

## Versuch 6

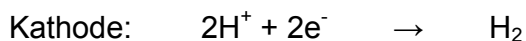
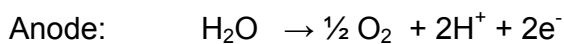
# Der Elektrolyse-Brennstoffzellen-Versuch

<b>1</b>	<b>DIE ELEKTROLYSE-BRENNSTOFFZELLEN-EINHEIT .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>SICHERHEITSHINWEISE: .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>DIE BETRIEBSARTEN .....</b>	<b>3</b>
3.1	DER DEMONSTRATIONSBETRIEB .....	4
3.2	DER EXPERIMENTIERBETRIEB .....	4
<b>4</b>	<b>DIE EXPERIMENTE .....</b>	<b>5</b>
4.1	VERSUCHE ZUR WASSERSTOFFGEWINNUNG MIT DEM ELEKTROLYSEUR	5
4.1.1	Die Strom-Spannungs-Kennlinie .....	5
4.1.2	Das Faraday-Gesetz und der Wirkungsgrad $\eta$ .....	9
4.2	VERSUCHE ZUR WASSERSTOFFNUTZUNG MIT DER BRENNSTOFFZELLE	12
4.2.1	Die Strom-Spannungs-Kennlinie .....	12
4.2.2	Das Faraday-Gesetz und der Wirkungsgrad $\eta$ .....	14

## 1 Die Elektrolyse-Brennstoffzellen-Einheit

Die Elektrolyse-Brennstoffzellen-Einheit stellt die mobile Variante einer vollständigen Wasserstoff-Erzeugungs- und Rückverstromungs-Anlage dar, bestehend aus Proton Exchange Membrane- (PEM-) Elektrolyseur, PEM-Brennstoffzelle, elektrischem Verbraucher (Lüftermotor) und Kabeln dar (siehe Abbildung 1). Mit dieser Anlage lassen sich die grundlegenden Funktionsweisen von PEM-Elektrolyseuren und PEM-Brennstoffzellen demonstrieren, sowie experimentell die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Elektrolyse und der Brennstoffzelle bestätigen. Dazu kann das Modellsystem in zwei unterschiedlichen Betriebsarten eingesetzt werden (vgl. Kapitel 3, Betriebsarten). Bitte beachten Sie, dass dieses Wasserstoff-Modellsystem ausschließlich für Lehr- und Demonstrationszwecke entwickelt worden ist und somit jede andere Verwendung unzulässig ist! Das Prinzip einer regenerativen Brennstoffzellen-Anlage sei kurz erläutert. Eine Gleichspannung betreibt den Elektrolyseur, der deionisiertes Wasser (Leitwert  $< 2\mu S/cm$ ) in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Diese Gase können anschließend gespeichert oder direkt in der Brennstoffzelle eingesetzt werden. Durch kalte Verbrennung wird in der Brennstoffzelle aus den Gasen unter Abgabe von Wasser wieder elektrischer Strom erzeugt.

Die Reaktionen der PEM-Elektrolysezelle:



Die Reaktionen der PEM-Brennstoffzelle:

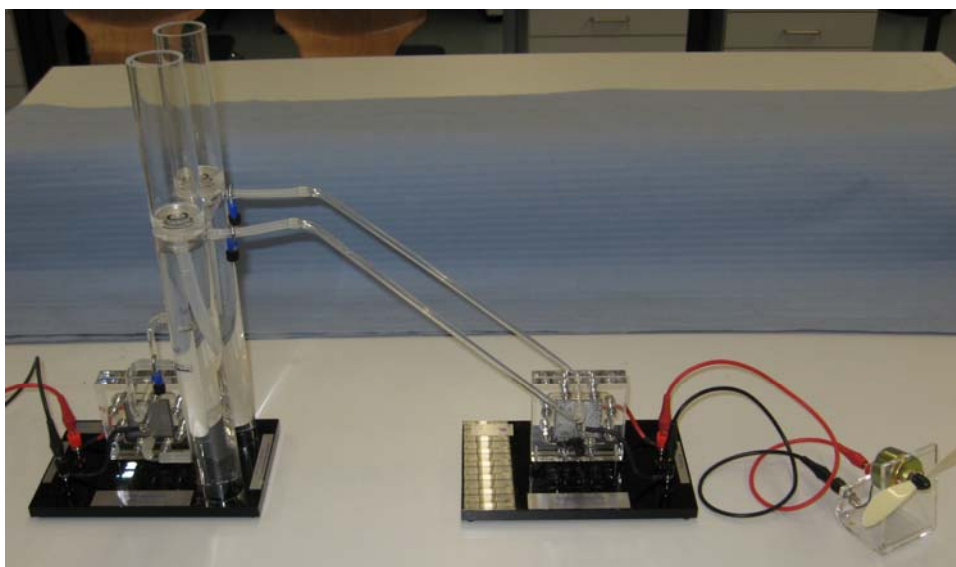
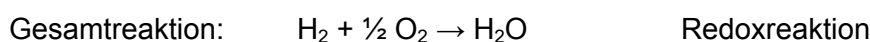
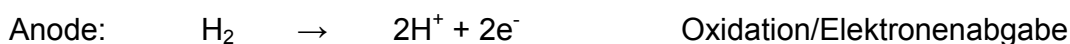


Abbildung 1: Das Wasserstoff-Modellsystem

## 2 Sicherheitshinweise:

In dieser Wasserstofftechnologie-Demonstrationsanlage wird aus deionisiertem Wasser Sauerstoff und Wasserstoff gewonnen und genutzt. Diese Gase können bei unsachgemäßer Handhabung jedoch eine potentielle Gefahrenquelle darstellen. Deshalb sind folgende Punkte zu beachten: Diese Elektrolyse-Brennstoffzellen-Anlage ist nur zur Demonstration und Lehre bestimmt. Ein Einsatz für andere Zwecke, insbesondere die Produktion und Speicherung von Wasserstoff in größeren Mengen als vorgesehen ist nicht gestattet. Achten Sie darauf, dass immer ausreichend Wasser in den Speichertanks ist. Gewährleisten Sie eine ausreichende Lüftung des Raumes, um eine gefährliche Konzentration gewollt oder ungewollt freigesetzter Gase zu vermeiden. Das Hantieren mit offenem Feuer, Zündquellen oder Zigaretten in der Nähe der Anlage ist verboten. Entfernen Sie alle Stoffe, die sich durch sauerstoffreiche Luft von selbst entzünden können, aus dem Umkreis der Anlage. Halten Sie einen Abstand von mindestens 3 Metern ein.

Beachten Sie das Merkblatt M055 "Wasserstoff" und Merkblatt M034 "Umgang mit Sauerstoff" der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie. Vor dem Einsatz im Unterricht müssen die Studierenden ausführlich über die Bedienung und Gefahrenquellen unterrichtet werden. Die Experimente dürfen nur unter Aufsicht stattfinden. Beachten Sie bitte diese Sicherheitshinweise und tragen Sie damit zu weiteren sicheren Stunden im Umgang mit dieser neuen Technologie bei.

## 3 Die Betriebsarten

Grundsätzliches: Die Elektrolyse-Brennstoffzellen-Einheit kann in zwei verschiedenen Betriebsarten eingesetzt werden. Für den reinen Demonstrationsbetrieb wird die Anlage so aufgebaut und eingestellt, dass weder Wasserstoff noch Sauerstoff gespeichert werden. Die von dem Elektrolyseur produzierten Gase gelangen direkt zur Brennstoffzelle. Diese Betriebsart ermöglicht - unter Berücksichtigung der Sicherheitshinweise - einen unbeaufsichtigten Dauerbetrieb. Zum Durchführen der Experimente ist im Allgemeinen die Speicherung der produzierten Gase notwendig. Deshalb unterscheidet sich der Aufbau im Experimentierbetrieb von dem des Demonstrationsbetriebs.

Für den Elektrolyseur PEMPower1-Electrolyzer darf ausschließlich Wasser mit einem Leitwert  $< 2\mu S/cm$  (destilliertes bzw. deionisiertes Wasser wie z.B. für Autobatterien) verwendet werden. Im Wasser vorhandene Metallionen können sonst die Leitfähigkeit der Membran herabsetzen. Dies führt zu Leistungseinbußen des Elektrolyseurs. Beim elektrischen Anschluss ist unbedingt die richtige Polung des Elektrolyseurs zu beachten:

- rot = positiver Pol
- schwarz = negativer Pol

Eine verkehrte Polung kann zur Zerstörung des Elektrolyseurs führen. Die maximal zulässige Spannung für den Elektrolyseur beträgt 2,0 V. Wird dieser Wert überschritten, kann der Elektrolyseur Schaden nehmen. Wir empfehlen, eine Spannung von 1,8 - 2,0 V zu verwenden und diese mit einem Multimeter zu überwachen. Nehmen Sie keine Veränderungen an den Gehäusedurchführungen des Elektrolyseurs vor und verwenden Sie zur Spannungsversorgung nur die vorhandenen Buchsen. Die Verbindungsstellen sind empfindlich gegenüber mechanischer Beanspruchung. ,

### 3.1 Der Demonstrationsbetrieb

- a. Lesen und Beachten Sie die Sicherheitshinweise.
- b. Schließen Sie die beiden Plexiglasleitungen mit geöffneten Schlauchklemmen an den Elektrolyseur an.
- c. Schließen Sie je eine Gaszuführung der Brennstoffzelle an die entsprechende Plexiglasleitungen des Elektrolyseurs an. Es ist darauf zu achten, dass die anderen Ausgänge der Brennstoffzelle geöffnet sind, damit überschüssiges Gas entweichen kann.
- d. Befüllen Sie den Speichertank des Elektrolyseurs bis zur Strichmarkierung „0“ mit destilliertem Wasser.
- e. Bei Anschluss einer elektrischen Spannung (max. 2,0 V) erzeugt der Elektrolyseur nun Wasserstoff und Sauerstoff. Die Gase gelangen nach einigen Minuten zur Brennstoffzelle, die aus ihnen Wasser unter Abgabe von elektrischem Strom erzeugt.

**Achtung:** Da sich anfänglich Luft oberhalb des Wassers im Speichertank des Elektrolyseurs befindet, bildet sich auf der Wasserstoffseite für eine kurze Zeit ein explosionsfähiges Gemisch. Es sind daher jede Art von Feuer oder Zündquellen zu vermeiden.

### 3.2 Der Experimentierbetrieb

In Abhängigkeit der verschiedenen Experimente ist auch ein unterschiedlicher Aufbau des Modellsystems notwendig. Im folgenden sei der vollständige Aufbau zum Betrieb des ganzen Systems vorgestellt. Auf die Änderungen dieses Aufbaus wird bei dem jeweiligen Experiment hingewiesen.

- a. Lesen und beachten Sie die Sicherheitshinweise.
- b. Schließen Sie die Plexiglasleitungen mit den Schlauchklemmen am Elektrolyseur an.
- c. Verschließen Sie die beiden Schlauchklemmen am Speichertank des Elektrolyseurs.
- d. Schließen Sie die Brennstoffzelle an die Plexiglasleitungen des Elektrolyseurs an.
- e. Verschließen Sie auch die Schlauchklemmen am Ausgang der Brennstoffzelle.
- f. Befüllen Sie den Elektrolyseur bis zur Füllhöhenmarkierung "0" mit destilliertem Wasser.

Bei Anschluss einer elektrischen Spannung (max. 2,0 V) erzeugt der Elektrolyseur nun Wasserstoff und Sauerstoff. Da die Gasauslässe verschlossen sind, sammeln sich die Gase in den Speichern. Überschüssiges Wasser wird in die Ausgleichsbehälter gedrückt. Sollte zuviel Gas produziert werden, steigt es über die Ausgleichsbehälter auf. Sobald genügend Gas produziert und gespeichert wurde, kann die Brennstoffzelle in Betrieb genommen werden. Durch Öffnen der beiden Schlauchklemmen am Elektrolyseur kann das gespeicherte Gas entnommen werden. Anfänglich noch in der Brennstoffzelle vorhandene Luft muss durch kurzzeitiges Öffnen der Schlauchklemmen entfernt werden.

## 4 Die Experimente

### 4.1 Versuche zur Wasserstoffgewinnung mit dem Elektrolyseur

#### 4.1.1 Die Strom-Spannungs-Kennlinie

Die Charakteristik des Elektrolyseurs wird durch seine Strom-Spannungs-Kennlinie beschrieben. Zur Aufnahme der Kennlinie ist auf folgende Weise vorzugehen.

##### Versuchsvorbereitung:

- a. In diesem Experiment wird nur der Elektrolyseur verwendet. Die Brennstoffzelle wird nicht angeschlossen.
- b. Nehmen Sie den Elektrolyseur mit einer regelbaren Gleichspannungsversorgung in Betrieb und lassen Sie ihn mindestens eine Minuten lang bei 1,8 V laufen. Dabei müssen Sie mit dem Speisespannungsgerät wie folgt vorgehen:
  - a. Vergewissern Sie sich, dass der Schalter „OUTPUT“ auf „OFF“ steht und kein Verbraucher angeschlossen ist und sich die Stellknöpfe für den Ausgangsstrom (COARSE und FINE) auf Rechtsanschlag befinden.
  - b. Schalten Sie das Netzgerät über den Netzschalter „ON“ ein.
  - c. Stellen Sie durch Rechtsdrehung des Stellknopfes „VOLTAGE“ die gewünschte Ausgangsspannung ein, ablesbar am linken digitalen Anzeigeinstrument.
  - d. Betätigen Sie den Schalter „OUTPUT“.
  - e. Die eingestellte Spannung liegt an den Ausgangsbuchsen („+“ = rot und „-“ = blau ) an. Das Netzgerät läuft nun auf Konstantspannungsbetrieb „CV“ (= Constant Voltage). Dazu leuchtet die linke (grüne) Leuchtdiode.
- c. Schließen Sie Strom- und Spannungsmessgeräte gemäß Abbildung 2 an. (Auf geeignete Messbereiche achten!)

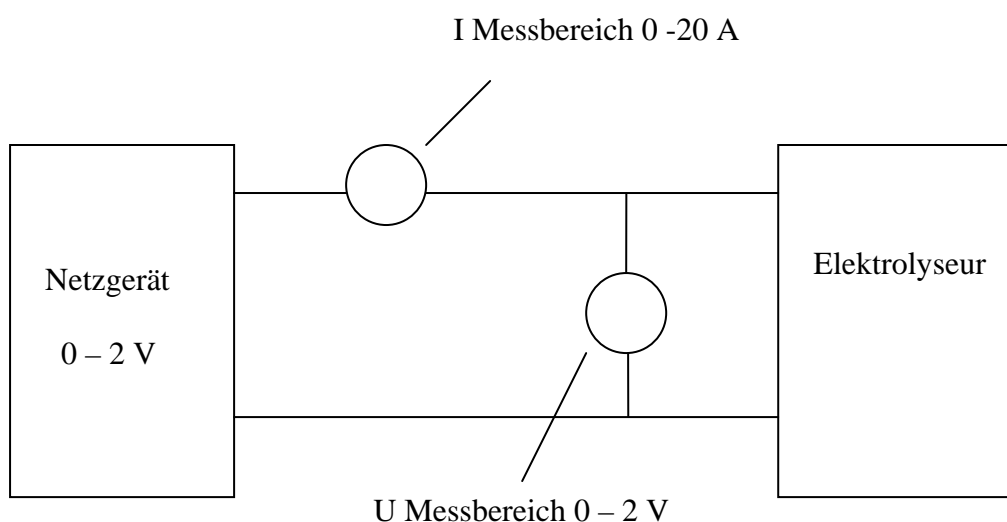


Abbildung 2: Messaufbau

**Versuchsdurchführung:**

- Stellen Sie die Spannung auf 0 V ein.
- Regeln Sie die Spannung in 100 mV Schritten bis maximal 2 V hoch.
- Lesen Sie dabei Spannung und Stromstärke an den Messgeräten ab, und tragen Sie die Werte zusammen mit der berechneten Leistung in eine Tabelle ein.
- In Tabelle 1 ist eine Beispielmesswertetabelle angegeben.

U [mV]	I [mA]	P[mW]
0		
200		
400		
600		
800		
1000		
1200		
1400		
1500		
1550		
1600		
1650		
1700		
1750		
1800		
1850		

**Tabelle 1: Messwerte zur Strom-Spannungs-Kennlinie****Ergebnisse:**

- Stellen Sie die erhaltenen Werte für die Stromstärke über den Spannungswerten U in einer zu entwerfenden Abbildung 3a (siehe weiter unten) graphisch dar.
- Aus der Zeichnung lässt sich die Zersetzungsspannung  $U_z$  durch Extrapolation des linearen (ohmschen) Bereichs der Kurve auf die Abszisse bestimmen. Unterhalb von  $U_z$  findet keine Elektrolyse statt.

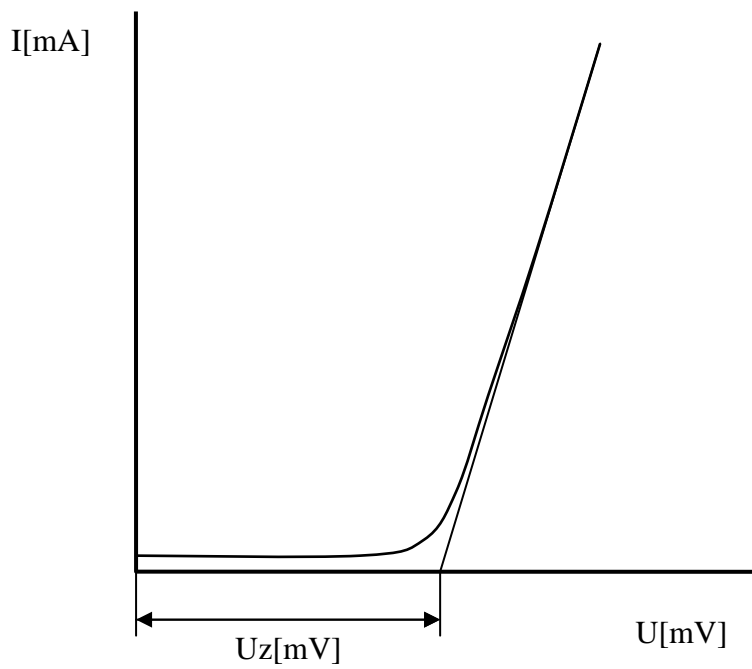


Abbildung 3. Die Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrolyseurs

Hinweise:

- Um optimale Messwerte zu erhalten, sollte vor einer Wiederholung der Messreihe die Elektrolysezelle für ca. 5 min kurzgeschlossen werden.
- Das Spannungsmessgerät sollte direkt *vor* der Elektrolysezelle angeschlossen werden. Auf kurze Kabel achten.

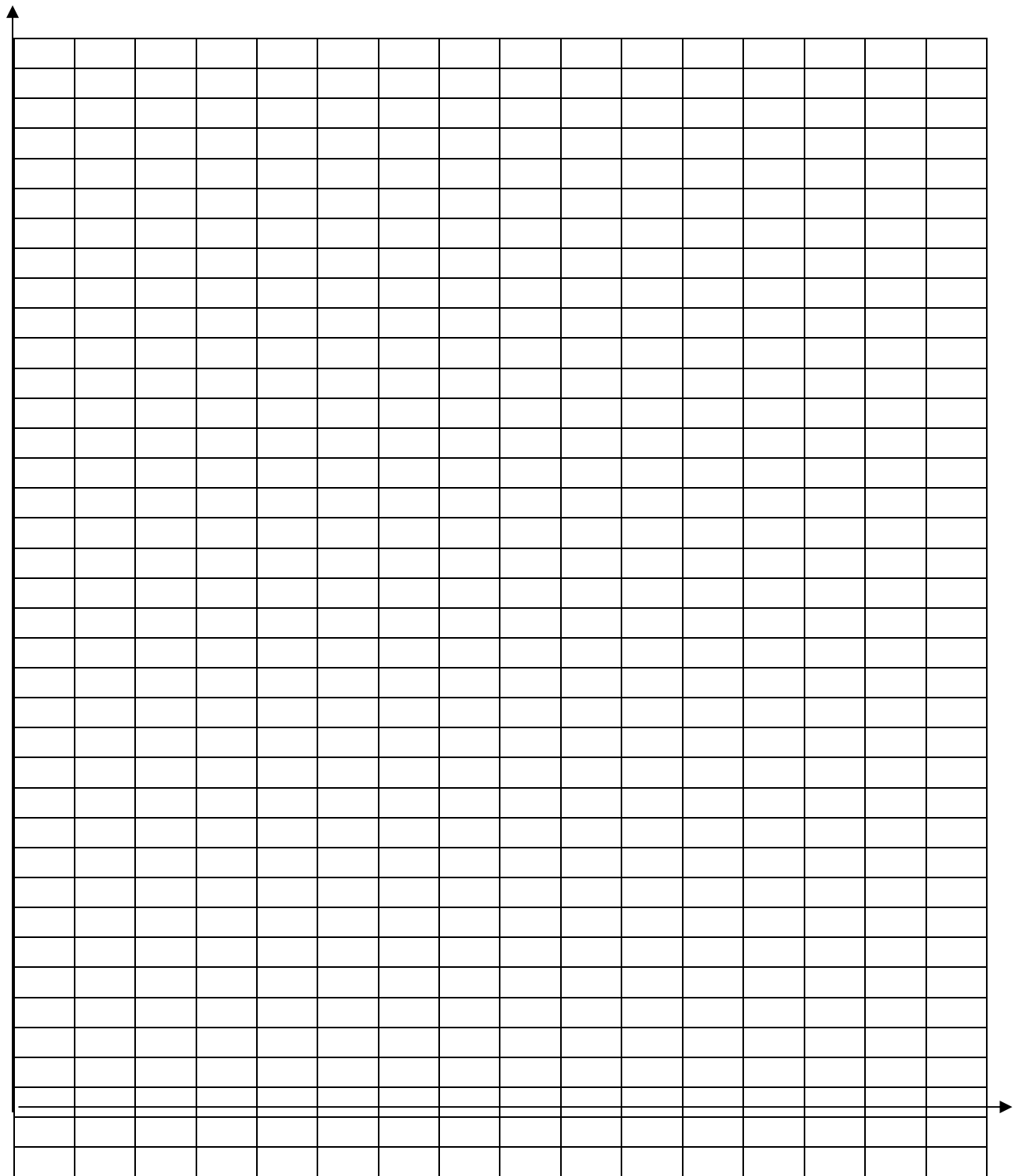


Abbildung 3a: Die gemessene Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrolyseurs



### 4.1.2 Das Faraday-Gesetz und der Wirkungsgrad $\eta$

Mit dem Wasserstoff-Modellsystem lässt sich das Faraday-Gesetz für den Elektrolyseur bestätigen. Dieses Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der Stromstärke und der an einer Elektrode erzeugten Gasmenge:

$$V = \frac{R \cdot T \cdot I \cdot t}{p \cdot F \cdot z}$$

mit:

V = Volumen der erzeugten Gasmenge in Nm<sup>3</sup>

R = universelle Gaskonstante 8,314 J/molK

T = Umgebungstemperatur in Kelvin, z.B. 298 K

I = Strom in A

t = Zeit in s

p = Umgebungsdruck, z.B. 1,013 bar

F = Faradaykonstante 96485 C/mol

z = Anzahl der Elektronen, um ein Molekül abzuscheiden:

z (H<sub>2</sub>) = 2 , z(O<sub>2</sub>) = 4

#### Versuchsvorbereitung:

- Neben dem Elektrolyseur sind in diesem Experiment die Speichertanks notwendig . Die Brennstoffzelle wird nicht angeschlossen.
- Schließen Sie Strom- und Spannungsmessgeräte gemäß Abbildung 2 an.
- Nehmen Sie den Elektrolyseur mit einer regelbaren Gleichspannungsversorgung in Betrieb, und lassen Sie ihn mindestens zehn Minuten lang bei 1,8 V laufen.
- Stellen Sie einen geeigneten Arbeitspunkt (konstanten Strom, z. B. 1 A) ein, der im linearen Bereich der Strom-Spannungs-Kennlinie liegt. Das Speisespannungsgerät muss hierzu wie folgt bedient werden.
  - Vergewissern Sie sich, dass der Schalter „OUTPUT“ auf „OFF“ steht und kein Verbraucher angeschlossen ist.
  - Schalten Sie das Netzgerät über den Netzschalter auf „ON“ ein.
  - Betätigen Sie den Schalter „PRESET“. Die Stromanzeige wird umgeschaltet auf die Anzeige der eingestellten Strombegrenzung (Ausgangsstrom). Stellen Sie durch Rechtsdrehung der Stellknöpfe „COARSE“ den gewünschten Ausgangsstrom grob und „FINE“ den gewünschten Ausgangsstrom genauer (fein)ein.
  - Betätigen Sie den Schalter „OUTPUT“.
  - Die Stromanzeige geht auf 0,0 A zurück. Wird das eingestellte Stromlimit überschritten (Strombegrenzung), so wird die Spannung zurückgeregelt. Das Netzgerät befindet sich dann im Konstantstrombetrieb „CC“ (Constant Current). Dazu leuchtet die rechte (rote) Leuchtdiode.
- Unterbrechen Sie die Stromversorgung. Entleeren Sie die Gasspeicher.

#### Versuchsdurchführung:

- Schalten Sie die Stromversorgung wieder ein, und starten Sie gleichzeitig die Messung der Zeit
- Lesen Sie in Schritten von 10 cm<sup>3</sup> produziertem H<sub>2</sub>-Gas die Messwerte für Zeit t, Strom I und Spannung U ab, bis der H<sub>2</sub> -Speicher gefüllt ist. Tragen Sie die Werte in eine Tabelle ein.
- Mit Tabelle 2 ist eine Beispieltabelle vorgegeben.

T[s]	VH <sub>2</sub> [cm <sup>3</sup> ]	VO <sub>2</sub> [cm <sup>3</sup> ]	U [mV]	I [mA]
	0			
	10			
	20			
	30			
	40			
	50			
	60			
	70			
	80			

**Tabelle 2: Messwertetabelle zum Faraday-Gesetz****Ergebnisse:**

- a. Aus den gemittelten Werten für die Stromstärke und die Spannung erhält man die elektrische Leistung im Arbeitspunkt:

$$P = U \cdot I$$

- b. Tragen Sie aus den Messwerten die Volumina V<sub>H<sub>2</sub></sub> und V<sub>O<sub>2</sub></sub> über der Zeit auf einem getrennten Blatt auf.  
Abbildung 4 zeigt qualitativ das Ergebnis für Beispielmesswerte der Tabelle 2. Der nach dem Faraday-Gesetz zu erwartende lineare Anstieg der Kurven ist deutlich zu erkennen.

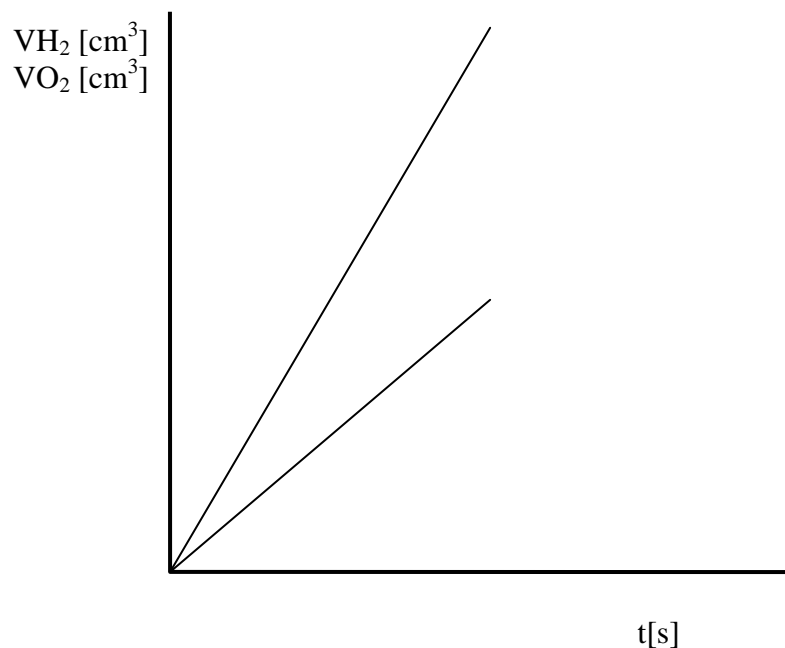


Abbildung 4:Produzierte Gasmenge über der Zeit

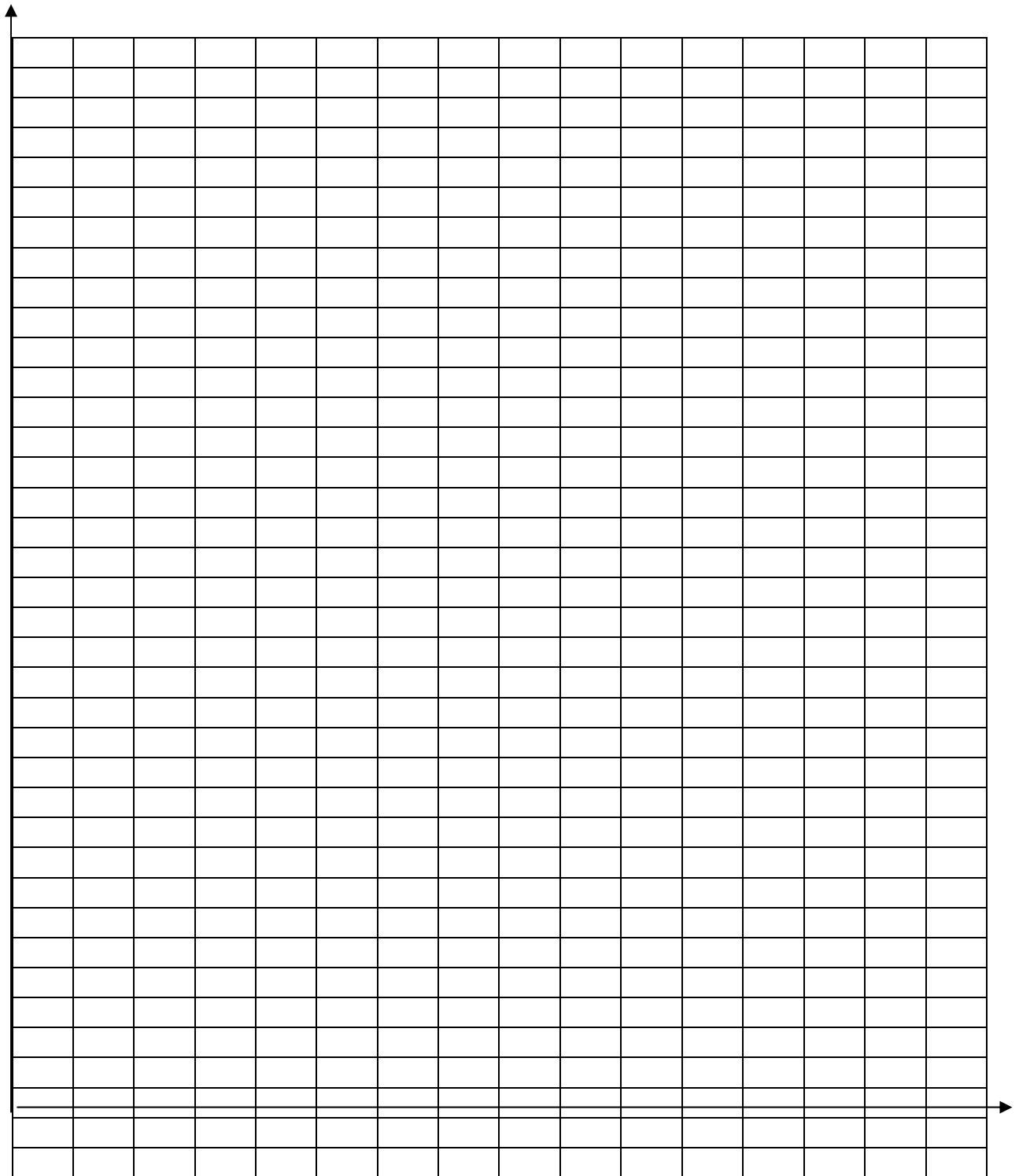


Abbildung 4a: experimentell gemessene produzierte Gasmenge über der Zeit

- c. Berechnen Sie den Stromwirkungsgrad, d.h. das Verhältnis aus tatsächlich erzeugter Gasmenge und dem aus dem Faraday-Gesetz theoretisch errechneten Wert:

$$V_{H_2} = \frac{R \cdot T \cdot I \cdot t}{p \cdot F \cdot z} =$$

$$V_{O_2} = \frac{R \cdot T \cdot I \cdot t}{p \cdot F \cdot z} =$$

Die tatsächlich erzeugten Gasmengen sind etwas geringer als die theoretisch berechneten. Der Faraday-Wirkungsgrad beträgt somit:

$$\eta_{\text{Faraday}} = V_{H_2} / V_{\text{theor}} =$$

Der Unterschied zwischen Theorie und Praxis setzt sich aus Messfehlern und Diffusionsverlusten der Gase innerhalb der Zelle zusammen. Die Diffusionsverluste entstehen dadurch, dass Wasserstoff und Sauerstoff durch die Membran des Elektrolyseurs diffundieren und am Katalysator zu Wasser reagieren. Es wird also ein Teil des erzeugten Gases direkt wieder umgesetzt, ohne dass es aus der Zelle austreten konnte.

- d. Bestimmen Sie anhand des erzeugten Wasserstoffs und der aufgewendeten elektrischen Energie den elektrischen Wirkungsgrad des Elektrolyseurs im gewählten Arbeitspunkt:

$$\eta = W_{\text{Gas}} / W_{\text{elektr.}} =$$

mit:

$V_{H_2}$  = Volumen der erzeugten Gasmenge in  $m^3$

$H_0$  = oberer Heizwert des Wasserstoffs =  $12745 \text{ kJ/m}^3$

$I$  = Strom in A

$U$  = Spannung in V

$t$  = Zeit in s

Als Versuchsvariante kann die Messung in unterschiedlichen Arbeitspunkten, d.h. bei unterschiedlichen Leistungen durchgeführt werden. Es lässt sich damit die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der elektrischen Leistung ermitteln.

#### Hinweis:

- Je kleiner der Strom im gewählten Arbeitspunkt, desto besser der Wirkungsgrad, aber um so länger die Dauer des Versuchs

## 4.2 Versuche zur Wasserstoffnutzung mit der Brennstoffzelle

### 4.2.1 Die Strom-Spannungs-Kennlinie

Die Charakteristik der Brennstoffzelle wird durch ihre Strom-Spannungs-Kennlinie beschrieben. Zur Aufnahme der Kennlinie ist auf folgende Weise vorzugehen.

#### Versuchsvorbereitung:

- a. Nehmen Sie die Brennstoffzelle im Demonstrationsmodus unter Zuschaltung des Lüfters in Betrieb, und lassen Sie sie einige Zeit laufen. Der Demonstrationsmodus ist möglich, da für diese Versuchsserie ein Dauerbetrieb ohne Gasspeicherung notwendig ist. Wichtig für die Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie ist, dass die ausreichende Befeuchtung der Membran gegeben ist. Diese Befeuchtung stellt sich jedoch erst

- während des Betriebes ein.
- Weiterhin benötigen Sie eine Widerstandsdekade oder ein Potentiometer. In unseren Beispielmessungen haben wir einen Drehpotentiometer mit maximal  $47 \Omega$  verwendet. Sinnvolle Einstellwerte sind in Tabelle 3 zu finden.
  - Schließen Sie Strom- und Spannungsmessgeräte gemäß Abbildung 5 an.

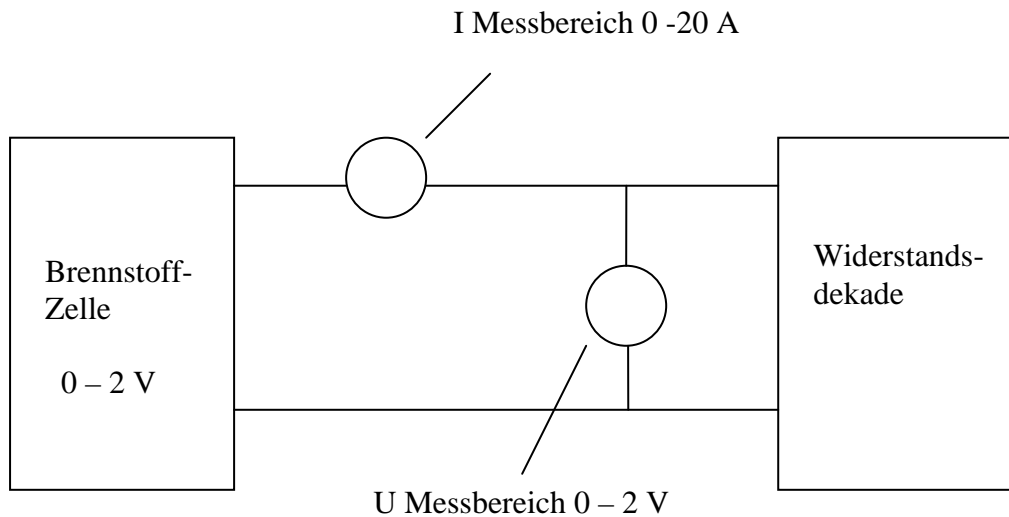


Abbildung 5: Messaufbau

**Versuchsdurchführung:**

- Wir empfehlen, vor jeder Messwertaufnahme etwas Gas über die Ventile abströmen zu lassen, um genauere Messwerte zu erhalten.
- Nehmen Sie die Strom-Spannungs-Kennlinie auf. Beginnen Sie dazu mit der Leerlaufspannung, und gehen Sie dann die Widerstandsdekade von größeren zu kleineren Widerständen durch. Kurzzeitig kann auch der Kurzschlussstrom gemessen werden. **Der Kurzschlussstrom darf maximal 10 s dauern sonst kann die Zelle zerstört werden!**
- Lesen Sie dabei Spannung und Stromstärke an den Messgeräten ab, und tragen Sie die Werte zusammen mit der berechneten Leistung in Tabelle 3 ein.

R[%]	R[Ω]	I [mA]	U [mV]	P[mW]
96	46			
79	40			
42	20			
21	10			
19	8			
15	6			
11	4			
9	2			
7	1			
6	0,5			
0	0			

Tabelle 3: Messwerte zur Strom-Spannungs-Kennlinie der Brennstoffzelle

**Ergebnisse:**

Stellen Sie die erhaltenen Werte für die Spannung  $U$  und die elektrische Leistung  $P$  über der Stromstärke  $I$  in Abbildung 5 graphisch dar.

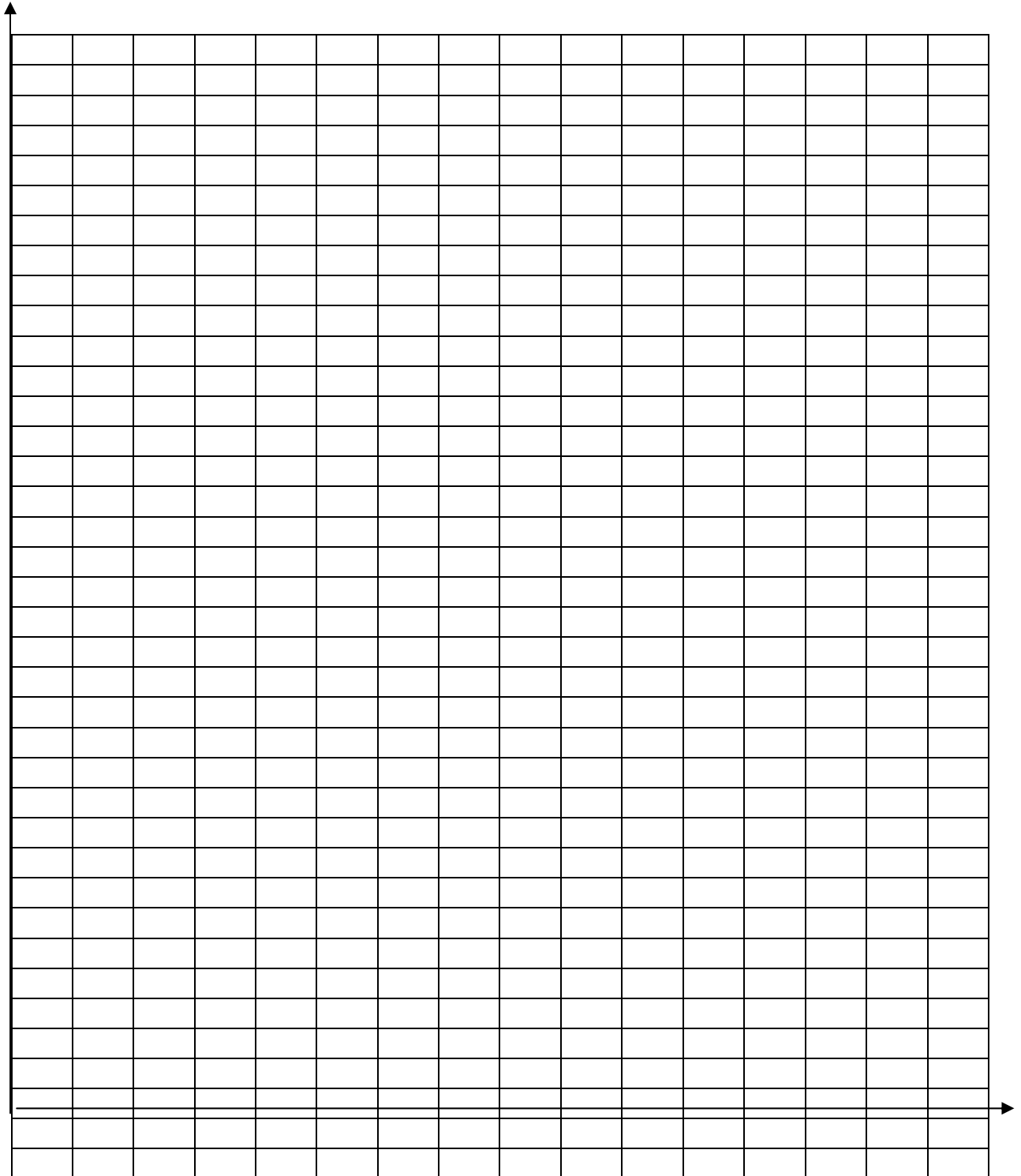


Abbildung 5: Spannung  $U$  und Leistung  $P$  der Brennstoffzelle in Abhängigkeit der Stromstärke  $I$

**4.2.2 Das Faraday-Gesetz und der Wirkungsgrad  $\eta$** 

Mit dem Wasserstoff-Modellsystem lässt sich das Faraday-Gesetz nicht nur für den Elektrolyseur, sondern auch für die Brennstoffzelle nachprüfen. Für den Zusammenhang

zwischen der Stromstärke und der an einer Elektrode umgesetzten Gasmenge gilt wie für die Elektrolysezelle

$$V = \frac{R \cdot T \cdot I \cdot t}{p \cdot F \cdot z}$$

mit:

V = Volumen der erzeugten Gasmenge in Nm<sup>3</sup>

R = universelle Gaskonstante 8,314 J/molK

T = Umgebungstemperatur in Kelvin, z.B. 298 K

I = Strom in A

t = Zeit in s

p = Umgebungsdruck, z.B. 1,013 bar

F = Faradaykonstante 96485 C/mol

z = Anzahl der Elektronen, um ein Molekül abzuscheiden:

z (H<sub>2</sub>) = 2 , z(O<sub>2</sub>) = 4

### Versuchsvorbereitung:

- Jetzt muss die Brennstoffzelle im Experimentiermodus aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Lassen Sie sie wiederum einige Zeit laufen um die Membran ausreichend zu befeuchten.
- Schließen Sie Strom- und Spannungsmessgeräte gemäß Abbildung 5 an.
- Stellen Sie durch Wahl eines geeigneten Widerstandes (z.B. 1 Ohm) den Arbeitspunkt ein.
- Klemmen Sie die Last ab.
- Erzeugen Sie über die Elektrolysezelle H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> bis der Füllstand des H<sub>2</sub>-Speichers ca. 100 cm<sup>3</sup> entspricht. Lassen Sie die Gase über die Brennstoffzelle ab, bis der Füllstand im Wasserstoffspeicher 60 cm<sup>3</sup> entspricht.

### Versuchsdurchführung:

- Schließen Sie die Last an und starten Sie gleichzeitig die Zeitnahme.
- Lesen Sie in Schritten von 5 cm<sup>3</sup> verbrauchtem Wasserstoff die Messwerte für Zeit, Strom und Spannung ab bis der H<sub>2</sub>-Speicher nur noch 10 cm<sup>3</sup> enthält. Tragen Sie die Werte in eine Tabelle ein.
- In Tabelle 4 ist eine Beispieltabelle angegeben.

T[s]	VH <sub>2</sub> [cm <sup>3</sup> ]	VO <sub>2</sub> [cm <sup>3</sup> ]	U [mV]	I [mA]
0	60	60		
	50	55		
	40	50		
	35	47		
	30	45		
	25	42		
	20	40		
	15	37		
	10	35		

**Tabelle 4: Messwertetabelle zum Faraday-Gesetz**

Ergebnisse:

1. Aus den Werten für die Stromstärke und die Spannung erhält man die elektrische Leistung im Arbeitspunkt:

$$P = U \cdot I = P =$$

- b. Tragen Sie aus den Messwerten die Volumina  $V_{H_2}$  und  $V_{O_2}$  über der Zeit in das vorgesehene freie Feld auf. Der nach dem Faraday-Gesetz zu erwartende lineare Abfall der Kurven muss deutlich zu erkennen sein.
- c. Berechnen Sie den Stromwirkungsgrad, d.h. das Verhältnis aus dem theoretisch nach dem Faraday-Gesetz errechneten Wert und der tatsächlich verbrauchten Gasmenge:

$$V_{H_2} = \frac{R \cdot T \cdot I \cdot t}{p \cdot F \cdot z} =$$

$$V_{O_2} = \frac{R \cdot T \cdot I \cdot t}{p \cdot F \cdot z} =$$

Die tatsächlich erzeugten Gasmengen sind etwas geringer als die theoretisch berechneten. Der Faraday-Wirkungsgrad beträgt somit:

$$\eta_{\text{Faraday}} =$$

Der Unterschied zwischen Theorie und Praxis setzt sich aus Messfehlern und Diffusionsverlusten der Gase innerhalb der Zelle zusammen. Die Diffusionsverluste entstehen dadurch, dass  $H_2$  und  $O_2$  durch die Membran der Brennstoffzelle diffundieren und am Katalysator zu Wasser reagieren. Es wird also chemische Energie verbraucht, ohne dass elektrische Energie erzeugt wird.

- d. Bestimmen Sie anhand der verbrauchten Gasmenge und der erzeugten elektrischen Arbeit den elektrischen Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im gewählten Arbeitspunkt:

$$\eta = \frac{W_{\text{elektr}}}{W_{\text{Gas}}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{V_{H_2} \cdot H_U} =$$

mit

$V_{H_2}$  = verbrauchte Menge  $H_2$  in  $m^3$

$H_U$  = unterer Heizwert des Wasserstoffs = 10800 kJ/ $m^3$

$U$  = Spannung in V

$I$  = Strom in A

$t$  = Zeit in s

Als Versuchsvariante kann die Messung in unterschiedlichen Arbeitspunkten, d.h. bei unterschiedlichen Leistungen durchgeführt werden. Es lässt sich damit die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der elektrischen Leistung ermitteln.

Zur Berechnung des Wirkungsgrades der Brennstoffzelle wird mit dem unteren Heizwert  $H_U$  anstelle des oberen Heizwertes  $H_O$  gerechnet. Die beiden Heizwerte unterscheiden sich durch die Kondensationsenthalpie des Wassers. Da die Kondensation lediglich Wärme erzeugt und keine elektrische Energie, wird im technischen Bereich üblicherweise der untere Heizwert eingesetzt.