



ENERGIENOVUM
G e m e i n n ü t z i g e I n i t i a t i v e

LEISTUNGSTEST ELEKTROLYSE-STACK

Energetischer und Faradayscher Wirkungsgrad

Plus, (Thorsten Müller)
Bandit, Rubberduck, (Saša Smolčić)

20140225

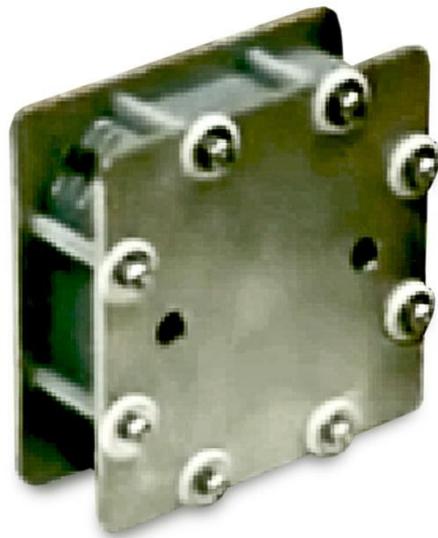
Dieses Material steht unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International. Um eine Kopie dieser Lizenz zu sehen, besuchen Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.



Motivation

Ein wesentliches technisches Bewertungskriterium für den Elektrolyseur ist der Wirkungsgrad. Allgemein ist der Ansatz zur Definition des Wirkungsgrads einer technischen Anlage das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Für die Elektrolyse wird der Nutzen in diesem Kapitel nicht nur im produzierten Wasserstoff gesehen. Die Nutzung der Partialdrücke, des produzierten Sauerstoffs und die damit verbundene Erhöhung des Wirkungsgrades sollen hier ebenfalls betrachtet werden. Ziel der Versuche ist es, den Wirkungsgrad des Elektrolyseurs zu bestimmen, um anschließend Optimierungsmöglichkeiten des Elektrolyseurs zu diskutieren.

Des Weiteren soll auf Basis dieser Arbeit eine Exceldatei erstellt werden, welche den Experimentatoren die Rechenarbeit und Ausgestaltung eines Testberichtes zum Wirkungsgrad von Elektrolyseuren durch Automatisierung abnimmt. Da diese Arbeit auf zurückliegenden Versuchen basiert, welche nicht dem Zweck einer Wirkungsgradbestimmung dienten, fehlt ein wesentlicher Bestandteil: die Strom-Spannung-Kennlinie. Sie wird aber aufgrund ihrer hohen Aussagekraft für Optimierungen eines Elektrolyseurs Bestandteil der Excel Datei sein.



**Der für den Test herangezogene Elektrolyse-Stack,
entwickelt und produziert von Saša Smolčić:**

Anoden und Kathoden: 11 Stück á 124 x 124 mm

Aktive Fläche: 2.160cm²

Werkstoff: 1.4404, 1mm

Dichtungen: Silikon, 3mm

Endplatten: 1.4305, 6mm

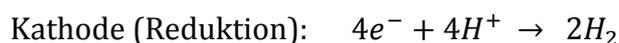
Inhaltsverzeichnis

1. [Theoretische Grundlagen](#)
 - 1.2 [Wirkungsgrad des Elektrolyseurs](#)
 - 1.2.1 [Faradaysche Gesetze](#)
2. [Versuchsaufbau](#)
3. [Berechnungen zum Wirkungsgrad](#)
 - 3.1. [Partialdruck Wasserdampf](#)
 - 3.1.1. [Berechnungen zu Test 1., Volumina](#)
 - 3.1.2. [Wirkungsgrad nach Faraday](#)
 - 3.1.3. [Energetischer Wirkungsgrad](#)
 - 3.1.4. [Elektrochemisches Äquivalent](#)
 - 3.1.5. [spezifischer Energieverbrauch](#)
 - 3.2. [Berechnungen zu Test 2., Volumina](#)
 - 3.2.1. [Wirkungsgrad nach Faraday](#)
 - 3.2.2. [Energetischer Wirkungsgrad](#)
 - 3.2.3. [Elektrochemisches Äquivalent](#)
 - 3.2.4. [spezifischer Energieverbrauch](#)
 - 3.3. [Berechnungen zu Test 3., Volumina](#)
 - 3.3.1. [Wirkungsgrad nach Faraday](#)
 - 3.3.2. [Energetischer Wirkungsgrad](#)
 - 3.3.3. [Elektrochemisches Äquivalent](#)
 - 3.3.4. [spezifischer Energieverbrauch](#)
 - 3.4. [Berechnungen zu Test 4., Volumina](#)
 - 3.4.1. [Wirkungsgrad nach Faraday](#)
 - 3.4.2. [Energetischer Wirkungsgrad](#)
 - 3.4.3. [Elektrochemisches Äquivalent](#)
 - 3.4.4. [spezifischer Energieverbrauch](#)
 - 3.5. [Zusammenfassung](#)
4. [Effizienz](#)

1. Theoretische Grundlagen

Elementar für die Funktion der Elektrolyse ist der Elektrolyt. Dieser ermöglicht den Protonen, die bei den stattfindenden Reaktionen entstehen, von einer zur anderen Elektrode zu wandern. Im Versuch wird vom Elektrolyseur Wasser elektrochemisch gespalten, wobei Wasserstoff und Sauerstoff entstehen.

Dabei laufen folgende Elektrodenreaktionen ab:



An der Anode entstehen also durch Oxidation gasförmiger Sauerstoff, Protonen und Elektronen. Letztere fließen über den äußeren Leitkreis zur Kathode, während die Protonen durch den Elektrolyt ebenfalls zur Kathode wandern. Dort entsteht aus den Protonen und Elektronen schließlich gasförmiger Wasserstoff. Das Volumen des entstehenden Wasserstoffs ist dabei doppelt so groß wie das Volumen des erzeugten Sauerstoffs, was unmittelbar aus der Stöchiometrie der obigen Reaktionsgleichung folgt.

1.2 Wirkungsgrad des Elektrolyseurs

Die Stoffmenge n , die bei einer Elektrolyse abgeschieden wird, lässt sich durch die Faradayschen Gesetze berechnen. Es gilt:

$$n = \frac{I \times t}{z \times N_A \times e} = \frac{I \times t}{z \times F} \quad (2)$$

Mit I wird hier die Stromstärke bezeichnet, mit z die pro abzuscheidendem Molekül notwendigen Elektronen und mit t die Zeit. N_A ist die Avogadro-Konstante ($6,022 \cdot 10^{23}$) und e die Elementarladung, welche sich zur Faraday-Konstante F zusammenfassen lassen.

Wird in der Gleichung (2) die ideale Gasgleichung $pV = nRT$ eingesetzt, erhält man einen Ausdruck, in dem das Volumen der abgeschiedenen Gase auftaucht:

$$V = \frac{I \times t \times R \times T}{z \times F \times p} \quad (3)$$

Trägt man das Volumen V gegen die Zeit t auf, so kann das erzeugte Volumen pro Zeiteinheit ermittelt werden. Bezüglich des einzusetzenden Drucks p muss eine Korrektur vorgenommen werden, da der erzeugte Wasserstoff nahezu mit Wasserdampf gesättigt ist. Die relative Feuchte φ des Gases wird messtechnisch erfasst und bei der Volumenbe-

rechnung berücksichtigt. Der Partialdruck e_{rf} des Wasserdampfs lässt sich mit der Magnus-Formel bestimmen:

$$e_{sat} = 611,2 \times \exp\left(\frac{17,62 \times T}{243,12 + T}\right) \quad (4)$$

$$e_{rf} = \varphi \times e_{sat} \quad (5)$$

Um den Wirkungsgrad des Elektrolyseurs zu bestimmen, wird die zugeführte elektrische Energie E_{elek} und die chemische Energie E_{H_2} des erzeugten Wasserstoffs berechnet. Wird der im Elektrolyseur erzeugte Wasserstoff in einer nachgelagerten Anwendung energetisch verwertet (Umwandlung in thermische, mechanische oder elektrische Energie), wird nur der Heizwert (127.450kJ/kg) des Wasserstoffs genutzt. Wird die Gesamtkette betrachtet bzw. der Wasserstoff chemisch verwertet, ist es sinnvoller, den Brennwert (141.860kJ/kg) des Wasserstoffs heranzuziehen. Der Quotient aus E_{H_2} und E_{elek} entspricht dem Wirkungsgrad. Die Formel zur Berechnung der elektrischen Energie lautet:

$$E_{elek} = U \times I \times t \quad (6)$$

Die chemische Energie E_{H_2} ergibt sich für den Brennwert (oberer Heizwert, H_0) aus:

$$E_{H_2,H_0} = H_{2,H_0} \times m, \quad (7)$$

und für den Heizwert (unterer Heizwert] H_U aus:

$$E_{H_2,H_U} = H_{2,H_U} \times m \quad (8)$$

Die aufgewendete Energie $E_{Verbrauch}$ ergibt sich aus dem Quotienten der Masse des produzierten Wasserstoffs mit der Gleichung (6) für E_{elek} :

$$E_{Verbrauch} = \frac{E_{elek}}{m} = \frac{U \times I \times t}{m} \quad (9)$$

wobei die Masse m sich durch Multiplikation der Dichte ρ_{H_2} ($0,0899\text{kg/m}^3$) des Wasserstoffs mit dem theoretischen Volumen aus Gleichung (3), bzw. der empirischen Volumenmessung ergibt:

$$m = \rho_{H_2} \times V \quad (10)$$

Bildet man aus Gleichung (10) den Quotienten mit Gleichung (9), erhält man den energetischen Wirkungsgrad. Der auf den Brennwert bezogene Wirkungsgrad gibt an, wie effizient der Elektrolyseur als technischer Apparat funktioniert, bzw. wie nah er am idealreversiblen Zustand betrieben werden kann. Der auf den Heizwert bezogene Wirkungsgrad dient der systemischen Analyse einer gesamten Prozesskette.

$$\eta_{energetisch} = \frac{E_{H_2}}{E_{Verbrauch}} \quad (11)$$

Der Quotient aus erzeugtem Wasserstoffvolumen und Gleichung (3) entspricht dem Wirkungsgrad nach Faraday:

$$\eta_{Faraday} = \frac{V_{erzeugt}}{V_{errechnet}} \quad (12)$$

1.2.1. Faradaysche Gesetze:

Die an der Elektrode abgeschiedene Ionenmasse m ist der geflossenen Ladungsmenge $I \times t = Q$ proportional. \ddot{A}_e wird als das elektrochemische Äquivalent¹ bezeichnet und ergibt sich aus:

$$m = \ddot{A}_e \times I \times t \quad (13)$$

Die elektrochemischen Äquivalente \ddot{A}_e verschiedener Stoffe verhalten sich wie ihre chemischen Äquivalenzmassen A_x , (M =molare Masse, z =Wertigkeit der Ionen):

$$\frac{\ddot{A}_1}{\ddot{A}_2} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{M_1}{z_1}}{\frac{M_2}{z_2}} \quad (14)$$

Jedes Ion der Masse M transportiert also genau z Ladungen. Um 1 Valenzelektron² ($=mol/z$) eines Stoffes abzuscheiden, sind genau $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ Ionen/mol (*Avogadro-Konstante*)³ nötig, die dazu die Ladungsmenge F (*Faradaysche Zahl* = $96.845C/mol$)⁴ transportieren.

$$F = N_A \times e \quad (15)$$

Da die theoretisch maximal mögliche abgeschiedene Stoffmenge von der geflossenen Ladungsmenge abhängig ist, muss bei Gleichung (3) die Anzahl der an der Elektrolyse beteiligten Kammern N berücksichtigt werden, sofern der Elektrolyse-Stack, wie hier der Fall, parallel geschaltet wurde:

$$V = \frac{I \times t \times R \times T}{z \times F \times p} \times N \quad (16)$$

¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrochemisches_%C3%84quivalent

² <http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Valenzelektron.html>

³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Avogadro-Konstante>

⁴ <http://de.wikipedia.org/wiki/Faraday-Konstante>

2. Versuchsaufbau⁵:

Bei allen Testdurchläufen wurde Spannung und Strom gemittelt. Das abgeschiedene Volumen an Oxyhydrogen wurde mit einem Labortrommelmesser erfasst.

| | \bar{U} | \bar{I} | t | V | T_g | p | φ | T |
|---------------|-----------|-----------|------|------|--------|---------|-----------|--------|
| <i>Test 1</i> | 12,8V | 39,8A | 28s | 1,0l | 17,1°C | 1001hPa | 90% | 17,8°C |
| <i>Test 2</i> | 12,4V | 39,5A | 56s | 2,0l | 17,1°C | 1001hPa | 90% | 17,8°C |
| <i>Test 3</i> | 14,0V | 61,0A | 43s | 2,4l | 17,1°C | 1001hPa | 90% | 17,8°C |
| <i>Test 4</i> | 10,5V | 19,1A | 107s | 1,8l | 17,1°C | 1001hPa | 90% | 17,8°C |

\bar{U} = Mittlere Spannung

\bar{I} = Mittlerer Strom

t = Zeit in Sekunden

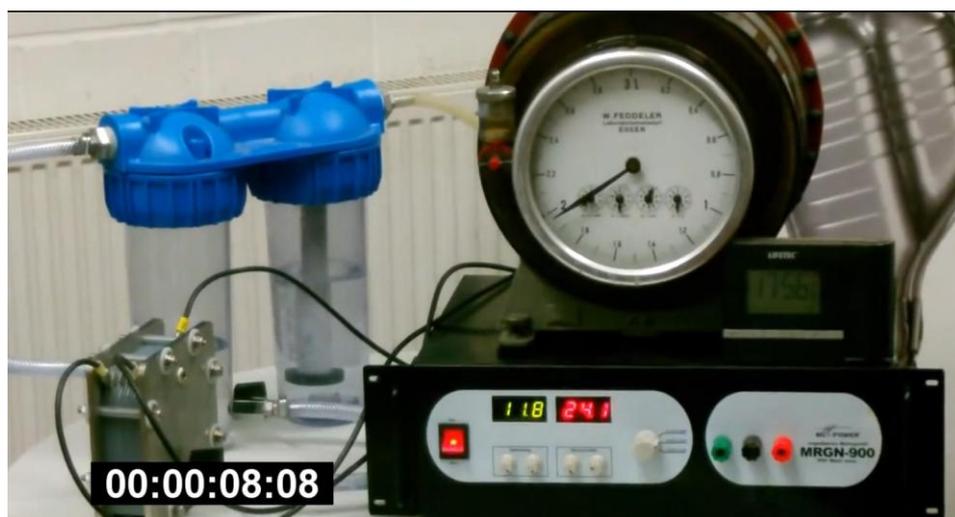
V = abgeschiedenes Oxyhydrogen – Volumen

T_g = Gastemperatur

p = Umgebungsdruck (= Gasdruck)

φ = relative Feuchte

T = Umgebungstemperatur



⁵ <http://youtu.be/j4bUXrytsSQ>

3. Berechnungen zum Wirkungsgrad

Das Mischgas, bestehend aus Wasserstoff und Sauerstoff (Oxyhydrogen), besitzt durch die Elektrolyse eine hohe Sättigung an Wasserdampf. Um den tatsächlichen Volumenanteil an Oxyhydrogen bestimmen zu können, wird zunächst der Anteil an Wasserdampf über die Formeln (4) und (5) berechnet. Da die Parameter für Gastemperatur, Umgebungstemperatur Druck und relative Feuchte bei allen Versuchsdurchläufen die gleiche Größe aufweisen, muss der partialdruck für Wasserdampf, und darüber die Masse je m^3 , nur einmal berechnet werden. Die tatsächlich Masse an Wasserdampf der einzelnen Versuche erhält man dann durch multiplikation mit dem Gesamtvolumen.

3.1 Partialdruck Wasserdampf

$$e_{sat} = 611,2^{\left(\frac{17,62 \times 17,1^\circ C}{243,12 + 17,1^\circ C}\right)} = 611,2^{1,157874} = 1682,86 Pa \quad (17)$$

$$e = 0,9 \times 1682,86 Pa = 1514,58 Pa \quad (18)$$

Die absolute Gasfeuchte in kg/m^3 erhalten wir als Quotienten aus dem Partialdruck des Wasserdampfs durch die Gaskonstante für Wasserdampf ($461,51 J/kgK$) multipliziert mit der Gastemperatur,

$$\rho = \frac{e}{R_D \times T} = \rho_{H_2O,g} \frac{1514,58 Pa}{461,51 J/kg \cdot K \times 17,1^\circ C} = 0,19192 kg/m^3 \quad (19)$$

womit die Stoffmenge und der Volumenanteil des Wasserdampfs zum jeweiligen Gesamtvolumen über

$$n = \frac{m_{H_2O,g}}{M}, \quad m_{H_2O,g} = V \times \rho_{H_2O,g} \quad (20)$$

bestimmt werden kann. Für den ersten Versuch erhalten wir aus den Gleichungen (20), welche wir in die ideale Gasgleichung $pV = nRT$ einsetzen, folgende Werte:

$$m_{H_2O} = 0,001 m^3 \times 0,19192 kg/m^3 = 1,9192 \times 10^{-4} g \quad (21)$$

$$n_{H_2O} = \frac{1,9192 \times 10^{-4} g}{18,01528 g/mol} = 1,0653 \times 10^{-5} mol \quad (22)$$

$$V_{H_2O,g} = \frac{1,0653 \times 10^{-5} mol \times 8,314 \times (273,15 K + 17,1^\circ C)}{1514,58 Pa} = 1,6973 \times 10^{-5} m^3 \quad (23)$$

3.1.1 Berechnungen zu Test 1, Volumina

Durch Subtraktion des Wasserdampfolumens (23) vom Gesamtvolumen ($0,001 m^3$) erhalten wir das Volumen an Oxyhydrogen im trockenem Zustand, welches durch die

thermische Zustandsgleichung für ideale Gase auf das Normvolumen berechnet, und über das stöchiometrische Verhältnis aus Gleichung (1) in das anteilige Volumen von Wasserstoff H_2 und Sauerstoff O_2 zerlegt werden kann:

$$V_{H_2,O_2} = 0,001m^3 - 1,6973 \times 10^{-5}m^3 = 9,8303 \times 10^{-4}m^3 = 0,983l \quad (24)$$

Das Normvolumen⁶ aus Gleichung (24) erhält man über:

$$V_n = \frac{V}{\left(\frac{R \times T_g}{p - p_{H_2O}}\right)} \times V_m \quad (25)$$

$$V_{H_2,O_2,norm} = \frac{9,8303 \times 10^{-4}m^3}{\left(\frac{8,314 \times 290,25K}{100.100Pa - 1514,58Pa}\right)} \times 22,414 m^3/mol = 0,900l \quad (26)$$

$$V_{H_2} = \frac{2}{3}V_{H_2,O_2,norm} = \frac{2}{3} \times 0,900l = 0,600l \quad (27)$$

$$V_{O_2} = \frac{1}{3}V_{H_2,O_2,norm} = \frac{1}{3} \times 0,900l = 0,300l \quad (28)$$

3.1.2 Wirkungsgrad nach Faraday

Die durch Elektrolyse theoretisch maximal abgeschiedene Stoffmenge nach dem Faradayschen Gesetz lässt sich mit der Gleichung (16) bestimmen:

$$V_{H_2,Faraday} = \frac{39,8A \times 28s \times 8,314 \times 273,15K}{2 \times 96.485C \times 101.325Pa} \times 10 = 1,2943 \times 10^{-3}m^3 = 1,2943l \quad (1.0)$$

$$V_{O_2,Faraday} = \frac{39,8A \times 28s \times 8,314 \times 273,15K}{4 \times 96.485C \times 101.325Pa} \times 10 = 6,4717 \times 10^{-4}m^3 = 0,6472l \quad (1.1)$$

$$V_{H_2O_2,Faraday} = V_{H_2,norm} + V_{O_2,norm} = 1,9415l \quad (1.2)$$

Der Faradaysche Wirkungsgrad nach Gleichung (12) beträgt somit:

$$\eta_{Faraday} = \frac{0,600l}{1,2943l} = 46,36\% \quad (1.3)$$

⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Normkubikmeter>

3.1.3 Energetischer Wirkungsgrad

Die aufgewendete Energie je kg Wasserstoff, jeweils bezogen auf den Brennwert und Heizwert des Wasserstoffs, erhalten wir über den Quotienten aus der aufgewendeten Energie zur Masse des erzeugten Wasserstoffs aus Gleichung (11), wobei die Masse m sich aus ρV ergibt:

$$E_{elek} = 12,8V \times 39,8A \times 28s = 14.264,32J \quad (1.4)$$

$$m = \rho \times V = 0,0899 \text{ kg/m}^3 \times 0,600l = 0,05394g \quad (1.5)$$

$$E_{kJ/kg} = \frac{E_{elek}}{m} = \frac{14.264,32J}{0,05394g} = 264.447,90 \text{ kJ/kg} \quad (1.6)$$

$$m = \rho \times V = 0,0899 \text{ kg/m}^3 \times 1,2943l = 0,11636g \quad (1.7)$$

$$\eta_{H_2, H_o} = \frac{141.860 \text{ kJ/kg}}{264.447,90 \text{ kJ/kg}} = 53,64\% \quad (1.8)$$

$$\eta_{H_2, H_u} = \frac{127.450 \text{ kJ/kg}}{264.447,90 \text{ kJ/kg}} = 48,19\% \quad (1.9)$$

3.1.4 Elektrochemisches Äquivalent

Das elektrochemische Äquivalent \ddot{A}_e ist definiert durch Gleichung (13). Durch Umstellung erhält man

$$\ddot{A}_e = \frac{m}{Q} = \frac{m}{I \times t}, \text{ und: } m = \ddot{A}_e \times Q \quad (1.10)$$

Durch Einsetzen der nach Gleichung (1.6) berechneten Massen, erhalten wir das theoretische und empirische elektrochemische Äquivalent:

$$\ddot{A}_{e, \text{theoretisch}} = \frac{0,11636g}{39,8A \times 28s} = 1,0441 \times 10^{-4} \text{ g/As} \quad (1.11)$$

$$\ddot{A}_{e, \text{empirisch}} = \frac{0,05394g}{39,8A \times 28s} = 4,8402 \times 10^{-5} \text{ g/As} \quad (1.12)$$

Der Quotient aus theoretischem und empirischem \ddot{A}_e spiegelt den Wirkungsgrad nach Faraday wieder:

$$\eta_{\text{Faraday}} = \frac{\ddot{A}_{e, \text{empirisch}}}{\ddot{A}_{e, \text{theoretisch}}} = \frac{4,8402 \times 10^{-5} \text{ g/As}}{1,0441 \times 10^{-4} \text{ g/As}} = 46,36\% \quad (1.13)$$

Diese Gleichungen fassen die beiden Faradaygesetze in einer Beziehung zusammen und dienen als Stütze der Atomtheorie, also als starker Hinweis, dass es Atome und Ionen

gibt. Wie aufgrund des Millikan-Versuchs⁷ bekannt ist, ist die elektrische Ladung gequantelt, das heißt, es gibt eine kleinste elektrische Ladung, die Elementarladung. Da gemäß den Faradayschen Gesetzen die Stoffmenge proportional zur Ladung ist, folgt sofort, dass bei der Elektrolyse die Stoffe in kleinsten Portionen umgesetzt werden, eben den Atomen oder den Ionen, die eine Ladung tragen, die entweder der Elementarladung oder einem Vielfachen davon entspricht. Aufgrund dieser Erkenntnisse lässt sich durch Umstellen der Gleichung die Zeit, welche benötigt wird, um eine gewünschte Stoffmenge unter verschiedenen Stromstärken zu erhalten, bestimmen:

$$t = \frac{m}{I \times \ddot{A}_e} \quad (1.14)$$

3.1.5 Spezifischer Energieverbrauch

Der spezifische Energieverbrauch in kW/h für 1 Normkubikmeter H_2 :

$$kWh/Nm^3 = \frac{\bar{U} \times \bar{I} \times \left(\frac{t}{V}\right)}{3600} = \frac{12,8V \times 39,8A \times \left(\frac{28s}{0,60l}\right)}{3600s} = 6,60 kWh/Nm^3 H_2 \quad (1.15)$$

⁷ <http://de.wikipedia.org/wiki/Millikan-Versuch>

3.2 Berechnungen zu Test 2, Volumina

Messwerte: $\bar{U} = 12,4V, \bar{I} = 39,5A, t = 56s, V = 2,0l, T_{Gas} = 17,1^\circ C,$
 $T = 17,8^\circ C, p = 1bar, \varphi = 90\%$

Volumen Oxyhydrogen:

$$m_{H_2O} = 0,002m^3 \times 0,19192 kg/m^3 = 3,8384 \times 10^{-4}g \quad (2.1)$$

$$n_{H_2O} = \frac{3,8384 \times 10^{-4}g}{18,01528 g/mol} = 2,1306 \times 10^{-5}mol \quad (2.2)$$

$$V_{H_2O,g} = \frac{2,1306 \times 10^{-5}mol \times 8,314 \times (273,15K + 17,1^\circ C)}{1514,58Pa} = 3,3946 \times 10^{-5}m^3 \quad (2.3)$$

$$V_{H_2,O_2} = 0,002m^3 - 3,3946 \times 10^{-5}m^3 = 1,9660 \times 10^{-3}m^3 = 1,966l \quad (2.4)$$

$$V_{H_2,O_2,norm} = \frac{1,966 \times 10^{-3}m^3}{\left(\frac{8,314 \times 290,25K}{100.100Pa - 1514,58Pa}\right)} \times 22,414 m^3/mol = 1,80l \quad (2.5)$$

$$V_{H_2} = \frac{2}{3}V_{H_2,O_2,norm} = \frac{2}{3} \times 1,80l = 1,20l \quad (2.6)$$

$$V_{O_2} = \frac{1}{3}V_{H_2,O_2,norm} = \frac{1}{3} \times 1,816l = 0,60l \quad (2.7)$$

3.2.1 Wirkungsgrad nach Faraday

Theoretisch maximal abgeschiedene Stoffmenge:

$$V_{H_2,Faraday} = \frac{39,5A \times 56s \times 8,314 \times 273,15K}{2 \times 96.485C \times 101.325Pa} \times 10 = 2,5691 \times 10^{-3}m^3 = 2,5691l \quad (2.8)$$

$$V_{O_2,Faraday} = \frac{39,5A \times 56s \times 8,314 \times 273,15K}{4 \times 96.485C \times 101.325Pa} \times 10 = 1,2846 \times 10^{-3}m^3 = 1,2846l \quad (2.9)$$

$$V_{H_2O_2,Faraday} = V_{H_2,norm} + V_{O_2,norm} = 2,5691 + 1,2846 = 3,8537l \quad (2.10)$$

Der Faradaysche Wirkungsgrad nach Gleichung (12) beträgt somit:

$$\eta_{Faraday} = \frac{1,20l}{2,5691l} = 46,71\% \quad (2.11)$$

3.2.2 Energetischer Wirkungsgrad

Aufgewendete Energie je kg Wasserstoff, jeweils bezogen auf den Brennwert H_o und Heizwert H_u des Wasserstoffs:

$$E_{elek} = 12,4V \times 39,5A \times 56s = 27.428,80J \quad (2.12)$$

$$E_{kJ/kg} = \frac{E_{elek}}{m} = \frac{27.428,80J}{0,10788g} = 254.252,87 \text{ kJ/kg} \quad (2.13)$$

$$m = \rho \times V = 0,0899 \text{ kg/m}^3 \times 1,20l = 0,10788g \quad (2.14)$$

$$\eta_{H_2, H_o} = \frac{141.860 \text{ kJ/kg}}{254.252,87 \text{ kJ/kg}} = 55,79\% \quad (2.15)$$

$$\eta_{H_2, H_u} = \frac{127.450 \text{ kJ/kg}}{254.252,87 \text{ kJ/kg}} = 50,13\% \quad (2.16)$$

3.2.3 Elektrochemisches Äquivalent

Durch Einsetzen der nach Gleichung (1.6) berechneten Massen in Gleichung (1.9) erhalten wir das theoretische und empirische elektrochemische Äquivalent:

$$\ddot{A}_{e,theoretisch} = \frac{0,23096g}{39,5A \times 56s} = 1,0441 \times 10^{-4} \text{ g/As} \quad (2.17)$$

$$\ddot{A}_{e,empirisch} = \frac{0,10788g}{39,5A \times 56s} = 4,8770 \times 10^{-5} \text{ g/As} \quad (2.18)$$

Der Quotient aus theoretischem und empirischem \ddot{A}_e spiegelt den Wirkungsgrad nach Faraday wieder:

$$\eta_{Faraday} = \frac{\ddot{A}_{e,empirisch}}{\ddot{A}_{e,theoretisch}} = \frac{4,8770 \times 10^{-5} \text{ g/As}}{1,0441 \times 10^{-4} \text{ g/As}} = 46,71\% \quad (2.19)$$

3.2.4 Spezifischer Energieverbrauch

Der spezifische Energieverbrauch in kWh/h für 1 Normkubikmeter H_2 :

$$kWh/Nm^3 = \frac{\bar{U} \times \bar{I} \times \left(\frac{t}{V}\right)}{3600} = \frac{12,4V \times 39,5A \times \left(\frac{56s}{1,20l}\right)}{3600s} = 6,35 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ H}_2 \quad (2.20)$$

3.3 Berechnungen zu Test 3, Volumina

Messwerte: $\bar{U} = 14,0V, \bar{I} = 61,0A, t = 43s, V = 2,4l, T_{Gas} = 17,1^\circ C,$
 $T = 17,8^\circ C, p = 1bar, \varphi = 90\%$

Volumen Oxyhydrogen:

$$m_{H_2O} = 0,0024m^3 \times 0,19192 kg/m^3 = 4,6061 \times 10^{-4}g \quad (3.1)$$

$$n_{H_2O} = \frac{4,6061 \times 10^{-4}g}{18,01528 g/mol} = 2,5567 \times 10^{-5}mol \quad (3.2)$$

$$V_{H_2O,g} = \frac{2,5567 \times 10^{-5}mol \times 8,314 \times (273,15K + 17,1^\circ C)}{1514,58Pa} = 4,0736 \times 10^{-5}m^3 \quad (3.3)$$

$$V_{H_2,O_2} = 0,0024m^3 - 4,0736 \times 10^{-5}m^3 = 2,3593 \times 10^{-3}m^3 = 2,359l \quad (3.4)$$

$$V_{H_2,O_2,norm} = \frac{2,3593 \times 10^{-3}m^3}{\left(\frac{8,314 \times 290,25K}{100.100Pa - 1514,58Pa}\right)} \times 22,414 m^3/mol = 2,16l \quad (3.5)$$

$$V_{H_2} = \frac{2}{3}V_{H_2,O_2,norm} = \frac{2}{3} \times 2,16l = 1,44l \quad (3.6)$$

$$V_{O_2} = \frac{1}{3}V_{H_2,O_2,norm} = \frac{1}{3} \times 2,16l = 0,72l \quad (3.7)$$

3.3.1 Wirkungsgrad nach Faraday

Theoretisch maximal abgeschiedene Stoffmenge:

$$V_{H_2,Faraday} = \frac{61A \times 43s \times 8,314 \times 273,15K}{2 \times 96.485C \times 101.325Pa} \times 10 = 3,0465 \times 10^{-3}m^3 = 3,0465l \quad (3.8)$$

$$V_{O_2,Faraday} = \frac{61A \times 43s \times 8,314 \times 273,15K}{4 \times 96.485C \times 101.325Pa} \times 10 = 1,5232 \times 10^{-3}m^3 = 1,5232l \quad (3.9)$$

$$V_{H_2O_2,Faraday} = V_{H_2,norm} + V_{O_2,norm} = 3,0465 + 1,5232 = 4,5697l \quad (3.10)$$

Der Faradaysche Wirkungsgrad nach Gleichung (12) beträgt somit:

$$\eta_{Faraday} = \frac{1,44l}{3,0465l} = 47,27\% \quad (3.11)$$

3.3.2 Energetischer Wirkungsgrad

Aufgewendete Energie je kg Wasserstoff, jeweils bezogen auf den Brennwert H_0 und Heizwert H_u des Wasserstoffs:

$$E_{elek} = 14,0V \times 61,0A \times 43s = 36.722,00J \quad (3.12)$$

$$E_{kJ/kg} = \frac{E_{elek}}{m} = \frac{36.722,00j}{0,12946g} = 283.655,18 kJ/kg \quad (3.13)$$

$$m = \rho \times V = 0,0899 kg/m^3 \times 1,44l = 0,12946g \quad (3.14)$$

$$\eta_{H_2, H_0} \frac{141.860 kJ/kg}{283.655,18 kJ/kg} = 50,01\% \quad (3.15)$$

$$\eta_{H_2, H_u} \frac{127.450 kJ/kg}{283.655,18 kJ/kg} = 44,93\% \quad (3.16)$$

3.3.3 Elektrochemisches Äquivalent

Durch Einsetzen der nach Gleichung (1.6) berechneten Massen in Gleichung (1.9) erhalten wir das theoretische und empirische elektrochemische Äquivalent:

$$\ddot{A}_{e,theoretisch} = \frac{0,27388g}{61,0A \times 43s} = 1,0441 \times 10^{-4} g/As \quad (3.17)$$

$$\ddot{A}_{e,empirisch} = \frac{0,12946g}{61,0A \times 43s} = 4,9355 \times 10^{-5} g/As \quad (3.18)$$

Der Quotient aus theoretischem und empirischem \ddot{A}_e spiegelt den Wirkungsgrad nach Faraday wieder:

$$\eta_{Faraday} = \frac{\ddot{A}_{e,empirisch}}{\ddot{A}_{e,theoretisch}} = \frac{4,9355 \times 10^{-5} g/As}{1,0441 \times 10^{-4} g/As} = 47,27\% \quad (3.19)$$

3.3.4 Spezifischer Energieverbrauch

Der spezifische Energieverbrauch in kWh/h für 1 Normkubikmeter H_2 :

$$kWh/Nm^3 = \frac{\bar{U} \times \bar{I} \times \left(\frac{t}{\bar{V}}\right)}{3600} = \frac{14V \times 61A \times \left(\frac{43s}{1,44l}\right)}{3600s} = 7,08 kWh/Nm^3 H_2 \quad (3.20)$$

3.4 Berechnungen zu Test 4, Volumina

Messwerte: $\bar{U} = 10,5V, \bar{I} = 19,1A, t = 107s, V = 1,8l, T_{Gas} = 17,1^\circ C,$
 $T = 17,8^\circ C, p = 1bar, \varphi = 90\%$

Volumen Oxyhydrogen:

$$m_{H_2O} = 0,0018m^3 \times 0,19192 kg/m^3 = 3,4546 \times 10^{-4}g \quad (4.1)$$

$$n_{H_2O} = \frac{4,4546 \times 10^{-4}g}{18,01528 g/mol} = 1,9175 \times 10^{-5}mol \quad (4.2)$$

$$V_{H_2O,g} = \frac{1,9175 \times 10^{-5}mol \times 8,314 \times (273,15K + 17,1^\circ C)}{1514,58Pa} = 3,0552 \times 10^{-5}m^3 \quad (4.3)$$

$$V_{H_2,O_2} = 0,0018m^3 - 3,0552 \times 10^{-5}m^3 = 1,7694 \times 10^{-3}m^3 = 1,769l \quad (4.4)$$

$$V_{H_2,O_2,norm} = \frac{1,7694 \times 10^{-3}m^3}{\left(\frac{8,314 \times 290,25K}{100.100Pa - 1514,58Pa}\right)} \times 22,414 m^3/mol = 1,62l \quad (4.5)$$

$$V_{H_2} = \frac{2}{3}V_{H_2,O_2,norm} = \frac{2}{3} \times 1,62l = 1,08l \quad (4.6)$$

$$V_{O_2} = \frac{1}{3}V_{H_2,O_2,norm} = \frac{1}{3} \times 1,62l = 0,54l \quad (4.7)$$

3.4.1 Wirkungsgrad nach Faraday

Theoretisch maximal abgeschiedene Stoffmenge:

$$V_{H_2, Faraday} = \frac{19,1A \times 107s \times 8,314 \times 273,15K}{2 \times 96.485C \times 101.325Pa} \times 10 = 2,3737 \times 10^{-3}m^3 = 2,374l \quad (4.8)$$

$$V_{O_2, Faraday} = \frac{19,1A \times 107s \times 8,314 \times 273,15K}{4 \times 96.485C \times 101.325Pa} \times 10 = 1,1868 \times 10^{-3}m^3 = 1,187l \quad (4.9)$$

$$V_{H_2O_2, Faraday} = V_{H_2,norm} + V_{O_2,norm} = 2,3737 + 1,1868 = 3,56l \quad (4.10)$$

Der Faradaysche Wirkungsgrad nach Gleichung (12) beträgt somit:

$$\eta_{Faraday} = \frac{1,08l}{2,374l} = 45,49\% \quad (4.11)$$

3.4.2 Energetischer Wirkungsgrad

Aufgewendete Energie je *kg* Wasserstoff, jeweils bezogen auf den Brennwert H_0 und Heizwert H_U des Wasserstoffs:

$$E_{elek} = 10,5V \times 19,1A \times 107s = 21.458,85J \quad (4.12)$$

$$E_{kJ/kg} = \frac{E_{elek}}{m} = \frac{21.485,85J}{0,09709g} = 221.298,28 \text{ kJ/kg} \quad (4.13)$$

$$m = \rho \times V = 0,0899 \text{ kg/m}^3 \times 1,08l = 0,09709g \quad (4.14)$$

$$\eta_{H_2, H_0} \frac{141.860 \text{ kJ/kg}}{221.298,28 \text{ kJ/kg}} = 64,10\% \quad (4.15)$$

$$\eta_{H_2, H_u} \frac{127.450 \text{ kJ/kg}}{221.298,28 \text{ kJ/kg}} = 57,59\% \quad (4.16)$$

3.4.3 Elektrochemisches Äquivalent

Durch Einsetzen der nach Gleichung (1.6) berechneten Massen in Gleichung (1.9) erhalten wir das theoretische und empirische elektrochemische Äquivalent:

$$\ddot{A}_{e, \text{theoretisch}} = \frac{0,21342g}{19,1A \times 107s} = 1,0443 \times 10^{-4} \text{ g/As} \quad (4.17)$$

$$\ddot{A}_{e, \text{empirisch}} = \frac{0,09709g}{19,1A \times 107s} = 4,7506 \times 10^{-5} \text{ g/As} \quad (4.18)$$

Der Quotient aus theoretischem und empirischem \ddot{A}_e spiegelt den Wirkungsgrad nach Faraday wieder:

$$\eta_{Faraday} = \frac{\ddot{A}_{e, \text{empirisch}}}{\ddot{A}_{e, \text{theoretisch}}} = \frac{4,7506 \times 10^{-5} \text{ g/As}}{1,0443 \times 10^{-4} \text{ g/As}} = 45,49\% \quad (4.19)$$

3.4.4 Spezifischer Energieverbrauch

Der spezifische Energieverbrauch in kWh/h für 1 Normkubikmeter H_2 :

$$\text{kWh/Nm}^3 = \frac{\bar{U} \times \bar{I} \times \left(\frac{t}{\bar{V}}\right)}{3600} = \frac{10,5V \times 19,1A \times \left(\frac{107s}{1,08l}\right)}{3600s} = 5,52 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ H}_2 \quad (4.20)$$

3.5 Zusammenfassung

| | Wirkungsgrad Brennwert (H_0) | Wirkungsgrad Heizwert (H_i) | Wirkungsgrad Faraday | Spezifischer Energiever- brauch* | Kammer- spannung | Zellenwi- derstand | Liter H_2 /min | Ampere Liter H_2 | Watt Sekunde | mA/ cm^2 |
|---------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|--|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|---------------|
| Test 1 | 53,64% | 48,19% | 46,36% | 6,60kWh/Nm ³ | 2,56V | 0,32 Ω | 1,29l | 1857As/l | 509,44Ws | 368 |
| Test 2 | 55,79% | 50,13% | 46,71% | 6,35kWh/Nm ³ | 2,48V | 0,31 Ω | 1,29l | 1843As/l | 489,80Ws | 365 |
| Test 3 | 50,01% | 44,93% | 47,27% | 7,08kWh/Nm ³ | 2,80V | 0,22 Ω | 2,01l | 1821As/l | 854,00Ws | 564 |
| Test 4 | 64,10% | 57,59% | 45,49% | 5,52kWh/Nm ³ | 2,10V | 0,55 Ω | 0,60l | 1892As/l | 200,55Ws | 176 |

* Bei der Industriellen alkalischen Elektrolyse (atm. Systeme) liegt der spezifische Energieverbrauch bei 4,3-4,6kWh/Nm³ H₂

4. Effizienz

Für eine effektive Optimierung des Elektrolyse-Stacks fehlt, wie eingangs erwähnt, die Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrolyseurs. Berücksichtigt man, dass als Elektrolyt eine zehnprozentige Kaliumhydroxidlauge verwendet wurde, könnte eine weitere Verringerung des Widerstandes in der Erhöhung der KOH-Konzentration liegen, was durch die Werte der Tabelle 3.5 anzunehmen ist. Damit kann der Stromfluss bei gleichbleibender Klemmspannung möglicherweise erhöht werden.

Obwohl der getestete Elektrolyse-Stack sowohl qualitativ als auch quantitativ (bei der Produktion von Oxyhydrogen) deutlich aus der Masse am Markt erhältlicher Zellen herausragt, lassen die bisher gewonnenen Daten den Rückschluss zu, dass sogar noch weiteres Potenzial zur Leistungssteigerung vorhanden ist.

Für eine weitergehende Analyse, welche bezüglich der Effizienzsteigerung des Elektrolyse-Stacks Vorhersagen ermöglicht, liegen bedauerlicherweise nicht genügend Daten vor.

Wir hoffen, dass diese Arbeit den/die eine/n oder andere/n Kollegen/in anspricht, die weiterführenden Tests an diesem Elektrolyse-Stack durchzuführen.