

**SIEMENS***Ingenuity for life*

Wirkungsgrad – Elektrolyse

Whitepaper

Elektrolyse

Im Jahre 1800 entdeckten die beiden englischen Wissenschaftler William Nicholson und Anthony Carlisle die Elektrolyse durch Gleichstrom und etablierten dadurch die Elektrochemie als ein neues Feld der Wissenschaften. Lange Zeit war die Elektrolyse die dominante Technologie zur industriellen Erzeugung von Wasserstoff. Mit der zunehmenden Nutzung von Erdgas wurde diese jedoch weitestgehend von der kostengünstigeren Dampfreformierung verdrängt. Heute, über 200 Jahre später, feiert das Spalten von Wasser mittels elektrischen Stroms eine Renaissance. Bietet dies doch die Möglichkeit, regenerativen Strom in den chemischen Energieträger Wasserstoff zu wandeln und zu speichern. Hierbei wird die althergebrachte alkalische Elektrolyse durch moderne Technologie der Polymerelektrolytmembran (PEM)-Elektrolyse ergänzt.

Diese geht auf eine Veröffentlichung von Russell et al. 1973 zurück.¹ Besonders die schnelle Reaktionszeit und die hohe Leistungsdichte machen die PEM-Elektrolyse für die Nutzung fluktuierender erneuerbaren Energien interessant.²

Technisch und wirtschaftlich entscheidend in der elektrochemischen Wasserstoffherstellung mit erneuerbaren Energien ist der Wirkungsgrad der Elektrolyse-Systeme.

Die relativ hohen heutigen Stromkosten dominieren neben den Betriebsstunden und der Abschreibung der Anlage maßgeblich die Wasserstoffgestehungskosten. Sie lassen sich von technischer Seite nur durch die Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads reduzieren.

Das folgende Dokument soll dem Leser veranschaulichen, auf was geachtet werden muss, wenn Wirkungsgrade für Elektrolyse-Systeme angegeben oder verglichen werden.

Wirkungsgrad ist nicht gleich Wirkungsgrad.

Wirklich vergleichbar ist der Wirkungsgrad nur, wenn alle Bezugspunkte angegeben werden; bei Bedarf auch Standardbedingungen oder Systemgrenzen.

Zusammenfassung

Der Wirkungsgrad einer Elektrolyseanlage ist eine ihrer zentralen Kenngrößen. Er bestimmt maßgeblich den Energieverbrauch und somit das Gros der Betriebskosten. Andererseits steht der Wirkungsgrad in Wechselwirkung mit allen peripheren Kenngrößen, die außerdem die Wasserstoffgestehungskosten beeinflussen, wie beispielsweise die Betriebsweise (Betriebsstunden), die Langlebigkeit und die Investitionskosten. Schon alleine deshalb lohnt sich ein näherer Blick auf die Definition, die Berechnung und die Interpretation des Wirkungsgrads in der Elektrolysetechnologie.

In der Praxis wird oft vom Stack-, System- und Anlagenwirkungsgrad gesprochen. Alle drei sind das Produkt diverser Teilwirkungsgrade und somit nicht eindeutig definiert. Schon der Stack-Wirkungsgrad, der manchmal auch als DC-Wirkungsgrad bezeichnet wird, ist das Produkt des Faraday-Wirkungsgrads (auch Strom-Wirkungsgrad genannt) und des Spannungswirkungsgrads, welcher auf Grund der dominierenden Verluste oft als Kennlinie einer Elektrolyse verwendet wird. In einer idealen Zelle definiert die Spannung über den Stromdichtenbereich den Wirkungsgradverlauf.

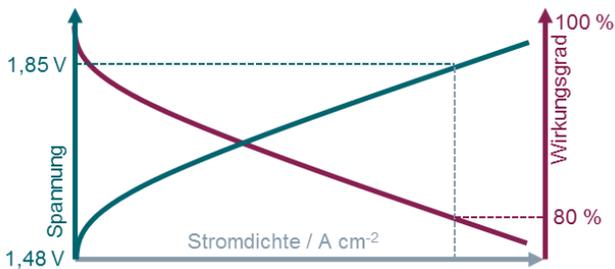


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer U-I-Kennlinie und ihr indirekt proportionaler Einfluss auf den Wirkungsgrad.

Die sogenannte U-I-Kennlinie ist somit auch der wichtigste Graph in der Bewertung der Elektrolysetechnologie. Außer den dominierenden Verlusten in der Zelle müssen für einen System- oder Anlagenwirkungsgrad diverse Nebenverbraucher berücksichtigt werden. Die größte Herausforderung in diesem Zusammenhang ist es, die System- bzw. die Bilanzgrenzen klar und eindeutig zu definieren. Das betrifft nicht nur die Gewerke an sich und ihren Energieverbrauch, sondern auch den Zustand und die Qualität aller Größen, welche die Bilanzgrenzen schneiden; zum Beispiel die Wasserqualität, Abwärme, Qualität der elektrischen Leistung sowie die Gasqualität und das Druckniveau.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{Sys}} &= \frac{\dot{V}_{\text{H}_2, \text{interface customer}} \cdot H_o}{P_{\text{el}, \text{AC}, \text{interface grid}}} E_{\text{th}} \quad \varepsilon_C = 1 - \frac{T_u}{T} \\ \varepsilon_V &= \frac{E_{\text{th}}}{E_{\text{cell}}(i, T)} \\ \varepsilon_F &= \frac{\dot{m}_{\text{re H}_2}}{\dot{m}_{\text{id H}_2}} \\ \varepsilon &= \frac{E_{\text{useful}}}{E_{\text{expended}}} = \frac{P_{\text{useful}}}{P_{\text{expended}}} \\ \varepsilon_{\text{LHV}} &= \frac{\dot{V}_{\text{H}_2} \cdot H_u}{P_{\text{el}}} = \frac{\dot{V}_{\text{H}_2} \cdot H_o}{P_{\text{el}}} \\ \varepsilon_{\text{HHV}} &= \frac{\dot{V}_{\text{H}_2} \cdot H_u}{P_{\text{el}}} \\ \varepsilon_{\text{id}} &= \frac{\Delta G_m}{\Delta H_m} = 1 - \frac{T \Delta S_m}{\Delta H_m} \\ \varepsilon_{\text{DC}} &= \frac{\dot{V}_{\text{H}_2} \cdot H_o}{P_{\text{el}, \text{DC}}} \quad \dot{n}_{\text{id H}_2} = \frac{I}{zF} \\ \varepsilon &= \frac{\text{useful}}{\text{expended}} \end{aligned}$$

Wirkungsgrad einer Elektrolyse

Wirkungsgrad-Definitionen

In der systemischen Betrachtung des Wirkungsgrads einer Elektrolyse-Anlage zur Wasserstoffgewinnung finden sich die verschiedensten Angaben mit den unterschiedlichsten Systemgrenzen. Die am häufigsten verwendeten werden nachfolgend dargestellt.

Faraday-Wirkungsgrad

Der Faraday-Wirkungsgrad setzt die real produzierte und technisch nutzbare Wasserstoffmenge ins Verhältnis zur theoretisch maximalen Produktionsmenge. Er berücksichtigt zum Beispiel H_2 -Diffusionsverluste über die Membran, elektrische Verlustströme oder Wasserstoffverluste durch die Umsetzung von Sauerstoffverunreinigungen in der nachgelagerten Wasserstoffreinigungsanlage. Auch können Massenverluste durch Probenentnahmen oder andere Verluste mit eingerechnet werden.

$$\epsilon_F = \frac{\dot{m}_{re H_2}}{\dot{m}_{id H_2}} \quad (8)$$

$\dot{m}_{re H_2}$ ist als real nutzbare Wasserstoffmenge und $\dot{m}_{id H_2}$ als maximal mögliche Wasserstoffmenge bei idealen Bedingungen definiert.

Spannungswirkungsgrad

Der Spannungswirkungsgrad wird oft mit dem DC-Wirkungsgrad verwechselt. Der Spannungswirkungsgrad definiert sich über den Quotienten der thermoneutralen Spannung E_{th} und der gemessenen Zellspannung $E_{Zelle}(i, T)$. Die thermoneutrale Spannung beinhaltet die durch die Entropieänderung gebundene Wärme und liegt bei Standardbedingungen bei 1,48 V. Sie ist nicht zu verwechseln mit der reversiblen Zellspannung ($E_{rev} = 1,23$ V), die mindestens angelegt werden muss, damit sich Wasser in seine Komponenten H_2 und O_2 trennt. Die Zellspannung beinhaltet hingegen auch alle katalytischen und elektrischen Verluste innerhalb der gleichstromgespeisten elektrochemischen Zelle.

$$\epsilon_V = \frac{E_{th}}{E_{Zelle}(i, T)} \quad (9)$$

DC Wirkungsgrad

Der DC-Wirkungsgrad erfasst die Effizienz des Stacks oder eines Moduls. Er setzt letztlich die benötigte Energie, die dem Stack in Form von Gleichstrom zugeführt wird, ins Verhältnis zu dem Energieinhalt des technisch nutzbaren Wasserstoffs am Ausgang des Stacks. Hier ist die Angabe des oberen oder unteren Heizwertes relevant.

$$\epsilon_{DC} = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot H_o}{P_{el, DC}} \quad (10)$$

Je nach Definition der Systemgrenzen für den Faraday-Wirkungsgrad kann auch das Produkt mit dem Spannungswirkungsgrad verwendet werden.

$$\epsilon_{DC} = \epsilon_V \cdot \epsilon_F \quad (11)$$

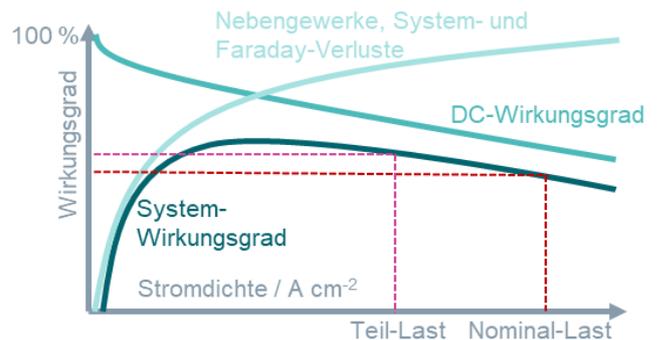


Abbildung 1: System-Wirkungsgrad und schematische Aufteilung der Anteile

System/Anlagen-Wirkungsgrad

Während sich die Wasserstoff-Community bei den eben genannten Wirkungsgraddefinitionen abgesehen von der Nomenklatur einigermaßen einig ist, sind die Systemgrenzen der System- oder Anlagen-Wirkungsgrade beliebig definierbar. Je nach Lieferumfang können Verlustleistungen aus der AC/DC Umwandlung und der Transformation aus der Mittelspannung, der Wasseraufbereitung, der Kühlsysteme, der Bereitstellung der elektrischen Energie für Gebäude und Nebengewerke oder der Kompression und Wasserstoffaufbereitung mit eingerechnet werden. Dementsprechend aufwändig müssen die jeweiligen Systemgrenzen untersucht werden, um Wirkungsgradangaben miteinander vergleichen zu können.

$$\epsilon_{Sys} = \frac{\dot{V}_{H_2, interface customer} \cdot H_o}{P_{el, AC, interface grid}} \quad (12)$$

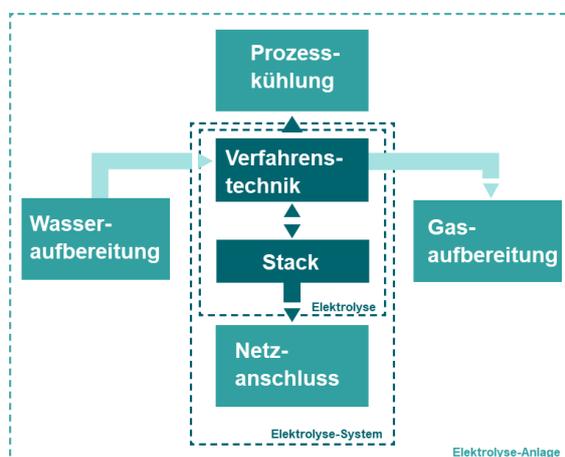


Abbildung 2: Beispiele für Systemgrenzen

U-I-Kennlinie

Wie bei den meisten technischen Geräten hängt auch bei der Elektrolyse der Wirkungsgrad vom Betriebspunkt ab. Das Charmante in der Elektrochemie ist die Tatsache, dass der Wirkungsgrad der elektrochemischen Reaktion, also der Spannungswirkungsgrad, bei Teil-Last steigt. Signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad hat auch die Temperatur sowie geringfügig der Druck.

Betriebsparameter I – Stromdichte

Die typische Darstellung einer Leistungskurve in der Elektrolysetechnologie ist die U-I-Kennlinie.

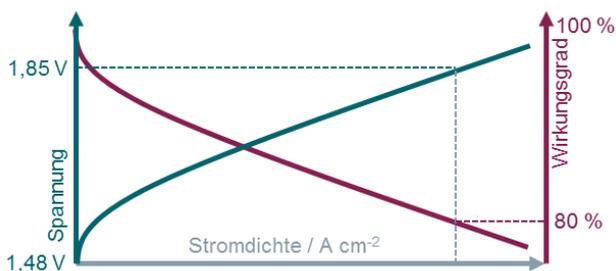


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer U-I-Kennlinie

Da die Stromdichte direkt proportional zur entstehenden Wasserstoffmenge ist (siehe Formel 12), definiert eine höhere Stromdichte eine höhere Wasserstoffproduktionsmenge.

$$\dot{n}_{id\ H_2} = \frac{I}{zF} \quad (13)$$

Wobei z die Anzahl der an der Reaktion teilhabenden Elektronen und F die Faraday-Konstante symbolisiert. Mit steigender Stromdichte steigt auch die Zellspannung und somit sinkt nach Gleichung 8 der Spannungswirkungsgrad.

Warum nicht einfach bei niedrigen Stromdichten betreiben?

Je höher die Stromdichte, desto höher die Wasserstoffproduktion. Daraus folgt, dass die spezifischen Kosten für einen Elektrolyseur mit niedrigerer Stromdichte signifikant steigen. Die Wahl der richtigen Stromdichte sollte immer im Hinblick auf eine Minimierung der Wasserstoffgestehungskosten optimiert werden, also das Optimum zwischen hoher Effizienz und niedrigem spezifischen CAPEX.

Betriebsparameter II – Temperatur

Einen weiteren signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad hat die Temperatur. Sowohl die katalytische Reaktionsgeschwindigkeit als auch die spezifischen Widerstände sind stark temperaturabhängig. Je höher die Temperatur, desto höher der Wirkungsgrad.

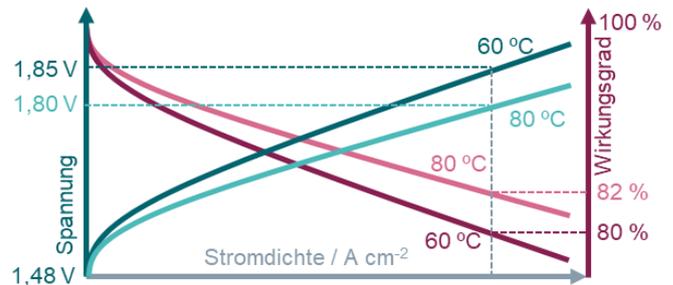


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Einflusses der Temperatur auf den Wirkungsgrad

Höherer Druck hat nur einen geringfügig negativen Einfluss auf den Wirkungsgrad, der teilweise durch bessere fluiddynamische Eigenschaften in der Zelle, also kleineren Gasblasen, kompensiert wird.

Warum nicht einfach bei höheren Temperaturen betreiben?

Die Temperatur hat einen signifikanten Einfluss auf die Alterung und somit auch auf die Langlebigkeit einer Elektrolyse. Je höher die Temperatur, desto geringer ist die Lebensdauer. Die Wahl der richtigen Betriebstemperatur sollte immer im Hinblick auf eine Minimierung der Wasserstoffgestehungskosten optimiert werden. Ziel ist das Optimum zwischen hoher Effizienz und Lebensdauer.

Erhöhung des Spannungswirkungsgrads

Die Steigung der U-I-Kennlinie ist demnach ein echter Indikator für Effizienzverbesserung. Eine geringere Steigung lässt sich durch effektivere Katalysatoren oder geringere Widerstände in der Zelle erreichen.

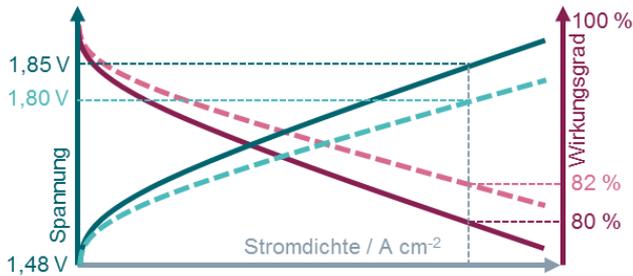


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Einflusses geringerer Widerstände auf den Wirkungsgrad

Einen besonders starken Einfluss auf die Steigung der U-I-Kennlinie hat der Abstand der beiden Elektroden. Je kürzer der Weg der Ladungsträger von Anode zu Kathode ist, desto kleiner ist der Spannungsabfall und entsprechend höher der Wirkungsgrad.

Warum die Elektroden nicht einfach immer näher aneinander führen?

Der an der Anode entstehende Sauerstoff darf sich schon allein aus Sicherheitsgründen nicht mit dem an der Kathode entstehenden Wasserstoff vermischen. Je geringer der Abstand desto höher die Diffusionsrate von Fremdgasen zur jeweiligen anderen Seite bei gleichbleibendem Material. Dies führt zu höheren Faraday-Verlusten und zu höheren Verunreinigungen der Produktgase.

Spezifische Unterschiede zwischen PEM- und alkalischer Elektrolyse

Derzeit befinden sich zwei kommerziell relevante Elektrolyse-Technologien auf dem Markt, die in MW-Größenordnung realisiert werden: die PEM und die Alkali-Elektrolyse. Beide Technologien unterscheiden sich in erster Linie durch den ionischen Ladungsträger, der den elektro-

chemischen Prozess elektrisch schließt, sowie den Elektrolyten selbst.

Die Polymer Elektrolyt Membran (PEM) – oder auch *Proton Exchange Membrane* - Technologie besitzt, wie der Name schon vermuten lässt, einen Feststoffelektrolyten, der die Anode von der Kathode elektronisch isoliert, aber durch die selektive Leitfähigkeit für Kationen den elektrischen Stromkreis elektrisch schließt. Dieser nahezu gasdichte Feststoff-Elektrolyt bietet einige spezifische Vorteile. Zum einen dient er als physikalischer Trennmechanismus zwischen der Anode (Sauerstoffseite) und der Kathode (Wasserstoffseite) und verhindert die Mischung der entstehenden Gase. Dies ermöglicht den Betrieb mit Differenzdruck. Auch unbeabsichtigte Differenzdrücke, die zu einer Vermischung der Gase und somit zu einem Sicherheitsrisiko führen können, lassen sich so leichter beherrschen. Zum anderen garantiert die Membran auch im dynamischen Betrieb oder im länger anhaltenden Teillastbetrieb eine hohe Produktreinheit der Gase, in dem die Fremdgaskonzentration auf Grund von Diffusion in beiden Elektrolyse-Technologien im Verhältnis zur Gasproduktion spezifisch ansteigt.

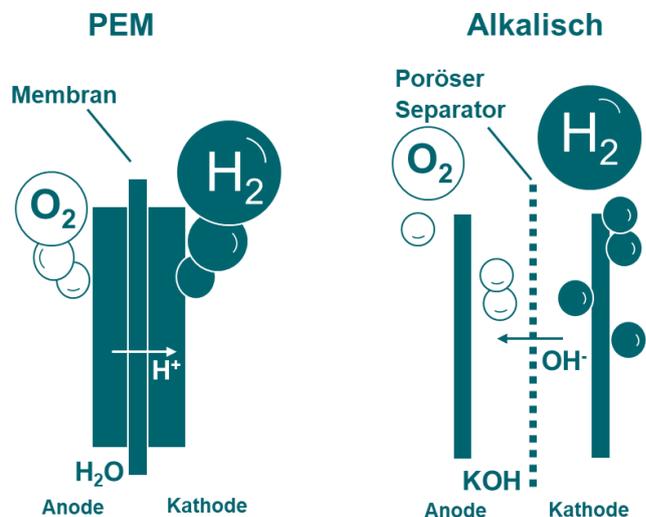


Abbildung 7: Schema eines PEM- und eines alkalischen Elektrolyseurs

Alkalische Elektrolyseure verfügen über einen porösen Separator, um die Gase Wasserstoff und Sauerstoff physikalisch zu trennen, den Austausch des flüssigen Elektrolyten allerdings weiterhin zu ermöglichen. Dieser poröse Separator erhöht unter anderem die Anforderungen an alkalische Elektrolyseure im dynamischen Betrieb. Differenzdrücke, die zu einer gefährlichen Vermischung von Sauerstoff und Wasserstoff führen können, müssen im alkalischen Elektrolyseur auf Grund seines porösen Separators unbedingt vermieden werden.

Unterschiede in der Kennlinie

Traditionell sind die Elektroden der alkalischen Elektrolyse weiter voneinander entfernt als die der PEM-Elektrolyse. Dies führt neben unterschiedlichen Elektrodenmaterialien in der Regel zu einer steileren U-I-Kennlinie für alkalische Elektrolyseure. Auch die Leitfähigkeit der Elektrolyte spielen eine große Rolle.

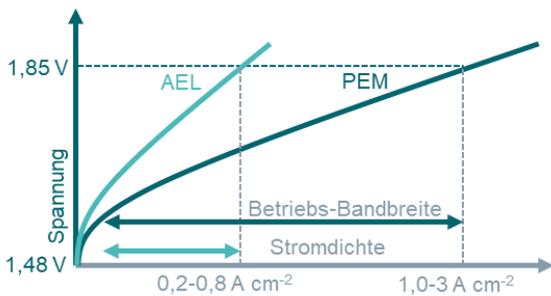


Abbildung 6: Betriebsbandbreite Alkali- und PEM-Elektrolyseure

Neben der ionischen Leitfähigkeit besitzt eine 30%ige KOH-Lösung auch eine deutlich höhere elektrische Leitfähigkeit als entionisiertes Wasser. Dies führt zu sogenannten Shunt-Strömen (Verlustströme), also Elektronen, die nicht elektrochemisch umgesetzt werden, sondern über den Elektrolyten zur nebengelegenen Zelle fließen. Diese müssen verhindert oder der Faraday-Effizienz zugeordnet werden.

Die Frage nach dem Effizienzvergleich beider Technologien ist also nicht einfach zu beantworten. Fakt ist, dass die Wahl des Betriebspunkts und die damit verbundene Spannung für die Effizienz ausschlaggebend sind. Die in der Regel geringeren Gesamtwiderstände der PEM-Technologie führen zu einer höheren Bandbreite an Betriebsmodi. Während die PEM-Technologie zwischen 0 und 3 A cm⁻² betrieben wird, erlauben alkalische Elektrolyseure deutlich niedrigere Stromdichten, um eine vergleichbare Spannung und somit auch einen vergleichbaren Wirkungsgrad zu erreichen.

Weitere Grundlagen ^{2,3}

Der Wirkungsgrad ε ist eine technische Kennzahl, die in der Regel mit Werten zwischen 0 und 1 oder 0% und 100% angegeben wird. Im Prinzip ist die Definition des Wirkungsgrads allgemein gültig und kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$\varepsilon = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad (1)$$

Am häufigsten ist der Begriff des Wirkungsgrads im Zusammenhang mit Energieströmen E zu finden. Dabei steht die Nutzenergie im Zähler und der energetische Aufwand im Nenner. Falls innerhalb der Bilanzgrenzen keine Energie gespeichert wird, kann auch die Leistung P herangezogen werden.

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{Nutzen}}}{E_{\text{Aufwand}}} = \frac{P_{\text{Nutzen}}}{P_{\text{Aufwand}}} \quad (2)$$

Wirkungsgrad einer idealen galvanischen Zelle

Das Sympathische der Elektrochemie ist die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie und umgekehrt. Dieser Vorteil lässt sich durch den Vergleich des maximal theoretischen Wirkungsgrads einer Wärmekraftanlage mit der einer galvanischen Zelle, wie beispielsweise einer Brennstoffzelle, veranschaulichen. Anstatt die chemische Energie zuerst in thermische, dann in mechanische, und schließlich in elektrische Energie umzuwandeln, geschieht dies in der Elektrochemie in nur einem Schritt.

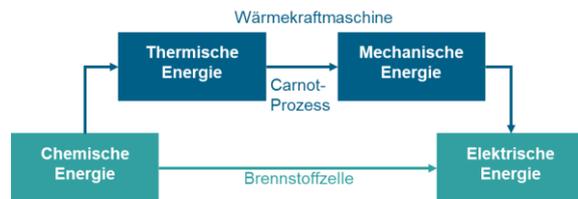


Abbildung 7: Vergleich der Energiewandlungskette zwischen Wärmekraftmaschine und Brennstoffzelle

Die Beschreibung des klassischen Carnot-Prozesses definiert hierbei den maximalen theoretischen Wirkungsgrad durch Formel:

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_u}{T} \quad (3)$$

Hierbei stellt T die maximale Prozesstemperatur und T_u die Umgebungstemperatur dar. Je höher die Temperatur des Carnot-Prozesses, desto höher ist also auch der Wirkungsgrad der Wärmekraftanlage.

Der ideale Wirkungsgrad ε_{id} einer galvanischen Zelle setzt sich aus dem Quotienten der Gibbs'schen Enthalpie ΔG und der gesamten Reaktionsenthalpie ΔH zusammen.

$$\varepsilon_{id} = \frac{\Delta G_m}{\Delta H_m} = 1 - \frac{T\Delta S_m}{\Delta H_m} \quad (4)$$

Verglichen mit dem idealen Wirkungsgrad einer klassischen Wärmekraftanlage ist der theoretische Wirkungsgrad der galvanischen Zelle über ein breites Temperaturspektrum also deutlich höher.

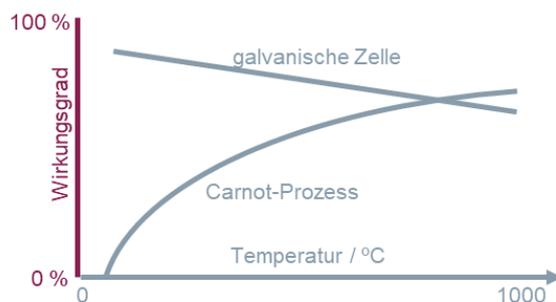


Abbildung 8: Idealer Wirkungsgradverlauf einer galvanischen Zelle und des Carnot-Prozesses

Norm	Bedingung	Dichte in $\text{kg/m}^3_{\text{stp}}$	Wirkungsgrad in $\text{kWh/m}^3_{\text{stp}}$	Wirkungsgrad in %
DIN 1343	$p_n = 1.01325 \text{ bar};$ $T_n = 273.15 \text{ K}$	0.0899	4.425	80
Linde/Air Liquide	$p_n = 1 \text{ bar};$ $T_n = 288.15 \text{ K}$	0.0841	4.1375	80
ISO 2533	$p_n = 1.01325 \text{ bar};$ $T_n = 288.15 \text{ K}$	0.0852	4.158	80

Table 1: Beispielrechnung für verschiedene Normbedingungen bei gleichem prozentualen Wirkungsgrad

Oberer oder unterer Heizwert

Der Aufwand eines erzwungenen Prozesses wie der Wasserstoffelektrolyse ist die elektrische Leistung, die in das System gesteckt werden muss. Der Nutzen ist bei der Wasserelektrolyse allerdings Definitionssache. Wird der genutzte Wasserstoff nach der Erzeugung wieder energetisch verwendet (Umwandlung in mechanische, elektrische oder thermische Energie), muss unter Beachtung der gesamten Umwandlungskette der untere Heizwert H_u (eng.: lower heating value, LHV) verwendet werden.

$$\varepsilon_{LHV} = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot H_u}{P_{\text{elektrisch}}} \quad (5)$$

Wird allerdings nicht die gesamte Umwandlungskette, sondern nur der Wasserstoff als chemisches Produkt betrachtet, welches in der chemischen Industrie oder als technisches Gas verwendet wird, kann der Brennwert oder obere Heizwert H_o (eng.: higher heating value, HHV) zur Berechnung des Wirkungsgrads herangezogen werden. Die notwendige Reaktionsenthalpie zur Überführung vom flüssigen Edukt Wasser zu gasförmigem Wasserstoff entspricht dem oberen Heizwert.

$$\varepsilon_{HHV} = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot H_o}{P_{\text{elektrisch}}} \quad (6)$$

In der Regel wird im Umfeld der Wasserelektrolyse mit dem oberen Heizwert kommuniziert. Dies liegt daran, dass der Verwendungszweck des Wasserstoffs von Herstellerseite nicht vorweggenommen werden soll und der rein prozentuale Wert in Bezug auf den oberen Heizwert einen deutlich höheren Wirkungsgrad suggeriert als in Bezug auf den unteren Heizwert.

Abweichung zur prozentualen Wirkungsgradangabe

Alternativ zu der typischen prozentualen Angabe des Wirkungsgrads kann die Effizienz der Wasserstoffelektrolyse auch in einer Mischform zwischen Energie- und Stoffstrom kommuniziert werden. Dazu finden sich folgende Angaben:

$$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3_{\text{stp}}} \text{ oder } \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \quad (7)$$

Während bei der prozentualen Wirkungsgradangabe darauf geachtet werden muss, dass die Bezugsgröße des oberen oder unteren Heizwertes mit angegeben wird, ist bei der Kommunikation eines energetischen Aufwands pro Gasvolumen die Angabe der Normbedingungen zu beachten. Es gibt mehr als nur eine Definition der „Normbedingung“ eines Volumens, die den Energieinhalt durch die Änderung der Referenztemperatur und des Referenzdrucks signifikant beeinflussen. Die Angabe eines Energieaufwands pro Volumen ist daher ohne Angabe der Standardbedingungen nicht eindeutig.

Fazit

Bei der Betrachtung des Wirkungsgrades von Elektrolysesystemen muss darauf geachtet werden, dass alle relevanten Bezugspunkte mit angegeben werden. Das fängt bei der Definition der Systemgrenzen und der Standardbedingungen an, betrifft das Teillastverhalten und die Dynamik und endet nicht zuletzt mit der Degradation. Alles wirkt sich letztlich auf den Wirkungsgrad aus.

Ein Systemhersteller muss das Optimum finden, um langfristig die für den Kunden niedrigsten Wasserstoffgestehungskosten und maximale Verfügbarkeit zu ermöglichen. Auf der anderen Seite ist es die Aufgabe des Interessenten, sei es ein Kunde oder der Verfasser einer Studie, alle nötigen Bezugspunkte zu definieren, um einen objektiven Vergleich zu ermöglichen.

Quellen

- 1 Russell J. H., Nuttall L. J. & Fickett A. P. Hydrogen Generation by Solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis. Am. Chem. Soc. Div. Fuel Chem. Prepr. 18, 24–33 (1973).
- 2 Lettenmeier P., Dissertation, Development and Integration of new Components for Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Electrolyzers, (2018)
- 3 Georgios Tsotridis, Alberto Pilenga, EU Harmonised terminology for low temperature water electrolysis for energy storage application, (2018)

Abkürzungsverzeichnis

- PEM** Polymerelektrolytmembran
DC Direct current (Gleichstrom)
AC Alternating current (Wechselstrom)

Herausgeber

Siemens

Corporate Technology
Strategy & Business Development
P.O. Box 3220
91050 Erlangen
Deutschland

Artikel-Nr.: SICM-T10001-00

Gedruckt in Deutschland

[siemens.com/silyzer](https://www.siemens.com/silyzer)

SILYZER ist eine eingetragene Marke der Siemens AG.

Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Die Informationen in diesem Dokument enthalten lediglich allgemeine Beschreibungen bzw. Leistungsmerkmale, welche im konkreten Anwendungsfall nicht immer in der beschriebenen Form zutreffen bzw. welche sich durch Weiterentwicklung der Produkte ändern können. Die gewünschten Leistungsmerkmale sind nur dann verbindlich, wenn sie bei Vertragsschluss ausdrücklich vereinbart werden.