

## FAQs zum Thema Wasserstoff und Energie bei Brennstoffzellen

Nl = Normliter und Nm<sup>3</sup> = Normkubikmeter bei 0°C und 101325 Pa

### Wie viel Energie steckt im Wasserstoff?

Im Wasserstoff ist chemische Energie gespeichert. Der Betrag wird in kJ/mol, kJ/Nl oder kJ/g angegeben. Oft erfolgt die Umrechnung in kWh (1 kWh ≡ 3600 Ws ≡ 3,6 kJ).

Die chemische Energie oder Enthalpie bezieht sich auf den Brennwert (Index B) oder Heizwert (Index H) von Wasserstoff. Im Brennwert ist die Verdampfungsenthalpie von Wasser mit enthalten, da hier das Produktwasser flüssig anfällt. Deshalb ist der Brennwert immer größer als der Heizwert.

Enthalpie (chem. Energie)  $\Delta H_B = 285,8 \text{ kJ/mol}$

$$\Delta H_H = 241,8 \text{ kJ/mol}$$

chem. Energie pro Volumen  $E_V = \frac{\Delta H}{V_{mol}}$

$$E_{V,B} = \frac{285,8 \text{ kJ/mol}}{22,414 \text{ Nl/mol}} = 12,75 \text{ kJ/Nl} \hat{=} 3,54 \text{ kWh/Nm}^3$$

$$E_{V,H} = 10,79 \text{ kJ/Nl} \hat{=} 3,00 \text{ kWh/Nm}^3$$

chem. Energie pro Masse  $E_{m,B} = \frac{285,8 \text{ kJ/mol}}{2 \text{ g/mol}} = 142,9 \text{ kJ/g} \hat{=} 39,69 \text{ kWh/g}$

$$E_{m,H} = 120,9 \text{ kJ/g} \hat{=} 33,58 \text{ kWh/g}$$

### Wie viel Liter Wasserstoff werden bei einem Ampere pro Zeiteinheit umgesetzt?

Nach dem Faraday-Gesetz gilt:

$$Q = I \cdot t = n \cdot z \cdot F \quad \text{oder} \quad n = \frac{I \cdot t}{z \cdot F} \quad \text{oder} \quad \varphi = \frac{\dot{n}}{I} = \frac{1}{z \cdot F}$$

Molenstrom  $\varphi_{mol} = \frac{1}{2 \cdot 96485,3 \text{ As/mol}} = 5,1821 \cdot 10^{-6} \text{ mol/As}$

Volumenstrom  $\varphi_{Vol} = \varphi_{mol} \cdot 22,414 \text{ Nl/mol} \cdot 60 \text{ s/min} = 6,969 \cdot 10^{-3} \text{ Nl/Amin}$

Wichtig für den Brennstoffzellenstack: Dieser Wert bezieht sich auf eine einzelne Zelle.

### Wie hängen Amperestunden und Volumen von Wasserstoff zusammen?

Der reziproke Wert des Volumenstroms liefert:

$$\frac{1}{\varphi_{vol}} = \frac{1}{6,969 \cdot 10^{-3} \text{ Nl/A min} \cdot 60 \text{ min/h}} = 2,391 \text{ Ah/Nl}$$

Über einen Amperestundenzähler kann somit der verbrauchte Wasserstoff bilanziert werden.

### Wie viel „Strom“ kann mit 1 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> erzeugt werden?

Bezug auf Brennwert oder Heizwert? In der Regel bezieht sich diese Berechnung auf den Heizwert! 1 Nm<sup>3</sup> entsprechen dann einer chemischen Energie von 3,00 kWh. Mit einem

elektrischen Systemwirkungsgrad von  $\eta_{el} = \frac{E_{el}}{E_{chem}} = 0,4$  kann eine elektrische Energie von  $P_{el} = \eta_{el} \cdot P_{chem} = 0,4 \cdot 3,00 \text{ kWh} = 1,2 \text{ kWh}$  erzeugt werden.

### Was sind Umsatz, Stöchiometrie und Faraday-Wirkungsgrad?

Wenn dem System mehr Wasserstoff zugeführt wird, als dem Faraday'schen Gesetz nach wäre, ist die Stöchiometrie  $\lambda > 1$  und der Umsatz  $u = 1/\lambda < 1$ . Der Faraday-Wirkungsgrad gibt an, wie viel des zugeführten Wasserstoffs umgesetzt werden und entspricht damit der Stöchiometrie.

### Wie viel Wasserstoff wird bei einem Kilowatt elektrischer Leistung umgesetzt?

Das hängt vom elektrischen Wirkungsgrad und damit von der Zellspannung ab und kann ohne diese Angabe nicht berechnet werden.

Mit Bezug auf den Heizwert, einem elektrischen Systemwirkungsgrad von  $\eta_{el} = 0,33$  und  $P_{el} = 1,0 \text{ kW}$  gilt:

$$\dot{V} = \frac{P_{el}}{\eta_{el} \cdot E_{V,H}} = \frac{1 \text{ kW}}{0,33 \cdot 3,00 \text{ kWh/Nm}^3} = 1,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

### Was steckt in einer 50l/200bar-Flasche?

Bezug auf Heizwert! In einer 200bar-Druckflasche ist die Energie pro Volumen 200mal größer, statt  $3,00 \text{ kWh/Nm}^3$  also  $600 \text{ kWh/m}^3$ . Die Energie pro Masse bleibt dagegen gleich. In einer 50l-Flasche mit 200bar sind theoretische  $10 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$ , 30 kWh chemische Energie oder 23915 Ah gespeichert.

Ein Brennstoffzellenstack mit 50 Zellen könnte bei einem Faraday-Wirkungsgrad von 80% (Stöchiometrie  $\lambda = 1,25$ ) etwa 12,8 Stunden lang einen Strom von 30 A erzeugen. Diese Berechnung ist unabhängig vom elektrischen Wirkungsgrad.

Ein Brennstoffzellensystem mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 40% könnten 12 kWh ( $30 \text{ kWh} \cdot 0,4$ ) elektrisch nutzen. Ein System mit  $P_{el} = 1 \text{ kW}$  könnte also 12 Stunden betrieben werden.