

Wasserspaltung mit Strom und Wärme

Dr. Werner Schnurnberger

DLR
werner.schnurnberger@dlr.de

Dr. Holger Janßen

FZJ
h.janssen@fz-juelich.de

Ursula Wittstadt

Fraunhofer ISE
ursula.wittstadt@ise.fraunhofer.de

1. Einleitung

Wasserstoff zeichnet sich gegenüber allen anderen Brennstoffen durch den höchsten Energieinhalt aus: bei der Verbrennung von nur 1 Kilogramm Wasserstoff zu Wasser wird dieselbe Energie frei wie bei der Verbrennung von 2,75 Kilogramm Benzin. Dieser hohe Gehalt des Wasserstoffs an chemischer Energie muss bei der Herstellung von Wasserstoff aus Wasser auch aufgewendet werden. Und da kein technischer Prozess in idealer Weise und ohne Ver-

luste den thermodynamischen Gesetzen folgt, ist der Energieaufwand zur Bereitstellung von Wasserstoff immer höher als die letztlich im Energieträger Wasserstoff gespeicherte Energie. Jede Energiewandlung ist also mit irreversiblen Verlusten behaftet. Die vordringliche Aufgabe der Energietechnik ist es daher, diese Umwandlungsverluste möglichst klein zu halten. Im folgenden werden daher die verschiedenen Möglichkeiten der Wasserstoffherstellung aus Wasser aus technischer und energetischer Sicht dargestellt.

Tabelle 1
Energiequellen zur Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff

Wasser + Energie = Wasserstoff + Sauerstoff	
$H_2O + \Delta H_R \Leftrightarrow H_2 + 0,5 O_2$	
Verfahren	Energiequelle
Reaktion mit Metallen $H_2O + Zn \Leftrightarrow H_2 + ZnO$	Chemische Energie
Dampfreformierung $2 H_2O + CH_4 \Leftrightarrow 4 H_2 + CO_2$	Chemische Energie
Thermische Wasserspaltung mit thermochemischen Kreisprozessen	Hochtemperaturwärme
Elektrochemische Wasserspaltung	Elektrische Energie
Wasserelektrolyse	Elektrische Energie
Wasserdampfelektrolyse	Strom + Wärme
Biologische Wasserspaltung (Bildung von Biomasse)	Lichtenergie / Photonen
Photolytische Wasserspaltung (Direkte Wasserstoffentwicklung)	Lichtenergie / Photonen

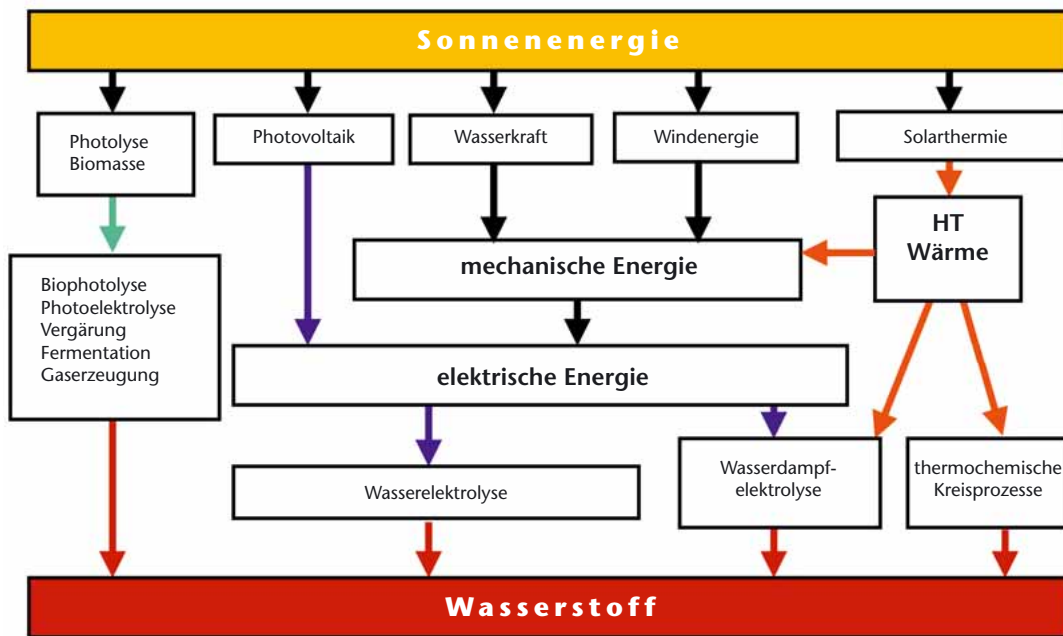


Abbildung 1
Erneuerbare Energie-
quellen und technische
Verfahren zur Wasser-
spaltung mit Sonnen-
energie

Alle Verfahren der Wasserstoffherstellung folgen direkt oder auf Umwegen, also mit zusätzlichen Reaktionsschritten, der Grundgleichung der Wasserspaltung:



Die Reaktionsenthalpie H^0 legt fest, dass für die Herstellung von einem Gramm Wasserstoff der Energieaufwand mindestens 145 kJ^1 beträgt. Diese Energie für die Wasserspaltung kann als chemische Energie, Wärme, elektrische Energie oder die Energie von Photonen zugeführt werden (Tab.1).

Beispiel für die Wasserstofferzeugung durch Einsatz chemischer Energie sind die etablierten, bzw. konventionellen Verfahren der Wasserstoffherzeugung wie etwa die Reaktion von wässrigen Säuren mit Metallen, oder die Reaktion von Wasserdampf mit Erdgas, Erdöl oder Kohle. Bei diesen chemischen Verfahren wird die notwendige Energie für die Wasserspaltung durch die hohe Reaktionswärme der Oxidation der Metalle oder die Verbrennung des Kohlenstoffs der fossilen Energieträger zu Kohlendioxid zugeführt. Die Dampfreformierung von Erdgas ist heute das wichtigste Verfahren der großtechnischen Wasserstoffherstellung.

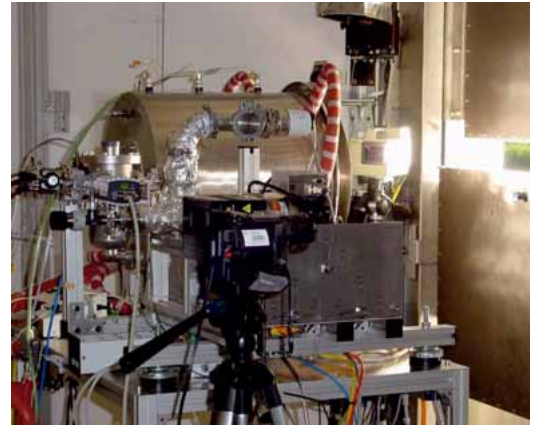
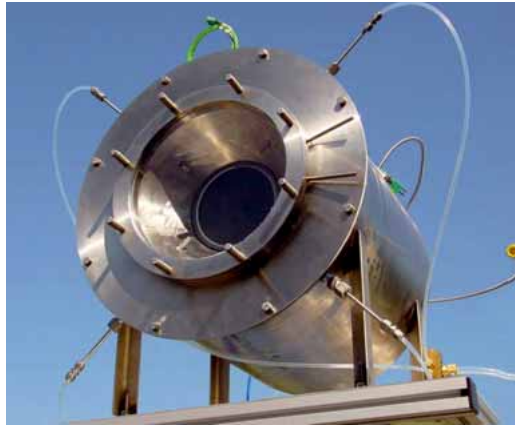
Hierbei wird jeweils die Hälfte des produzierten Wasserstoffs aus Wasser und dem Energielieferanten Erdgas freigesetzt. Dies ist ein Grund für die herausragende Stellung der Dampfreformierung bei der großtechnischen Wasserstoffherstellung. Vor dem Hintergrund, erneuerbare Primärenergiequellen für die Wasserstoffherstellung und damit Speicherung von Sonnenenergie zu nutzen, werden im Folgenden ausschließlich Verfahren der Wasserspaltung mit Wärme oder elektrischem Strom dargestellt (Abb.1).

2. Thermische Verfahren der Wasserspaltung

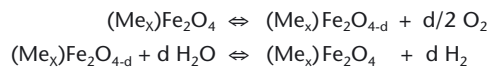
Das thermodynamische Gleichgewicht der Wasserspaltung wird bei sehr hohen Temperaturen immer mehr in Richtung der Elemente Wasserstoff und Sauerstoff verschoben. Bei 3300 K treten Wasserdampf und Wasserstoff in etwa äquivalenten Konzentrationen nebeneinander im Gleichgewicht auf. Aus den thermodynamischen Daten wird deutlich, dass bei diesen hohen Temperaturen Wasser sehr wohl direkt mit Wärme in seine Komponenten Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt werden könnte. Bis heute sind jedoch keine technischen Wege zur selektiven Abtrennung des Wasserstoffs aus

¹ kJ = Kilojoule

Abbildung 2
links: Solar Receiver Reaktor des DLR zur thermochemischen Wasserspaltung im Temperaturbereich 800 - 1000°C
rechts: Untersucht wird die Kinetik der solaren Wasserdampf-
reduktion und der Bildung von Wasserstoff und Eisenoxiden



einem Gasgemisch bei diesen hohen Temperaturen gefunden worden. Auch beim raschen Abkühlen (mit sehr hohen Wärmeverlusten des Prozesses) würde das Gleichgewicht wieder in Richtung H₂O verschoben, so daß heute keine technische Realisierung dieser direkten thermischen Wasserspaltung vorstellbar ist. Eine Reduzierung des Temperaturniveaus der thermischen Wasserspaltung auf technisch besser beherrschbare Temperaturen unter 1200 °C ist grundsätzlich möglich, wenn in sogenannten thermochemischen Kreisprozessen die Wasserspaltung in mindestens zwei unterschiedliche Einzelreaktionen aufgeteilt wird. Dieses Prinzip der thermochemischen Wasserstoffherstellung wird derzeit im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms Hydrosol im DLR untersucht und in *Abb. 2* dargestellt. Das Hydrosol-Verfahren der thermischen Wasserspaltung beruht auf der selektiven Oxidation und Reduktion von Metalloxiden. Bei diesem zweistufigen thermischen Kreisprozess (Arbeitstemperaturen zwischen 800 und 1200 °C) wird aus Eisenoxiden thermisch Sauerstoff freigesetzt und anschließend durch Reaktion mit Wasserdampf unter Rückbildung des Ausgangsoxides Wasserstoff erzeugt:



Durch Dotierung der Eisenoxide mit anderen Metalloxiden (Me = Nickel, Mangan, Zink) soll die Reaktionsgeschwindigkeit dieser heterogenen Feststoffreaktionen erhöht werden, um einen möglichst hohen Reaktionsumsatz zu erreichen.

Die Metalloxide wirken letztlich wie Katalysatoren zur Erniedrigung der Reaktionstemperatur der thermischen Wasserzerlegung und bleiben formal bei der Gesamtreaktion unverändert erhalten: die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff ist – wenn keine unerwünschten chemischen Nebenreaktionen auftreten – die alleinige Gesamtreaktion.

3. Elektrolytische Wasserspaltung

Die elektrolytische Herstellung von Wasserstoff ist verfahrenstechnisch das einfachste und – bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie – ein sehr effizientes Verfahren. Wasserelektrolyse und Brennstoffzellenreaktion basieren auf denselben elektrochemischen Prinzipien (*Abb. 3*): durch Umkehrung der Stromrichtung wird elektrische Energie verbraucht (Elektrolyse) oder abgegeben (Brennstoffzelle). Wie bei den Brennstoffzellensystemen lassen sich die verschiedenen Elektrolyseverfahren nach der Art des ionenleitenden Elektrolyten und der Betriebstemperatur einteilen:

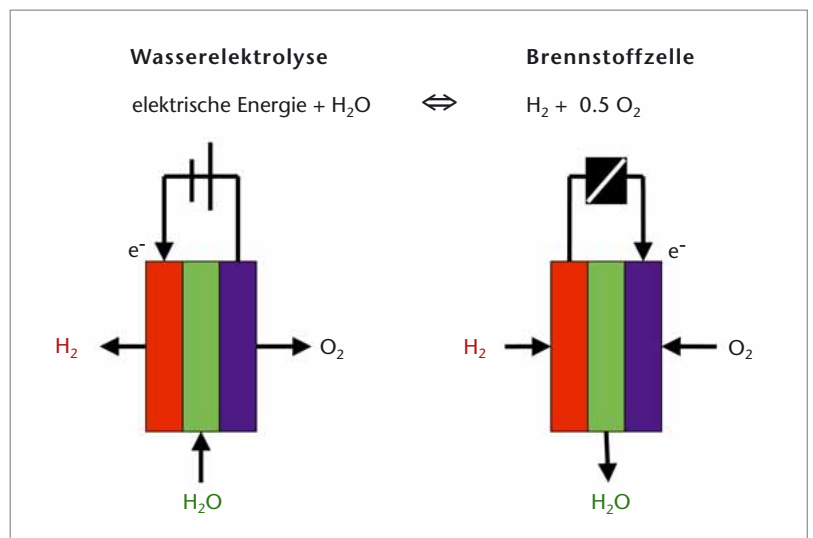
1. Alkalische Elektrolyseure mit wässriger Kalilauge als Elektrolyt
2. Membranelektrolyseure mit einer protonenleitenden Membran als Elektrolyt
3. Wasserdampfelektrolyseure mit einer Keramikmembran als Sauerstoffionenleiter

Diesen Elektrolyseverfahren entsprechen hinsichtlich Elektrolyt und Betriebstemperatur:

1. die alkalische Brennstoffzelle (80°C)
2. die Membranbrennstoffzelle (80°C)
3. die oxidkeramische Brennstoffzelle (650 -1000°C)

3.1. Alkalische Elektrolyse

Die „klassische“ alkalische Wasserelektrolyse mit einem Wirkungsgrad von ca. 70% (bezogen auf den oberen Heizwert des Wasserstoffs) für die Herstellung von Wasserstoff wird seit vielen Jahrzehnten dort eingesetzt, wo entweder elektrischer Strom günstig verfügbar ist, oder kleinere Mengen reinen Wasserstoffs für chemische Verfahren benötigt werden. Verschiedene neue Konzepte wurden in den letzten Jahren untersucht und verfahrenstechnisch entwickelt, um die Effizienz der alkalischen Wasserelektrolyse zu erhöhen. Wie die Elektrolysekennlinien in *Abb. 4* zeigen, sind Wirkungsgrade über 80% bei Stromdichten um 0,5 A/cm² durchaus technisch realisierbar. Da die Zellspannung von Elektrolyseuren und damit auch der Wirkungsgrad unmittelbar von der Stromdichte (und damit der Leistung des Elektrolyseurs) abhängen, nimmt die Effizienz von Elektrolyseuren im Teillastbereich zu, wie dies auch für Brennstoffzellen charakteristisch ist. Dieses günstige Teillastverhalten ist besonders vorteilhaft bei der Kopplung von Elektrolyseuren mit varia-



blem Stromangebot (Windkraftanlagen, Solar-kraftwerke) oder für das Lastmanagement mit Wasserstoffspeicherung in Netzen mit ausgeprägt wechselnden Lastprofilen.

Die in den unterschiedlichen fortschrittlichen Konzepten der alkalischen Wasserelektrolyse demonstrierte Verbesserung des Wirkungsgrades basiert auf zwei technologischen Entwicklungslinien. Zum einen ist es gelungen, durch katalytische Aktivierung der Elektroden die Überspannungsverluste deutlich zu senken (*Abb. 5*).

Abbildung 3
 Wasserelektrolyse und Brennstoffzellenreaktion: durch Umkehrung der Stromrichtung wird elektrische Energie verbraucht oder abgegeben.

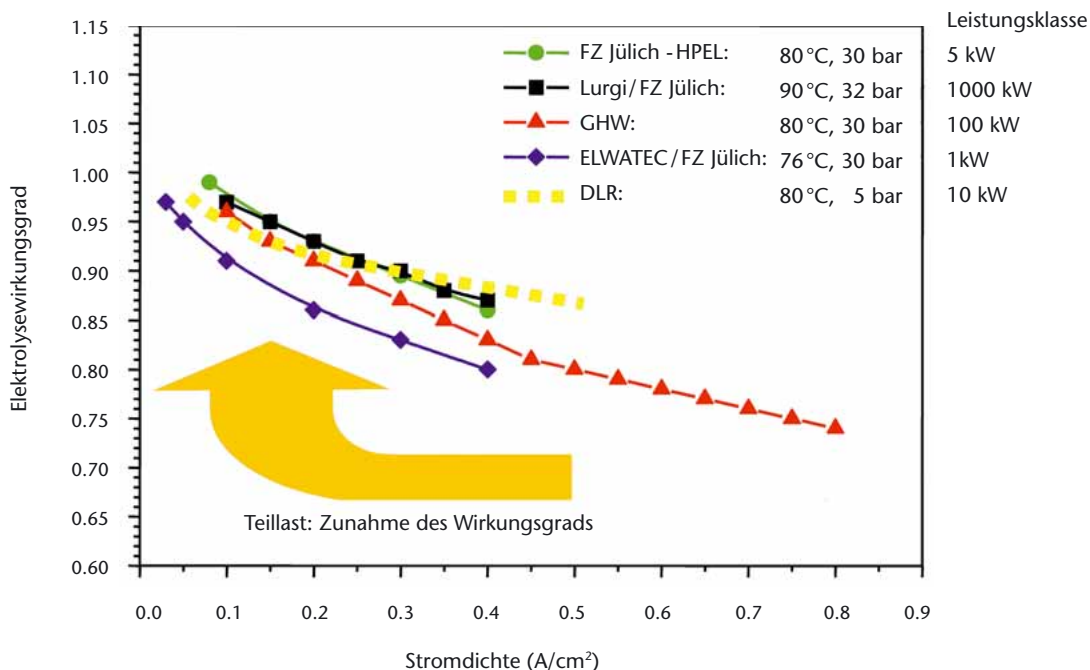
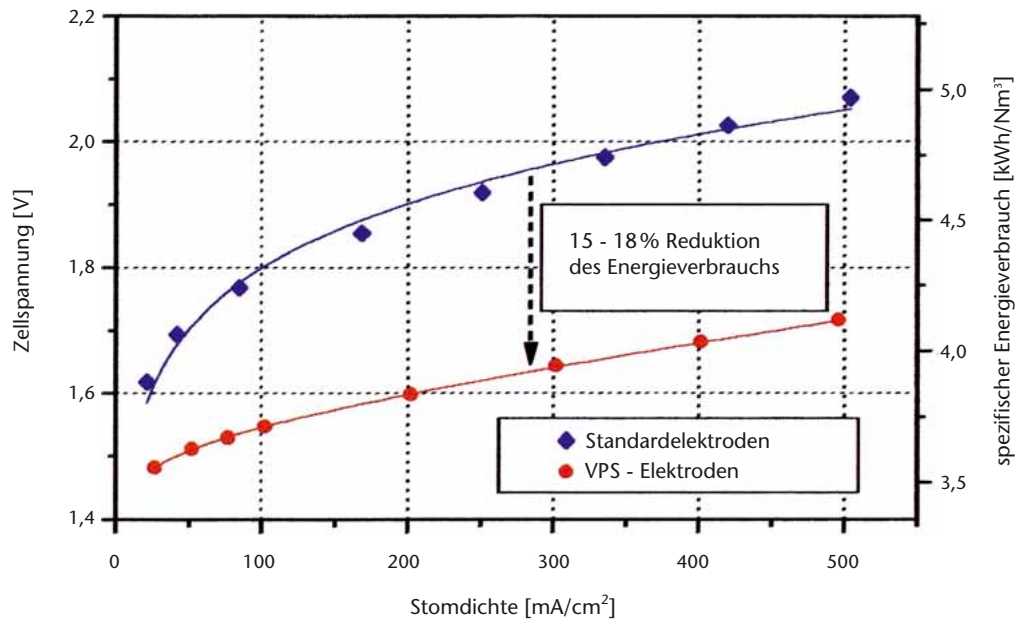


Abbildung 4
 Wirkungsgrade fortschrittlicher Konzepte der alkalischen Wasserelektrolyse. Im Teillastbereich wird die Zellspannung der Strom-Spannungskennlinie kleiner: der Wirkungsgrad steigt daher bei Teillast an.

Abbildung 5
 Reduzierung der Zellspannung und damit des Energieaufwandes der Wasserspaltung durch den Einsatz plasmagespritzter (VPS) Elektroden beim DLR. Betriebsdruck 5 bar, Betriebstemperatur 80°C, VPS-aktivierte Nickelkathoden (Raney-Nickel-Legierungen als Katalysator).



Hierbei werden auf Eisen- oder Nickelkathoden sogenannte Raney-Nickel-Legierungen als Katalysatoren durch Plasmaspritzen (VPS-Vacuum Plasma Spraying) in definierter Dicke und Porosität aufgebracht. Die Langzeitstabilität (über 50.000 Stunden Betriebszeit) von VPS-aktivierten Elektrolysekathoden wurde in den letzten Jahren im industriellen Einsatz eindrucksvoll belegt. Eine Erhöhung des Betriebsdruckes sowie eine Optimierung der Elektrolytkreisläufe und Produktgasseparatoren führt ebenfalls zu

einer Verbesserung des Elektrolysesystems (Abb. 6). Diese Ergebnisse prototypischer Anlagen im Leistungsbereich 10 kW_{el} werden bei entsprechender Skalierung der Technologien auch mit zukünftigen Elektrolyseuren höherer Leistung erreicht werden können.

3.2. Membranelektrolyse

Wie bei der Membranbrennstoffzelle ist eine protonenleitende Membran der Festelektrolyt eines Membranelektrolyseurs. Da die Ionenleitung zwischen den Elektroden durch hydratisierte Wasserstoffionen erfolgt, sind die Materialanforderungen bei dieser Wasserelektrolyse mit saurem Elektrolyten grundsätzlich anspruchsvoller. Edelmetallkatalysatoren sind für beide Elektroden notwendig, um die Überspannungen niedrig zu halten, und auch an die Konstruktionswerkstoffe werden sehr viel höhere Anforderungen gestellt. Im Vergleich zur alkalischen Elektrolyse ist der verfahrenstechnische Aufwand bei der Membranelektrolyse aber einfacher (Abb. 7). Denn da ein Festelektrolyt eingesetzt wird, ist hier kein interner Elektrolytkreislauf notwendig. Auch entfällt die externe Separation von Flüssigelektrolyt und den Reaktionsprodukten Wasserstoff und Sauerstoff. Für Elektrolyseure kleiner Leistung ist die Membranelektrolyse daher eine interessante Alternative zu den alkalischen Systemen. Vor allem dann, wenn die zu erwartenden Fortschritte bei der Entwicklung und Produktion kostengünstiger

Abbildung 6
 Alkalischer Druckelektrolyseur entwickelt im FZ Jülich: Betriebsdruck 120 bar, Betriebstemperatur 80°C, Anschlussleistung 5 kW_{el}, 15 Einzelzellen, katalytisch aktivierte Nickelanoden (Co,Fe) und Nickelkathoden (C-Pt).



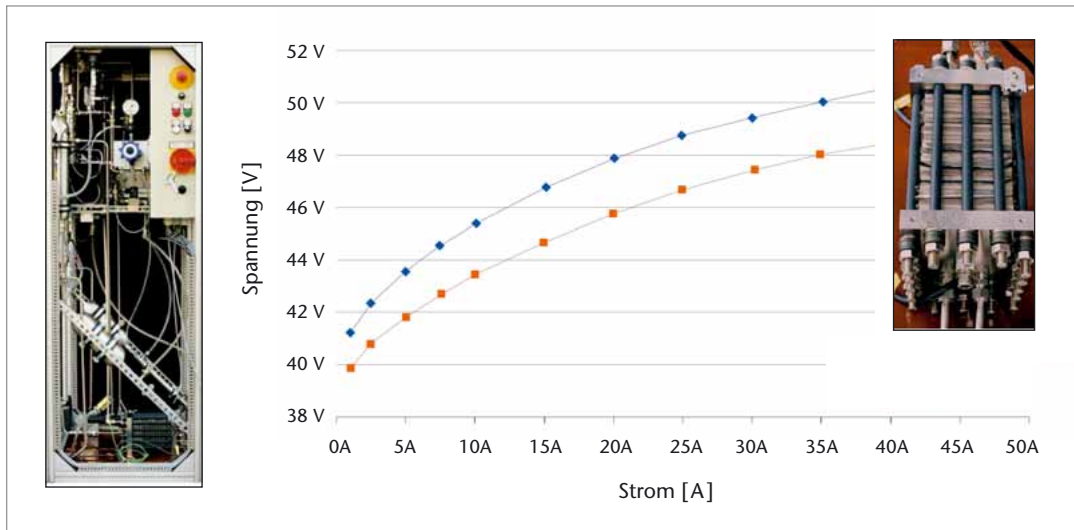


Abbildung 7
Temperaturabhängigkeit der $U(I)$ -Kennlinie eines PEM-Wasserelektrolyseurs (2 kW_{el}) des Fraunhofer ISE. Betriebsdruck 30 bar, Wasserstoffproduktion 450 NI/h . Messung bei:
◆ $45 \text{ }^\circ\text{C}$
■ $70 \text{ }^\circ\text{C}$

Membranbrennstoffzellen unmittelbar oder mit geringem zusätzlichem Aufwand auf die Membranelektrolyse übertragen werden können. Eine Skalierung der Membranelektrolyse zu Anlagen größerer Leistung ist dagegen heute noch nicht absehbar, da bisher keine Verfahren zur Herstellung von großflächigen Membran-Elektroden Einheiten verfügbar sind.

3.3. Hochtemperatur-Dampfelektrolyse

Beim Phasenübergang vom flüssigen Wasser zu Wasserdampf verringert sich die Bildungsenthalpie ΔH von Wasser und damit der zur Wasserspaltung notwendige Mindestenergieaufwand sprunghaft (Abb. 8). Diese Energiedifferenz entspricht der Verdampfungswärme des Wassers. Mit weiter steigender Temperatur nimmt die

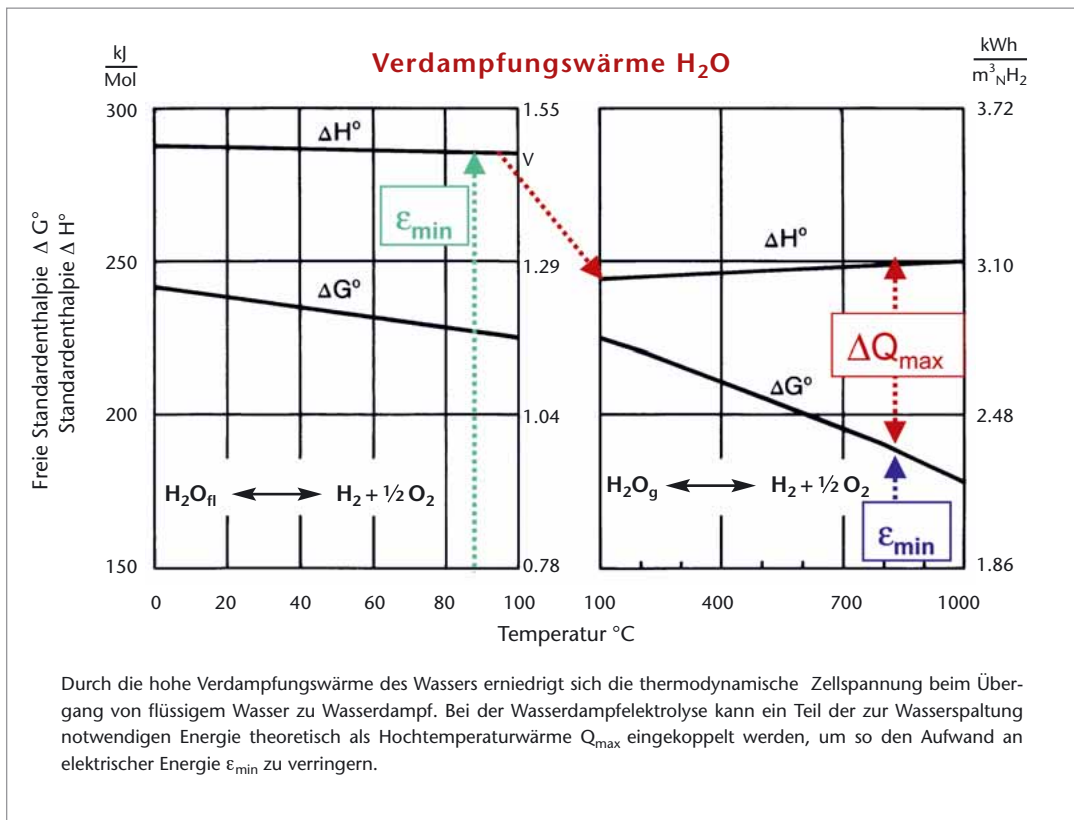


Abbildung 8
Energieaufwand für die Wasserspaltung in Abhängigkeit von der Temperatur.

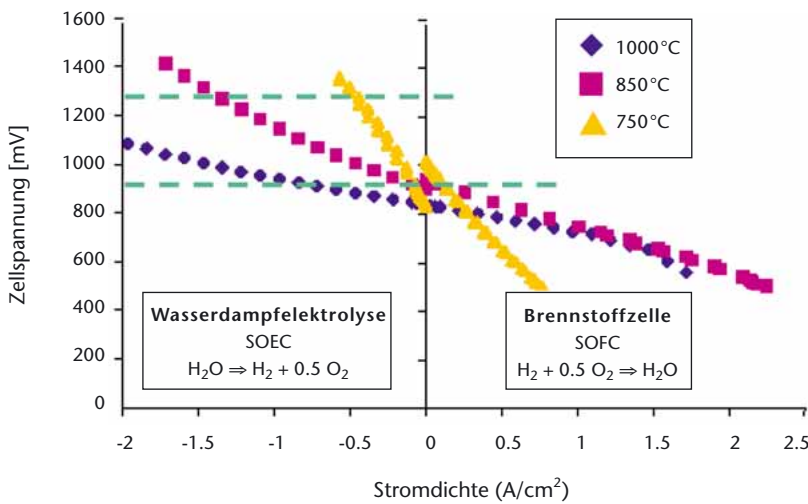


Abbildung 9 Kennlinienverlauf von Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) und Wasserdampfelektrolyse (SOEC) für verschiedene Betriebstemperaturen. Quelle: RISØ; „Hi2H2 Project“

freie Bildungsenthalpie ΔG kontinuierlich ab, bei nahezu konstanter Bildungsenthalpie ΔH . Aus diesen thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten lassen sich die beiden folgenden Aussagen ableiten:

- Die thermodynamische Zellspannung bei der Elektrolyse von Wasserdampf ist geringer als bei der Elektrolyse von flüssigem Wasser.
- Bei hohen Temperaturen kann ein Teil der zur elektrolytischen Wasserspaltung notwendigen Energie auch als Wärme eingekoppelt werden: der maximale mögliche Wärmeanteil Q_{max} entspricht der Differenz zwischen Bildungsenthalpie ΔH und freier Bildungsenthalpie ΔG .

Von diesen thermodynamischen Überlegungen ausgehend wurden bereits vor mehr als 25 Jahren Untersuchungen zur Hochtemperatur-Dampfelektrolyse (HOTELLY) durchgeführt. Mit den in den letzten Jahren erreichten Fortschritten bei der Entwicklung von oxidkeramischen Hochtemperaturbrennstoffzellen eröffnen sich auch für die Hochtemperaturelektrolyse neue Entwicklungschancen. Die Entwicklung neuer Materialien und verbesserter Herstellungstechnologien für die oxidkeramischen Brennstoffzellen und auch die Fortschritte beim Aufbau von bipolaren Zellstapeln in kompakter Flachbauweise sind die Basis des soeben gestarteten europäischen Forschungsprojektes „Hi2H2“ mit dem Ziel, die Funktion eines Zellstapels zur Hochtemperatur-Dampfelektrolyse zu demonstrieren.

Wie aktuelle Messungen zeigen (Abb. 9), ist es bei hohen Temperaturen durchaus möglich, oxidkeramische Brennstoffzellen in einem weiten Stromdichtebereich zur Elektrolyse von Wasserdampf und als Brennstoffzelle zu betreiben. In dem durch grüne Linien begrenzten Zellspannungsbereich ist die Einkopplung von Hochtemperaturwärme zur Wasserspaltung grundsätzlich möglich. Ob dies auch unter den realen Bedingungen unter Berücksichtigung der inneren Widerstände und Überspannungen beim Betrieb eines Zellstapels möglich ist, werden die Ergebnisse der Projektarbeiten zeigen. Auch ist noch verfahrenstechnisch zu klären, wie der Energieaufwand zur Separation von Wasserstoff und Wasserdampf bei den hohen Temperaturen der Wasserdampfelektrolyse die Energiebilanz des Gesamtsystems beeinflussen wird.

4. Fluktuierende Primärenergie zur Wasserstofferzeugung

Wasserstoff bietet als chemischer Energieträger die Möglichkeit, erneuerbare Energien zu speichern und so Angebotsprofil und Verbrauch täglich oder im Jahresmittel zu entkoppeln. Als nahezu idealer Kraftstoff eröffnet Wasserstoff den Weg, auch Sonnenenergie zu „tanken“ und damit als gleichsam solarer Kraftstoff nachhaltige Mobilität ohne Emissionen zu ermöglichen. Das fluktuierende Angebot erneuerbarer Energiequellen stellt jedoch auch besondere verfahrenstechnische Anforderungen an die verschiedenen Technologien zur Wasserspaltung. Die Dynamik des Leistungsprofils bei der direkten Kopplung einer Windkraftanlage mit einem Wasserelektrolyseur ist in Abb. 10 dargestellt. Verzögerungsfrei folgen Elektrolysestrom und Zellspannung der von der Windkraftanlage vorgegebenen Leistungskurve. Auch sehr rasche Leistungssprünge im Sekundenbereich können von einem Elektrolyseur problemlos umgesetzt werden. Elektrolyseure sind daher ideale Nutzlasten zur dynamischen Umwandlung von fluktuierendem Strom in Wasserstoff. Elektrochemische Vorgänge reagieren praktisch verzögerungsfrei auf Lastsprünge. Die Zeitkonstanten nachgeschalteter Systemkomponenten (Elektrolytkreislauf, Druckregler, Produktgasseparatoren) sind jedoch deutlich grösser: es ist daher

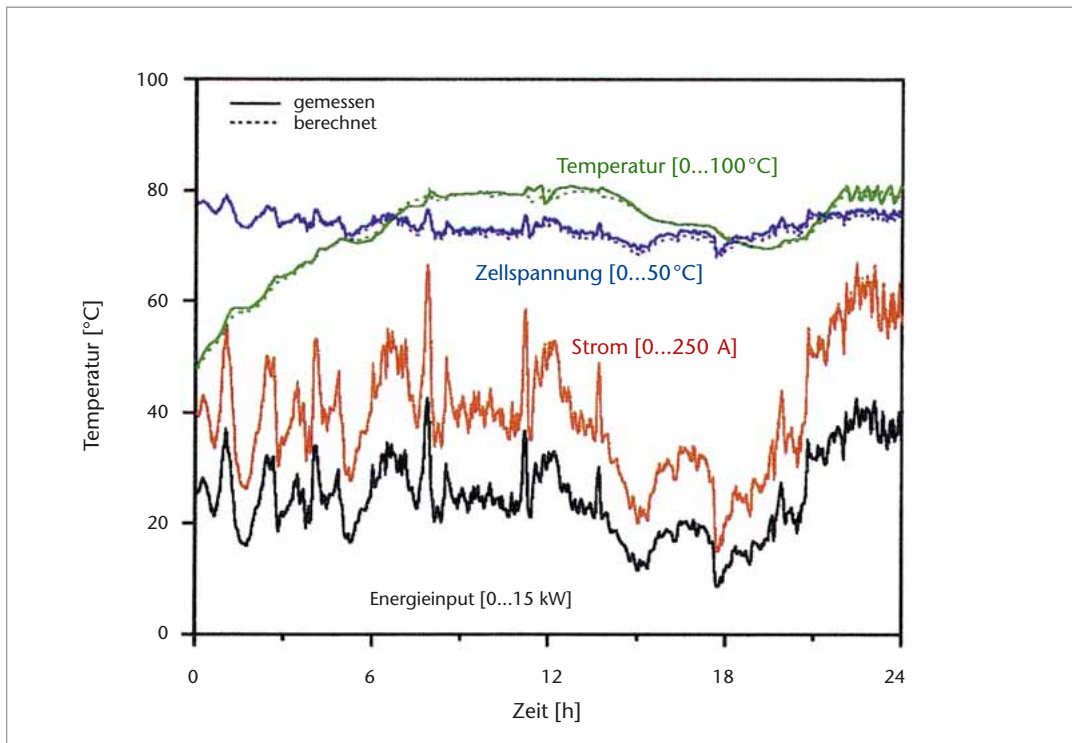


Abbildung 10 Tageslauf der direkten Kopplung von Windkraftanlagen und Wasserelektrolyse. Ein dynamisch optimierter Elektrolyseur folgt im gesamten Lastbereich unmittelbar dem Leistungsprofil der Windkraftanlage. Hier dargestellt: gemessene Werte und Simulationsergebnisse von Elektrolysestrom, Zellspannung und Betriebstemperatur des Elektrolyseurs. Quelle: DLR

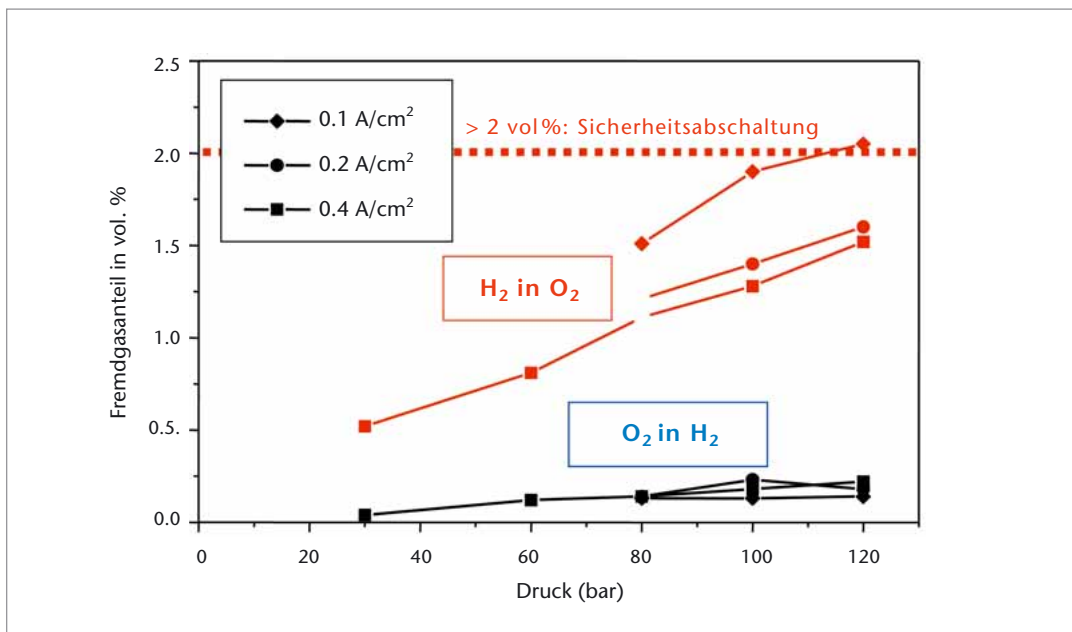


Abbildung 11 Produktgasqualität in Abhängigkeit von der Stromdichte und dem Druck. Alkalischer Druckelektrolyseur im FZ Jülich, Betriebstemperatur 60°C.

notwendig, das dynamische Verhalten dieser Komponenten so zu optimieren, dass Lastsprünge im gesamten Leistungsbereich störungsfrei gefahren werden können.

Der Wirkungsgrad von elektrochemischen Energiewandlern steigt beim Übergang in den Teillastbetrieb grundsätzlich an. Mit abnehmender

Stromdichte wird also auch die Zellspannung des Elektrolyseur kleiner und damit der Nutzungsgrad der elektrischen Energie zur Wasserspaltung zunehmen. Beim Betrieb von Elektrolyseuren im unteren Teillastbereich ändert sich jedoch auch die Produktgasqualität (Abb. 11), also die Konzentration von Wasserstoff in Sauerstoff und – weniger stark ausgeprägt – von

Sauerstoff in Wasserstoff. Der Grund hierfür ist die Löslichkeit und Diffusionsfähigkeit von Wasserstoff und Sauerstoff im Elektrolyten. Da mit steigendem Betriebsdruck des Elektrolyseurs auch die Löslichkeit der Gase im Elektrolyten zunimmt, wird die sicherheitstechnisch vorgegebene Abschaltgrenze von 2 Vol% Wasserstoff in Sauerstoff mit steigendem Druck schon früher erreicht. Andererseits kann ein höheres Druckniveau des Elektrolyseurs dann vorteilhaft sein, wenn das Produktgas Wasserstoff ohne weitere Kompression gespeichert werden kann.

5. Ausblick

Konventionelle alkalische Wasserelektrolyseure sind Stand der Technik und werden seit Jahrzehnten zur Herstellung von Elektrolysewasserstoff betrieben. Auch der intermittierende zuverlässige Betrieb eines technischen alkalischen Elektrolyseurs der Leistungsklasse 350 kW_{el} in direkter Kopplung mit einer Photovoltaik-Anlage wurde bereits demonstriert (Abb. 12). Fortschrittliche Elektrolyseure mit aktivierten Elektroden und verbesserten Diaphragmen erreichen im Auslegungspunkt energetische Wirkungsgrade bis über 80%. Im intermittierenden Betrieb mit Strom aus Windkraftanlagen oder Solarkraftwerken sind durch das günstige Teillastverhalten von Elektrolyseuren auch höhere Jahreswirkungsgrade möglich. Die an Prototypen erprobten verfahrenstechnische Lösungen für den dynamischen Betrieb müssen beim Skalieren grössere Anlagen oder bei höheren Betriebsdrücken übernommen und optimiert werden.

Membranelektrolyseure sind auf Grund der einfacheren Systemtechnik (Festelektrolyt ohne Elektrolytkreislauf) besonders vorteilhaft für autarke Systeme im Leistungsbereich einiger kW_{el}. Die Wasserelektrolyse mit Säure als Elektrolyt stellt hohe Anforderungen an die einsetzbaren Materialien (Edelmetallkatalysatoren, protonenleitende Membranen). Hier werden Fortschritte bei der Entwicklung von Membranbrennstoffzellen auch entscheidend zur weiteren Verbesserung und Kostenreduktion der Membranelektrolyse beitragen.

Ein Schlüsselproblem bei der Skalierung der Membranelektrolyse zu größeren Leistungsklassen ist die Herstellungstechnik großflächiger Membran-Elektroden-Einheiten.

Eine langfristig besonders attraktive Entwicklungslinie für alkalische und Membranelektrolyseure ist die sogenannte „Regenerative Fuel Cell“ (RFC). Wie bei einer wiederaufladbaren Batterie wird durch Umkehr der Stromrichtung zum einen Wasserstoff produziert, und dann im Brennstoffzellenbetrieb wieder verstromt. Der besondere Vorteil einer solchen „Gasbatterie“ ist die Entkopplung der Leistung des Energiewandlers (in kW_e) vom Energieinhalt des Systems (in kWh, also der Menge des extern gespeicherten Wasserstoffs). Bei den wiederaufladbaren Batterien ist dies grundsätzlich nicht möglich, da die chemischen Energie in den Elektroden des Energiewandlers gespeichert wird.

Bei der Hochtemperatur-Dampfelektrolyse (SOEC, Solid Oxide Electrochemical Conversion) verspricht die Einkopplung von Prozesswärme auf hohem Temperaturniveau aus thermodynamischer Sicht Effizienzvorteile bei der Wasserstoffherstellung. Auch hier lassen Syner-

Abbildung 12
HYSOLAR 350: die erste technische Anlage zur Produktion von solarem Wasserstoff mit einer Elektrolyseleistung von 350 kW_{el}. Solar Village, Riyadh, September 1993.



gien mit der Entwicklung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen (Solid Oxide Fuel Cell) Fortschritte erwarten. Verbesserte Strom-Spannungskennlinien bei Temperaturen unter 800°C und bei technisch relevanten Gaszusammensetzungen sind hier die nächsten Entwicklungsziele. Auch die Separation von Wasserstoff und Wasserdampf im Kathodengas bei hohen Temperaturen mit möglichst geringen Wärmeverlusten ist eine anspruchsvolle technologische Herausforderung.

Die rein thermische Wasserspaltung in thermochemischen Kreisprozessen mit solarthermischer Energie ist aus thermodynamischer Sicht durchaus reizvoll, da die energetischen Verluste der Stromerzeugung in nachgeschalteten Wärmekraftprozessen hier nicht berücksichtigt werden müssen. Diese Vorteile werden jedoch in technischen Verfahren nur dann auch realisiert werden können, wenn zum einen die Gesamtzahl der Reaktionsstufen der thermischen Kreisprozesse möglichst klein gehalten wird, und zum zweiten die Reaktionskinetik der einzelnen Reaktionen entscheidend verbessert werden kann. Eine weitere und besonders anspruchsvolle Herausforderung bei allen thermischen Verfahren der Wasserspaltung ist die Frage der dynamischen Prozessführung und der thermischen Zyklfestigkeit im solaren Tag-Nacht Betrieb.

Es gibt also mehrere Wege, Wasserstoff aus Wasser mit Strom oder Wärme aus erneuerbaren Energien bereitzustellen. Konkurrenz beflügelt die Kreativität, und Synergien mit unterschiedlichen Entwicklungslinien der Brennstoffzellenforschung tragen zur weiteren Intensivierung der Forschung im Verbund zur Bereitstellung von Wasserstoff bei.

Weitere Informationen können den folgenden Web-Seiten entnommen werden:

<http://www.dlr.de/tt>

<http://www.fz-juelich.de/iwv>

<http://www.ise.fhg.de>

<http://www.hi2h2.com>

<http://www.hysolar.com>