen Spülung ergeben, wobei es sich leider unserer Kenntnis entzog, dass wir die gesamte Messreihe hätten wiederholen müssen.

Nun noch ein paar Worte dazu, wie die Fehlerbalken zustande gekommen sind. Auch hier sind die durch den Messaufbau verursachten Fehler weit größer als die Fehler, die durch die Messgeräte entstehen, daher gehen wir bei der Fehlerbetrachtung nur von ersteren aus.

Für den Spannungsfehler der ersten Kurve vergleichen wir die im Protokollheft gelb markierten Werte miteinander. Wir sehen, dass die Leerlaufspannung ohne Volumenstrombeschränkung normalerweise niemals um ca. 0,02V höher sein dürfte als diejenige mit Volumenstrombeschränkung. Wir schätzen daher den durch den Katalysator verursachten systematischen Fehler mit diesem Wert ab; zusammen mit einem statistischen Fehler von ca. 0,01A (durchschnittliche Schwankung während des Messvorgangs) ergibt sich durch lineare Addition ein Fehler von 0,03A.

Der Spannungsfehler der zweiten Kurve wird durch eine lineare Addition des systematischen Fehlers von abgeschätzt 0,01V (siehe gelb-gestrichelt markierter Wert im Heft) sowie der Messwertschwankung von durchschnittlich 0,005V zu 0,015 V geschätzt.

Den Fehler für den Strom in beiden Kurven, geben wir nach Durchschnittsbildung über die im Heft angegebenen Schwankungen während des Messvorganges zu gerundet 0,01A an.

Wir untersuchen nun noch das Verhältnis von maximalem Zellstrom (korrigiert) zu Elektrolyseurstrom für beide Messreihen. Bei 1 A Elektrolyseurstrom ist dieses gleich 0,60. Das heißt, dass die Zelle in diesem Falle 60% der im Elektrolyseur getrennten Wassermoleküle pro Zeiteinheit wieder vereinigen konnte. Beim höheren Elektrolyseurstrom von 3A kann die Zelle pro Zeiteinheit nur noch maximal 53% der eingesetzten Wassermoleküle wieder vereinigen. Man sieht also, dass der Zellstrom durch die vergrößerte Gaskonzentration an den Elektroden bei höherem Elektrolyseurstrom durchaus mit ansteigt, jedoch sind die Ströme nicht ganz proportional zueinander; bei höherem Elektrolyseurstrom greifen die Verlustmechanismen des Aufbaus offensichtlich stärker, was zu dem etwas geringeren „Proportionalitätsfaktor“  $I_{zell}/I_{elekt}$  von 0,53 führt.

Zu allerletzt wollen wir noch eine Aussage darüber bekommen, wie hoch der gesamte Wirkungsgrad des Systems aus Elektrolyseur und Zelle im Höchstfall bei den gerade gemachten Messungen ist. Hierzu betrachten wir je Messreihe über alle R-Werte das Maximum der elektrischen Leistung  $P_{zell} = U_{mess} \cdot I_{zell, nicht\ kor.}$ , die die Zelle an den Verbraucherkreis abgibt; wir dividieren diesen Wert durch die elektrische Leistung, die an den Elektrolyseur abgegeben wird; diese berechnet sich aus den unten am Aufbau ablesbaren Strom-/Spannungswerten. Folgende maximale Wirkungsgrade ergeben sich:

Für die 1A-Reihe bei 3Ω Widerstand:  $\eta_{tech} \approx 34\%$  (Elektrolyseurleistung aus den entsprechenden Strom-/Spannungswerten Werten im Heft: 1,6W).

Für die 3A-Reihe bei 1,0Ω Widerstand:  $\eta_{tech} \approx 31\%$  (Elektrolyseurleistung: 5,4W).

Dies sind relativ hohe Werte, wenn man bedenkt, dass zwei verlustbehaftete Systeme involviert sind.