



LEISTUNGSTEST ELEKTROLYSE-STACK

Energetischer und Faradayscher Wirkungsgrad

„HHO-Generator HG21“ Elektrolyse-Stack von Alexander Weis

„Travelnova TN-S1“ Elektrolyse-Stack von Saša Smolčić



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/>.



Inhaltsverzeichnis

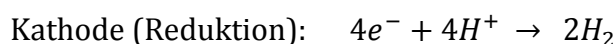
1. [Theoretische Grundlagen](#)
 - 1.2 [Wirkungsgrad des Elektrolyseurs](#)
 - 1.2.1 [Faradaysche Gesetze](#)
2. [Versuchsaufbau](#)
3. [Berechnungen zum Wirkungsgrad HG21](#)
 - 3.1. [Partialdruck Wasserdampf](#)
 - 3.1.1. [Berechnungen zu HG21, Volumina](#)
 - 3.1.2. [Wirkungsgrad nach Faraday](#)
 - 3.1.3. [Energetischer Wirkungsgrad](#)
 - 3.1.4. [Elektrochemisches Äquivalent](#)
 - 3.1.5. [spezifischer Energieverbrauch](#)
- 3.2. [Berechnungen zum Wirkungsgrad TRAVELNOVA S/1.0](#)
 - 3.2.0. [Partialdruck Wasserdampf](#)
 - 3.2.1. [Wirkungsgrad nach Faraday](#)
 - 3.2.2. [Energetischer Wirkungsgrad](#)
 - 3.2.3. [Elektrochemisches Äquivalent](#)
 - 3.2.4. [spezifischer Energieverbrauch](#)
- 3.5. [Zusammenfassung](#)



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 Volumen-

berechnung berücksichtigt. Der Partialdruck e_{rf} des Wasserdampfs lässt sich mit der Magnus-Formel nach Murray-Tetens¹² bestimmen:

$$e_{sat} = 610,78 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T}{237,3 + T}\right)} \quad (4)$$

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

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 (127.450 kJ/kg) des Wasserstoffs genutzt. Wird die Gesamtkette betrachtet bzw. der Wasserstoff chemisch verwertet, ist es sinnvoller, den Brennwert (141.860 kJ/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_O) aus:

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

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

¹ <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450%281967%29006%3C0203%3AOTCOSV%3E2.0.CO%3B2>

² <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=AD0778316>

ideal-reversiblen Zustand betrieben werden kann. Der auf den Heizwert bezogene Wirkungsgrad dient der systemischen Analyse einer gesamten Prozesskette.

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

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

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

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 Äquivalent³ 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 Valenzelektron⁴ (=mol/ z) eines Stoffes abzuscheiden, sind genau $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ Ionen/mol (Avogadro-Konstante)⁵ nötig, die dazu die Ladungsmenge F (Faradaysche Zahl = 96.845C/mol)⁶ 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:

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

³ https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrochemisches_%C3%84quivalent

⁴ <http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Valenzelektron.html>

⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Avogadro-Konstante>

⁶ <http://de.wikipedia.org/wiki/Faraday-Konstante>

2. Versuchsaufbau⁷:

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
HG21	12,900V	27,406A	600s	15,30l	26,8°C	1010hPa	100%	20,2°C
S/1.0	12,119V	20,413A	600s	13,61l	24,5°C	1010hPa	99%	20,2°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



Testaufbau zur Messdatenerfassung des Elektrolyse-Stacks mit „TRAVELNOVA TN-S1“

⁷ Test HHO-Generator HG21: <http://youtu.be/7gUldklaapg>

Test Travelnova TN-S1: <http://youtu.be/wep6KgwnXHU>

3. Berechnungen zum Wirkungsgrad „HG21“

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. Mit den Parametern Temperatur, Druck und relative Feuchte kann der Partialdruck des Wasserdampfs und hierüber die Masse je m^3 berechnet werden.

3.1 Partialdruck Wasserdampf

$$e_{sat} = 610,78 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times 26,8^\circ C}{237,3 + 26,8^\circ C}\right)} = 610,78 \times 5,7687 = 3.523,41 Pa \quad (17)$$

$$e = 1 \times 3.523,41 Pa = 3.523,41 Pa \quad (18)$$

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,

$$\rho = \frac{e}{R_D \times T} = \rho_{H_2O,g} = \frac{3.523,41 Pa}{461,51 J/kg \cdot K \times 299,95 K} = 0,025453 kg/m^3 \quad (19)$$

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:

$$m_{H_2O} = 0,0153 m^3 \times 0,025453 kg/m^3 = 3,8943 \times 10^{-4} kg \quad (21)$$

$$n_{H_2O} = \frac{3,8943 \times 10^{-7} g}{18,01528 g/mol} = 2,16 \times 10^{-8} mol \quad (22)$$

$$V_{H_2O,g} = \frac{2,16 \times 10^{-8} mol \times 8,314 \times (273,15 K + 26,8^\circ C)}{3.523,41 Pa} = 1,5 \times 10^{-8} m^3 \quad (23)$$

3.1.1 Berechnungen zu HG21, Volumina

Durch Subtraktion des Wasserdampfvolumens (23) vom Gesamtvolumen ($0,0153\text{m}^3$) 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:

$$V_{H_2,O_2} = 0,0153\text{m}^3 - 1,5 \times 10^{-8}\text{m}^3 = 1,52999 \times 10^{-2}\text{m}^3 = 15,2999\text{l} \quad (24)$$

Das Normvolumen⁸ aus Gleichung (24) erhält man über:

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

$$V_{H_2,O_2,norm} = \frac{1,52999 \times 10^{-2}\text{m}^3}{\left(\frac{8,314 \times 299,95\text{K}}{101.000\text{Pa} - 3.523,41\text{Pa}}\right)} \times 22,414\text{m}^3/\text{mol} = 13,404\text{l} \quad (26)$$

$$V_{H_2} = \frac{2}{3}V_{H_2,O_2,norm} = \frac{2}{3} \times 13,404\text{l} = 8,936\text{l} \quad (27)$$

$$V_{O_2} = \frac{1}{3}V_{H_2,O_2,norm} = \frac{1}{3} \times 13,404\text{l} = 4,468\text{l} \quad (28)$$

3.1.2 Wirkungsgrad nach Faraday

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

$$V_{H_2,Far} = \frac{27,406\text{A} \times 600\text{s} \times 8,314 \times 273,15\text{K}}{2 \times 96.485\text{C} \times 101.325\text{Pa}} \times 20 = 3,8197 \times 10^{-2}\text{m}^3 = 38,197\text{l} \quad (1.0)$$

$$V_{O_2,Far} = \frac{27,406\text{A} \times 600\text{s} \times 8,314 \times 273,15\text{K}}{4 \times 96.485\text{C} \times 101.325\text{Pa}} \times 20 = 1,9098 \times 10^{-2}\text{m}^3 = 19,098\text{l} \quad (1.1)$$

$$V_{H_2O_2,Faraday} = V_{H_2,norm} + V_{O_2,norm} = 57,295\text{l} \quad (1.2)$$

Der Faradaysche Wirkungsgrad nach Gleichung (12) beträgt somit:

$$\eta_{Faraday} = \frac{8,936\text{l}}{38,197\text{l}} = 23,39\% \quad (1.3)$$

⁸ <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:

$$E_{elek} = 12,9V \times 27,406A \times 600s = 212.122,44J \quad (1.4)$$

$$m_{empirisch} = \rho \times V = 0,0899 \text{ kg/m}^3 \times 0,008936 \text{ m}^3 = 8,033 \times 10^{-4} \text{ kg} \quad (1.5)$$

$$E_{kJ/kg} = \frac{E_{elek}}{m} = \frac{212,12kJ}{8,033 \times 10^{-4} \text{ kg}} = 264.060,75 \text{ kJ/kg} \quad (1.6)$$

$$m_{theoretisch} = \rho \times V = 0,0899 \text{ kg/m}^3 \times 3,8197 \times 10^{-2} \text{ m}^3 = 3,4339 \times 10^{-3} \text{ kg} \quad (1.7)$$

$$\eta_{H_2, H_o} \frac{141.860 \text{ kJ/kg}}{264.060,75 \text{ kJ/kg}} = 53,72\% \quad (1.8)$$

$$\eta_{H_2, H_u} \frac{127.450 \text{ kJ/kg}}{264.060,75 \text{ kJ/kg}} = 48,26\% \quad (1.9)$$

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 (1.5, 1.7) berechneten Massen, erhalten wir das theoretische und empirische elektrochemische Äquivalent:

$$\ddot{A}_{e,theoretisch} = \frac{3,434 \times 10^{-6} \text{ g}}{27,406A \times 600s} = 2,088 \times 10^{-10} \text{ g/As} \quad (1.11)$$

$$\ddot{A}_{e,empirisch} = \frac{8,033 \times 10^{-7} \text{ g}}{27,406A \times 600s} = 4,88 \times 10^{-11} \text{ g/As} \quad (1.12)$$

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

$$\eta_{Faraday} = \frac{\ddot{A}_{e,empirisch}}{\ddot{A}_{e,theoretisch}} = \frac{4,88 \times 10^{-11} \text{ g/As}}{2,088 \times 10^{-10} \text{ g/As}} = 23,40\% \quad (1.13)$$

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

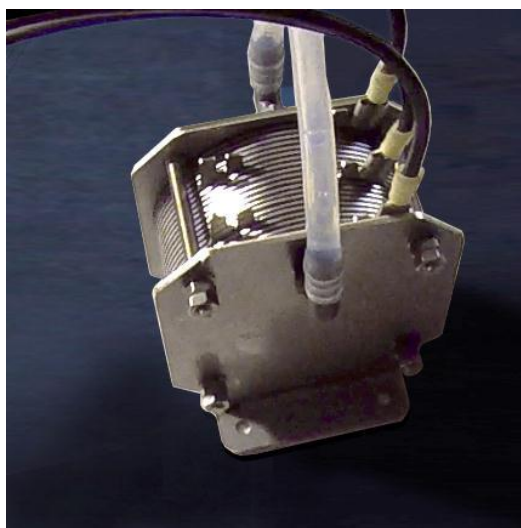
gibt. Wie aufgrund des Millikan-Versuchs⁹ bekannt ist, ist die elektrische Ladung gequantelt, das heißt, es gibt eine kleinste elektrische Ladung, die Elementarladung. Da gemäß den faradayschen Gesetzen die Stoffmenge proportional zur Ladung ist, folgt sofort, dass bei der Elektrolyse die Stoffe in kleinsten 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 von „HHO-Generator HG21“

Der spezifische Energieverbrauch in kWh für 1 Normkubikmeter H_2 :

$$kWh/Nm^3 = \frac{\bar{U} \times \bar{I} \times \left(\frac{t}{V}\right)}{3600} = \frac{12,9V \times 27,406A \times \left(\frac{600s}{8,936l}\right)}{3600s} = 6,59 kWh/Nm^3 H_2 \quad (1.15)$$



Elektrolyse-Stack „HG21 HHO Generator“
von Alexander Weis

⁹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Millikan-Versuch>

3.2 Berechnungen zum Wirkungsgrad „TRAVELNOVA TN-S1“

Messwerte: $\bar{U} = 12,119V, \bar{I} = 20,413A, t = 600s, V = 13,61l, T_{Gas} = 24,5^\circ C,$
 $T = 20,2^\circ C, p = 1,01bar, \varphi = 99\%$

3.2.0 Partialdruck Wasserdampf

$$e_{sat} = 610,78 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times 24,5^\circ C}{237,3 + 24,5^\circ C}\right)} = 610,78 \times 5,03352 = 3.074,37Pa \quad (2.17)$$

$$e = 0,99 \times 3.074,37Pa = 3.043,63Pa \quad (2.18)$$

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

$$\rho = \frac{e}{R_D \times T} = \rho_{H_2O,g} = \frac{3.043,63Pa}{461,51J/kg \cdot K \times 297,65K} = 0,022156 kg/m^3 \quad (2.19)$$

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:

$$m_{H_2O} = 0,01361m^3 \times 0,022156 kg/m^3 = 3,01552 \times 10^{-4}kg \quad (2.1)$$

$$n_{H_2O} = \frac{3,01552 \times 10^{-7}g}{18,01528 g/mol} = 1,6 \times 10^{-8}mol \quad (2.2)$$

$$V_{H_2O,g} = \frac{1,6 \times 10^{-8}mol \times 8,314 \times (273,15K + 24,5^\circ C)}{3.043,63Pa} = 1,3 \times 10^{-8}m^3 \quad (2.3)$$

Volumen Oxyhydrogen:

$$V_{H_2,O_2} = 0,01361m^3 - 1,3 \times 10^{-8}m^3 = 1,3609987 \times 10^{-2}m^3 = 13,60999l \quad (2.4)$$

$$V_{H_2,O_2,norm} = \frac{1,360999 \times 10^{-2} m^3}{\left(\frac{8,314 \times 297,65 K}{101.000 Pa - 3.043,63 Pa} \right)} \times 22,414 m^3/mol = 12,0752 l \quad (2.5)$$

$$V_{H_2} = \frac{2}{3} V_{H_2,O_2,norm} = \frac{2}{3} \times 12,0752 l = 8,050 l \quad (2.6)$$

$$V_{O_2} = \frac{1}{3} V_{H_2,O_2,norm} = \frac{1}{3} \times 12,0752 l = 4,025 l \quad (2.7)$$

3.2.1 Wirkungsgrad nach Faraday

Theoretisch maximal abgeschiedene Stoffmenge:

$$V_{H_2,Far} = \frac{20,413 A \times 600 s \times 8,314 \times 273,15 K}{2 \times 96.485 C \times 101.325 Pa} \times 24 = 3,4141 \times 10^{-2} m^3 = 34,141 l \quad (2.8)$$

$$V_{O_2,Far} = \frac{20,413 A \times 600 s \times 8,314 \times 273,15 K}{4 \times 96.485 C \times 101.325 Pa} \times 24 = 1,7070 \times 10^{-2} m^3 = 17,070 l \quad (2.9)$$

$$V_{H_2O_2,Faraday} = V_{H_2,norm} + V_{O_2,norm} = 34,141 + 17,070 = 51,211 l \quad (2.10)$$

Der Faradaysche Wirkungsgrad nach Gleichung (12) beträgt somit:

$$\eta_{Faraday} = \frac{8,050 l}{34,141 l} = 23,58\% \quad (2.11)$$

3.2.2 Energetischer Wirkungsgrad

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

$$E_{elek} = 12,119 V \times 20,413 A \times 600 s = 148.431,09 J \quad (2.12)$$

$$E_{kJ/kg} = \frac{E_{elek}}{m} = \frac{148,43 kJ}{7,24 \times 10^{-4} kg} = 205.013,81 kJ/kg \quad (2.13)$$

$$m_{empirisch} = \rho \times V = 0,0899 kg/m^3 \times 8,05 \times 10^{-3} m^3 = 7,24 \times 10^{-4} kg \quad (2.14)$$

$$m_{theoretisch} = \rho \times V = 0,0899 kg/m^3 \times 3,41 \times 10^{-2} m^3 = 3,07 \times 10^{-3} kg \quad (2.15)$$

$$\eta_{H_2,H_o} = \frac{141.860 kJ/kg}{205.013,81 kJ/kg} = 69,19\% \quad (2.16)$$

$$\eta_{H_2,H_u} = \frac{127.450 kJ/kg}{205.013,81 kJ/kg} = 62,17\% \quad (2.17)$$

3.2.3 Elektrochemisches Äquivalent

Durch Einsetzen der nach Gleichung (2.14, 2.15) berechneten Massen in Gleichung (2.18, 2.19) erhalten wir das theoretische und empirische elektrochemische Äquivalent:

$$\ddot{A}_{e,theoretisch} = \frac{3,07 \times 10^{-6} g}{20,413 A \times 600 s} = 2,51 \times 10^{-10} g/As \quad (2.18)$$

$$\ddot{A}_{e,empirisch} = \frac{7,24 \times 10^{-7} g}{20,413 A \times 600 s} = 5,91 \times 10^{-11} g/As \quad (2.19)$$

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

$$\eta_{Faraday} = \frac{\ddot{A}_{e,empirisch}}{\ddot{A}_{e,theoretisch}} = \frac{5,91 \times 10^{-11} g/As}{2,51 \times 10^{-10} g/As} = 23,54\% \quad (2.20)$$

3.2.4 Spezifischer Energieverbrauch von „Travelnova TN-S1“

Der spezifische Energieverbrauch in kWh für 1 Normkubikmeter H_2 :

$$kWh/Nm^3 = \frac{\bar{U} \times \bar{I} \times \left(\frac{t}{\bar{V}}\right)}{3600} = \frac{12,119 V \times 20,413 A \times \left(\frac{600 s}{8,05 l}\right)}{3600 s} = 5,12 kWh/Nm^3 H_2 \quad (2.21)$$



Elektrolyse-Stack „TRAVELNOVA TN-S1“
von Saša Smolčić

3.5 Zusammenfassung

	Wirkungsgrad Brennwert (H_0)	Wirkungsgrad Heizwert (H_i)	Wirkungsgrad Faraday	Spezifischer Energiever- brauch*	Kammer- spannung	Zellenwi- derstand	N-Liter H_2 /min	Ampere Liter H_2	Watt Sekunde	mA/ cm^2
HG 21	53,72%	48,26%	23,39%	6,59 kWh/Nm ³	2,58 V	0,47 Ω	0,89 l	1840 As/l	353,54 Ws	438
TN-S1	69,19%	62,17%	23,58%	5,12 kWh/Nm ³	2,02 V	0,59 Ω	0,81 l	1521 As/l	247,38 Ws	327

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



Die Alternative zu russischem Erdgas,
zu südeuropäischen Arbeitslosen,
zur Klimaerwärmung, zum Fracking,
zu steigenden Energiekosten,
zum Ausbau der Stromnetze,
zu Kohle und Uran, zum CO₂-
Ausstoß und zur CO₂-Verpressung!
Ein simples Konzept » H₂EK «
steht für gesunden Wohlstand
durch kostenlose Energierohstoffe
und ist das Gegenstück zum
Krieg ums Öl. Helfen Sie jetzt mit!

**QUELL DES FRIEDENS – WASSER ALS ROHSTOFF
MIT EINER WAHREN ENERGIEWENDE KRISEN BEENDEN**

Kaufen ([hier klicken](#)) **oder** kostenlos herunterladen und bitte spenden ([hier klicken](#)).



QUELL des FRIEDENS WASSER als ROHSTOFF

Parkstraße
Verlag

Mit einer wahren Energiewende Krisen beenden