

WASSERSTOFF DER NEUE ENERGIETRÄGER

Eine fachliche Einführung vom Deutschen Wasserstoff-
und Brennstoffzellen-Verband e.V. – DWV



H₂

01 WASSERSTOFF ALS ENERGIETRÄGER – EINE NOTWENDIGKEIT

01.1 Fossile Energieträger sind umweltschädlich, und sie werden knapp

Nachdem die Klimaforscher im letzten Viertel des vorigen Jahrhunderts bei der Untersuchung der Lufteinschlüsse in Bohrkernen des ewigen Eises der Antarktis eine Korrelation von CO₂-Gehalt in der eingeschlossenen Luft und mittlerer Erdtemperatur herausgefunden haben,^[1] wird darüber diskutiert: Wie sehr trugen und tragen die Menschen mit durch sie verursachtem CO₂ in der Atmosphäre – insbesondere seit der Industrialisierung – zur Erderwärmung bei? Und: Wird es möglich sein, durch Verminderung der Emissionen Erwärmung und Klimaveränderung noch zu stoppen? Bei allen diskutierten Spielräumen insbesondere hinsichtlich der Genauigkeit der Zeitskala in **Abbildung 1** bleibt eines erschreckend: Im Verlauf der letzten 250 Jahre steigerte sich der Treibhausgasgehalt um ein Viertel.^[2] Es liegt schon nahe, dass neben Smog und saurem Regen auch diese Temperaturerhöhung eine Folge der menschlichen Aktivitäten ist und somit durch unser Verhalten beeinflusst werden kann. Modellrechnungen zufolge bewirkte der durch den Menschen verursachte Anteil bei den Treibhausgasen 0,6 K Temperaturerhöhung seit Beginn der Industrialisierung.^[3]

Abb. 1
Kohlendioxidgehalt
der Atmosphäre

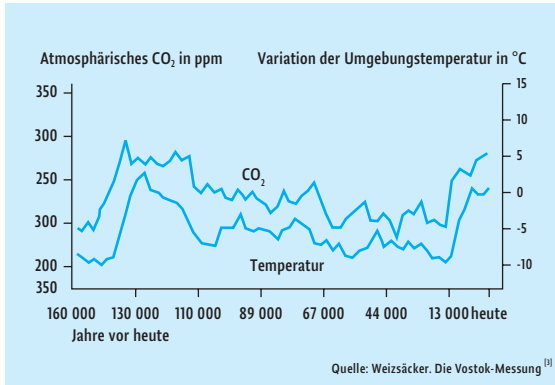


Abb. 2
Trans-Alaska-
Ölpipeline

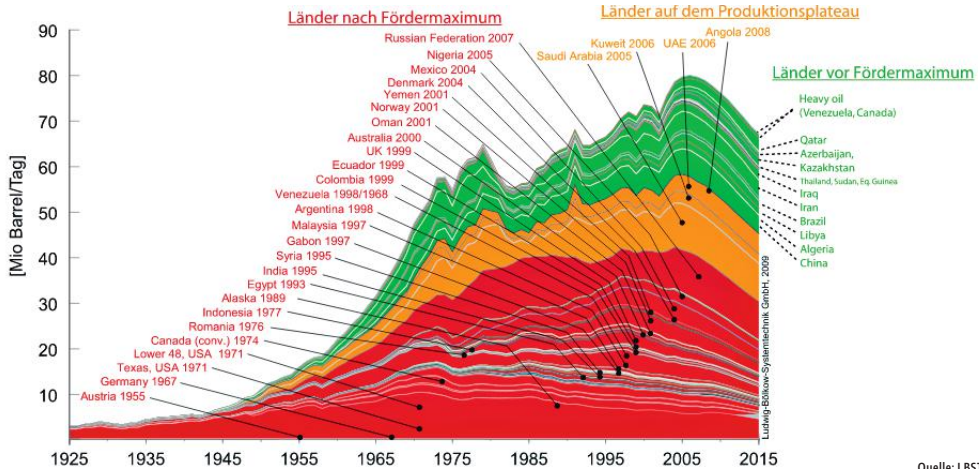


Abgesehen davon sind allein Abbau und Transport der fossilen Energieträger gefährlich für die Umwelt. Zwar ist der Aufschrei in den Medien immer wieder gewaltig, wenn sich eine Katastrophe ereignet hat, doch regelmäßig werden die anhaltenden Schädigungen ausgeblendet, und die während des normalen Umgangs mit den gefährlichen Substanzen täglich, stündlich und minütlich entweichenden Tropfen bleiben ohnehin unbeachtet. erinnert sei an den Tankerunfall der »Exxon Valdez« am 24. März 1989 vor Alaska, bei dem 40.000 m³ Rohöl ins Meer gelangten. Noch heute gibt es Nachwirkungen. Dabei wird die Förderung von Öl und Gas immer brutaler. Mehr Bohrinseln in den Ozeanen, Fracking bei der Gas- und Ölgewinnung und die Einbeziehung schwer zugänglicher Gegenden wie der polaren Regionen gehören zum üblichen Vorgehen. Selbst für den Regenwald im Amazonas-Quellgebiet wurden Ölgewinnungslizenzen vergeben!

All dieses liefert schon längst genügend Gründe, den fossilen Wahnsinn endlich zu stoppen, auf regenerative Energien umzusatteln und deren Transport und Speicherung als Strom oder in Form von Wasserstoff sauber zu gestalten. Mittlerweile bricht sich zudem die Erkenntnis Bahn, dass die Vorkommen

Abb. 3

Das Maximum der Weltförderung »billigen« Erdöls wurde etwa 2005 überschritten.



der fossilen Energierohstoffe zu Ende gehen. Bereits vor Jahren veröffentlichte die LBST (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH) Untersuchungen, nach denen etwa in der Mitte des vorigen Jahrzehnts das Maximum der Weltjahresförderung von konventionell erlangbarem Öl, sogenanntem »billigem« Erdöl, überschritten worden ist (s. Abb. 3).^[4] Obwohl in einigen Ländern die Förderung noch gesteigert werden kann, knickt die Summenkurve etwa 2005 ab, die Gesamtproduktion kann der gestiegenen Nachfrage nicht mehr folgen. Jüngeren Analysen der gleichen Institution zufolge ist etwa zehn Jahre später mit dem Maximum der Förderung aller fossilen Energieträger zuzüglich des Brennstoffs für die Kernkraftwerke zu rechnen.^[5] Von diesem Zeitpunkt an werden zur Deckung des weiterhin steigenden Bedarfs noch aufwendigere Verfahren zur Gewinnung dieser Energierohstoffe eingesetzt werden müssen, die mit tieferen Eingriffen in die Natur verbunden sind. Es ist zu erwarten, dass damit die Kosten steigen und die Volkswirtschaften, insbesondere die der stark vom Import abhängigen Länder wie z. B. Japan und Deutschland, noch mehr belastet werden.

Zusammengefasst: Neben dem Klimaproblem und dem Schutz der Umwelt stellen die wachsende Verknappung und die Preissteigerung bei den fossilen Energierohstoffen genügend Gründe dar, den Pfad der konservativen Energierohstoffe zu verlassen und regenerative Energiequellen zu nutzen. Dazu gehört auch, Energie auf saubere Weise als Strom oder Wasserstoff zu speichern und zu transportieren. Gleichzeitig würde der Raubbau von Kohle und fossilen Kohlenwasserstoffen, die auch als Grundstoffe für die industrielle Produktion wertvoll sind, beendet werden.

01.2 Die Partnerschaft von regenerativen Energien und Wasserstoff

Bis auf die Gezeiten und die Erdwärme gehen die erneuerbaren Energiequellen mehr oder weniger direkt auf die Sonnenstrahlung zurück. Durch diese Einstrahlung erhält die Erde etwa das 15.000-fache des heutigen Energieverbrauchs. Berücksichtigt man die technischen Möglichkeiten zu deren Nutzung, so könnte die Sonne mindestens das Zehnfache des Bedarfs decken.^[6]

Allerdings sind die regenerativen Energien durch zwei Merkmale gekennzeichnet, die den Gebrauch in der Energiewirtschaft erschweren:

1. **Sonnenstrahlung, Wind und Wellen sind diskontinuierlich.**
2. **Die Leistungsdichte bei den mit ihnen verbundenen Umwandlungsprozessen ist im Vergleich zu der Leistungsdichte, die bei der Umwandlung der chemischen Energie fossiler Energieträger und der Kernenergie in nutzbare Energieformen typisch ist, deutlich geringer.**

Die erste genannte Eigenschaft kann ohne weiteres ausgeglichen werden, indem man Energie während Zeiten erhöhten Aufkommens speichert und diese Energie dann bei hohem Bedarf wieder einspeist.

Hinsichtlich der Leistungsdichten hier zwei Beispiele zum Vergleich: Eine dem Stand der Technik entsprechende Windturbine hat eine installierte Leistung von 3 MW und eine Flügellänge von 50 m. Die Energieumwandlung erfolgt durch die Arbeit des Propellers am Generator. Mechanische Energie wird in elektrische umgewandelt. Die maximale Leistung der Maschine kann erreicht werden, wenn starker Wind innerhalb einer Kreisfläche mit dem Radius von 50 m arbeitet. Die Größe Leistungsdichte ist definiert als Leistung pro Fläche. 3 MW sind also durch die von den Flügeln überdeckte Fläche zu teilen. Das Ergebnis beträgt etwa $0,4 \text{ kWm}^{-2}$. Im Vergleich dazu werden Wärmekraftwerke durch die im Kessel erreichbare Leistungsdichte von 500 kWm^{-2} charakterisiert, Kernkraftwerke durch die im Druckgefäß vorliegenden mehr als 600 kWm^{-2} . Das bedeutet, dass zu Ungunsten des Windkraftwerks ein Verhältnis von 10^{-3} besteht. Die Energieversorgung auf nachhaltige Weise benötigt also deutlich mehr Fläche für den Umwandlungsprozess. Dies gilt für die anderen regenerativen Energiequellen mit unterschiedlichen Verhältniszahlen im Prinzip ebenso. Besonders krass stellt es sich für aus Biomasse hergestellte Energieträger dar. So sind 2012 in Deutschland 1,45 Millionen Hektar Raps angebaut worden, um daraus 3,6 Millionen Tonnen Biodiesel herzustellen. Es lässt sich abschätzen, dass dabei abermals ein Faktor 10^{-3} in der Leistungsdichte auftaucht, diesmal zu Ungunsten des biologisch erzeugten Energieträgers im Vergleich zur Windturbine.

Dieser Flächenbedarf sollte prinzipiell durch möglichst wenig installierte Maschinerie und abgewogenen Einsatz von biogenen Energierohstoffen begrenzt werden, um dadurch auch Investitionen zu reduzieren. Da auf diese Weise weniger grüne Energie zur Verfügung steht, als während der Lastspitzen benötigt wird, muss aus einem in Schwachlastzeiten angelegten Speichervorrat Strom zugeschossen werden können. Bei den biologischen Verfahren sind Speicherschritte zwar von vornherein enthalten, allerdings sollte hier die ungünstige Leistungsdichte ein Argument in der »Tank-Teller-Diskussion« sein.

Zusammengefasst: Um die regenerativen Energiequellen zukünftig im erforderlichen Umfang einbinden zu können, ist Stromspeicherung in bisher nicht gekanntem Umfang erforderlich.

01.3 Wie erfolgt Speicherung von Strom?

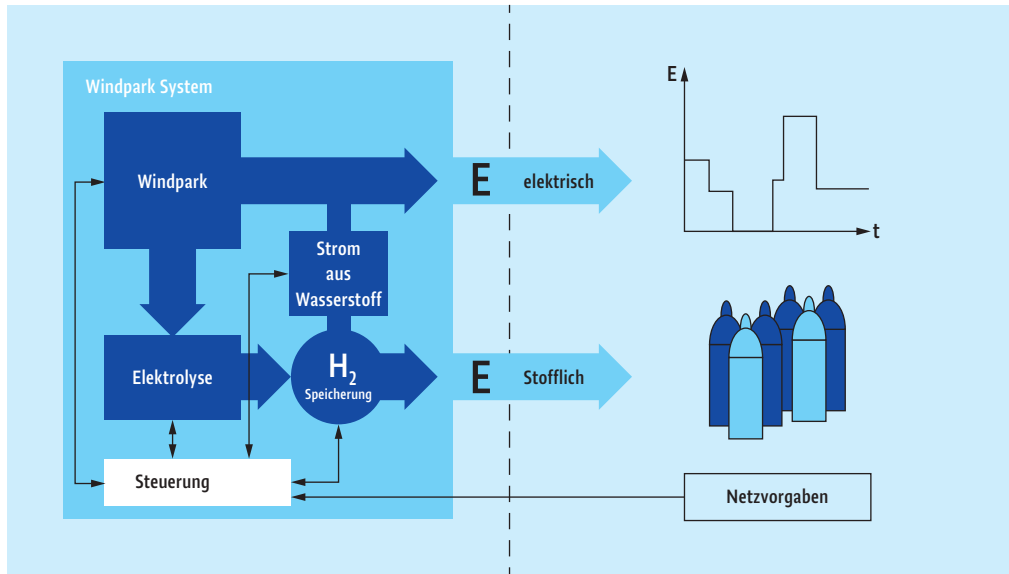
Zunächst gerät bei dieser Frage der Akkumulator in den Fokus, dessen Gebrauch in Kraftfahrzeugen gängig ist. Elektrizität lässt sich auch mittels Spulen und Kondensatoren (Supercaps) speichern, mechanisch funktioniert es ebenso mit einem Speicher für Rotationsenergie (Schwungrad) in Verbindung mit einem Generator. Diese Möglichkeiten sind durch relativ kleine Speicherkapazitäten charakterisiert, bieten aber einen schnellen Zugriff. Einen großen Stromspeicher stellt das Wasser einer Talsperre dar, wenn die Stromgewinnung über Turbine und Generator vorgesehen ist. Das erste deutsche Wasserkraftwerk ging 1880 in Bad Reichenhall in Betrieb, zehn Jahre nach einem Werk in Northumberland, GB. Pumpspeicherkraftwerke nehmen Strom bei Energieüberfluss auf und stützen das Netz im Bedarfsfall. Das größte deutsche Pumpspeicherkraftwerk in Goldisthal kann 8.480 MWh Elektroenergie liefern (s. Abb. 4). Druckluftspeicherkraftwerke funktionieren im gleichen Maße, indem Kompressoren überflüssigen Strom zum Füllen von Kavernen benutzen, die mit diesem Energievorrat bei Bedarf über mit Generatoren gekoppelte geeignete Turbinen wieder Elektrizität erzeugen. Das weltweite Kraftwerk dieser Art ging 1978 in Huntorf in Betrieb.

Abb. 4
Pumpspeicherwerk
Goldisthal



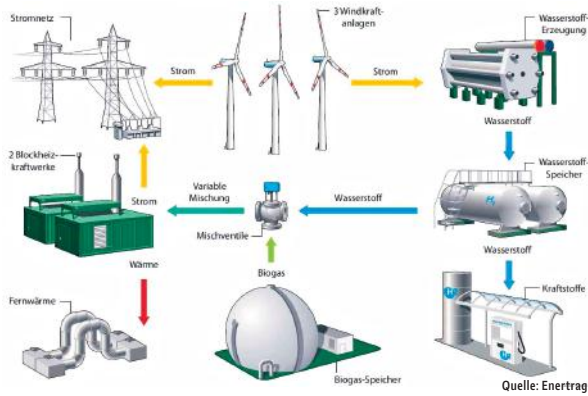
Wie eingangs erwähnt stellt elementarer Wasserstoff einen Energieträger – oder Kraftstoff – dar, weil seine Erzeugung, besser seine Darstellung als Element, nur durch Einsatz von Energie, insbesondere von elektrischem Strom, möglich ist. Die ihm damit innewohnende chemische Energie kann wieder in Elektrizität (per Brennstoffzelle) oder Wärme (per direkter Verbrennung) oder auch in mechanische

Abb. 5
Prinzip einer
Wasserstofffabrik
nach Miege ^[7]



Energie (per Verbrennungsmotor) umgewandelt werden. Insofern ist Wasserstoff als Medium zur Speicherung von Elektrizität sehr gut geeignet. **Abbildung 5** verdeutlicht das Prinzip: Ein Teil des grünen Stroms (Überschussstrom) wird von einem Elektrolyseur in Wasserstoff verwandelt und gespeichert. Im Bedarfsfall erfolgt eine Rückverwandlung von chemischer Energie in Strom zur Stützung des Netzes. Außerdem aber bietet der Speicher die Möglichkeit, andere Wasserstoffnutzer zu beliefern, beispielsweise Tankstellen für Brennstoffzellenfahrzeuge oder Produktionsbetriebe. Die erste industrielle Anlage dieser Art wurde 2011 in Prenzlau als ENERTRAG-Hybridkraftwerk in Betrieb genommen. Die **Abbildungen 6** und **7** zeigen Struktur und Realisierung. In diesem Fall wird bei der Rückverstromung ein Gemisch aus Biogas und Wasserstoff verwendet.

Abb. 6
ENERTRAG-Hybrid-
kraftwerk, Struktur



01.4

Abb. 7
ENERTRAG-
Hybridkraftwerk,
Teilansicht



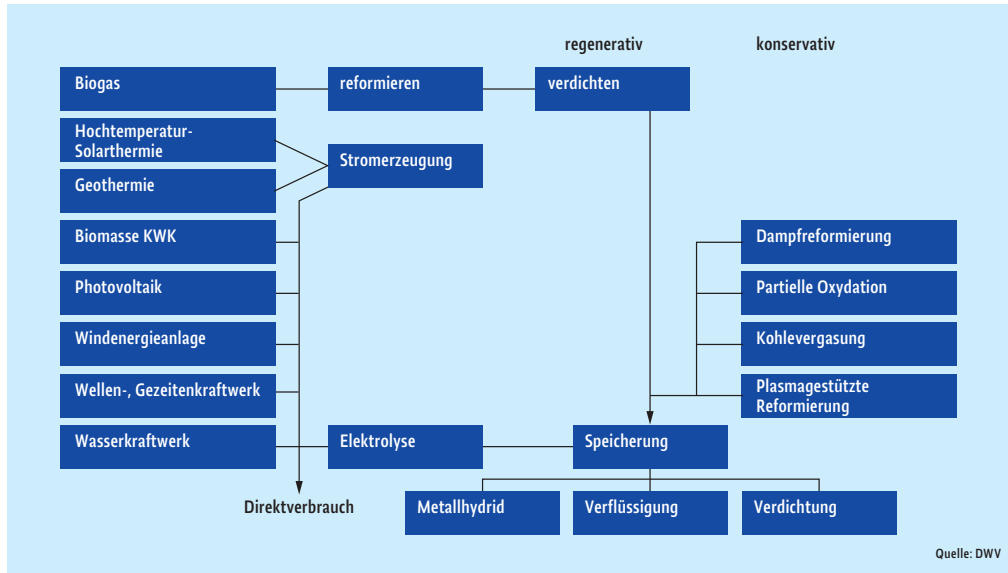
Zusammengefasst: Auf ein höheres Niveau gepumptes Wasser, komprimierte Luft sowie mit regenerativer Energie per Elektrolyse erzeugter und gespeicherter Wasserstoff stellen umweltfreundliche Stromreserven dar.

Die Herstellung von Wasserstoff

Alljährlich werden weltweit mehr als 600 Milliarden Kubikmeter Wasserstoff hergestellt und verbraucht, wobei nur etwa 1% davon als Treibstoff für Raketen dient, also energetisch genutzt wird. Die übrigen 99% werden in der Industrie eingesetzt. Der Energiegehalt des insgesamt produzierten Wasserstoffs könnte etwa 1,5% des Weltenergieverbrauchs decken. Sollte zukünftig Wasserstoff in größerem Umfang als Kraftstoff eingesetzt werden, so müsste dieser zusätzlich produziert werden.

Einen Überblick über die Herstellung von Wasserstoff liefert **Abbildung 8**. Die konventionellen Möglichkeiten sind auf der rechten Seite aufgelistet, mit der Nutzung von regenerativen Energien verbundene links.

Abb. 8
Möglichkeiten
der Herstellung
von elementarem
Wasserstoff



Die derzeit hauptsächlich eingesetzte Herstellungsmethode ist die Dampfreformierung von Erdgas. Auf diese Weise werden etwa 50 % des Wasserstoffs produziert. Das Verfahren ist ausgereift und ermöglicht einen relativ niedrigen Preis des Wasserstoffs, wobei das entstehende CO₂ nicht sequestriert oder weiterverarbeitet wird.

Die Vorgehensweise bei der Dampfreformierung von Erdgas sieht folgendermaßen aus:

Dampfreformierung bei 800 °C: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$

Shiftreaktion bei 400 °C / 200 °C: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Selektive CO-Oxidation bei 100 °C: $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$

Danach sind noch etwa 20 ppm CO im Wasserstoff enthalten.

Abb. 9
Elektrolyse-Stack
für das Hybrid-
kraftwerk Prenzlau



Die partielle Oxidation von Schweröl (vorrangig in Raffinerien praktiziert) und die Kohlevergasung erzeugen Wasserstoff geringer Reinheit. Besonders erwähnenswert ist hier die seit 1808 betriebene Herstellung von Stadtgas, das zu 50 % aus Wasserstoff besteht. Nur bei der kaum genutzten Plasmareformierung wird die CO_2 -Bildung vermieden.

Auf der linken Seite von **Abbildung 8** wird zunächst angedeutet, dass

gereinigtes Biogas ebenfalls reformiert werden kann. Bei Hochtemperatur-Solarthermie und Geothermie ist eine Stromherstellung wie im Wärmekraftwerk anzuschließen. Die anderen erwähnten erneuerbaren Energiequellen liefern Elektrizität, so dass mittels Wasserelektrolyse die Erzeugung von Wasserstoff erfolgen kann. Die Abbildung verdeutlicht, dass der Elektrolyseur das zentrale Bindeglied zwischen erneuerbar erzeugtem Strom und dem Energiespeichermedium Wasserstoff darstellt. Natürlich ist auf diese Weise jedweder nicht bedarfsgerecht erzeugte Strom nutzbringend einsetzbar, was in der Darstellung nicht eigens vermerkt wird.

Der Begriff »Power-to-Gas«, der in diesem Zusammenhang vermehrt verwendet wird, beschreibt eben das: Strom wird in Gas »verwandelt«. Allerdings sollte man hier genauer sein und die Wasserelektrolyse ansprechen, denn nur Wasserstoff kann mittels Elektrizität elementar dargestellt werden. Zutreffender ist also die Bezeichnung »Power-to-Hydrogen«.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass in der chemischen Industrie bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse zur Herstellung von Natronlauge und Chlor Wasserstoff als Nebenprodukt erzeugt wird. Wenn die Statistik aussagt, derzeit würde die Elektrolyse mit etwa 1 % an der Wasserstoffproduktion beteiligt

sein, so geht dabei dieser Anteil mit ein. Trotz ihres bisher geringen Beitrags zur Weltproduktion hat sich die Wasserelektrolyse seit ihrem ersten industriellen Einsatz am Wasserkraftwerk in Rjukan, Norwegen, im Jahre 1929 zu einem zuverlässigen großtechnischen Verfahren entwickelt.

Zusammengefasst: Wasserstoff ist ein Kraftstoff. Durch seine Herstellung mittels Elektrolyse, durch den Einsatz von Strom wird er zum Speichermedium für Elektrizität. Wasserstoff lässt sich überall herstellen, wo nur Wasser und Strom zur Verfügung stehen. Als Kraftstoff vermag er Erdgas und Erdölprodukte zu ersetzen. Damit verbindet er die Elektrizitätswirtschaft mit dem Verkehrssektor.

01.5 In welchem Ausmaß muss Wasserstoff gespeichert werden?

Abbildung 10 zeigt in einem Leistungs-Zeit-Diagramm zwei charakteristische Verläufe: Oben ist der Lastverlauf im Oktober 2010 in einem deutschen Teilnetz dargestellt. Unten ist dazu die Einspeisung von Windenergie im gleichen Gebiet eingezeichnet. Eng beieinander liegen unten die Kurven der tatsächlichen Windernte und der 24 Stunden zuvor gegebenen Prognose, nach der die Netzbetreiber planen. Abgesehen davon, dass zum Zeitpunkt des Vergleichs der Wind nur etwa 10 % des Strombedarfs abdeckt, ist der erste vermittelte Eindruck dieser Gegenüberstellung, dass Windeinspeisung und Netzanforderung zeitlich in keiner Weise zusammenpassen. Für die Betreibung des Netzes wäre es am günstigsten, wenn der Wind einen konstanten Beitrag lieferte oder seine Schwankungen mit denen des Bedarfs synchron verliefen. Vier Auffälligkeiten bei der vom Wind gelieferten Leistung werden hervorgehoben: Prognose und tatsächliches Aufkommen stimmen nicht immer überein (1). Es kommt Windstille vor (2). Windgeschwindigkeit und damit die eingespeiste Leistung schwanken stark (3). Die Windleistung übersteigt die vom Netz abgeforderte Leistung (4). Immer vorausgesetzt, dass der Netzbetreiber die abgeforderte Leistung im gleichen Moment zur Verfügung stellen muss, damit Spannung und Frequenz innerhalb der vom Gesetzgeber vorgegebenen Grenzen bleiben, lassen sich alle angeführten Ungleichmäßigkeiten beheben

Abb. 10

Netzlast, Einspeisung nach Windprognose und tatsächliche Windstromeinspeisung nach ^[8] am Beispiel eines Netzbetreibers in Ostdeutschland, Okt. 2010

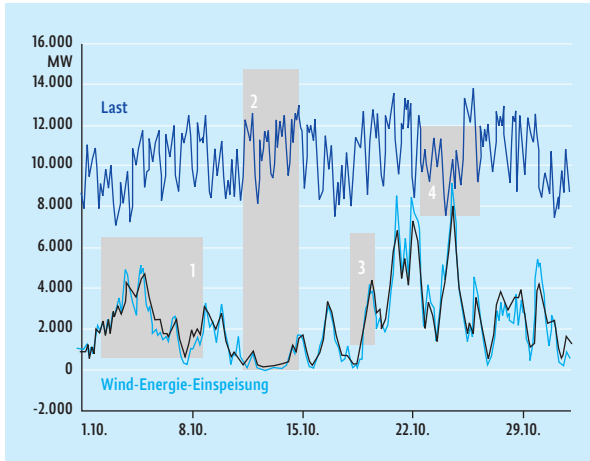
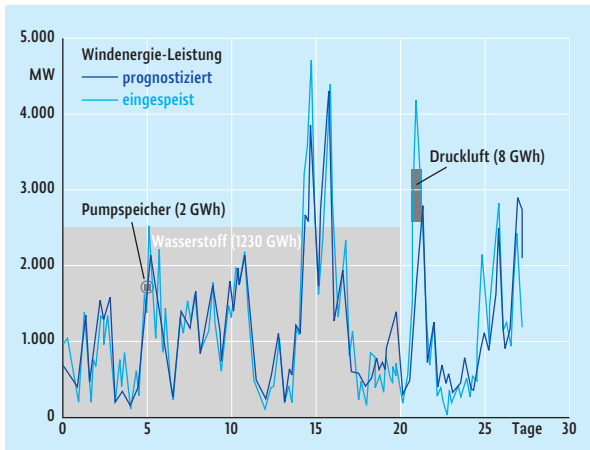


Abb. 11

Vergleich der Speicherkapazitäten von Pump-, Druckluft- und Wasserstoffspeichern bei angenommenen 3 Mio. m³ als Speichervolumen nach ^[9] (Flächen bedeuten Energiemengen)



bzw. mildern, wenn ein Stromspeicher zur Verfügung steht, der ohne Zeitverzug aufnehmen und abgeben kann. **Abbildung 10** vermittelt auch einen Eindruck davon, in welchem Maße sich die angedeuteten vier Probleme verstärken werden, wenn sich, wie es die Realisierung der Energiewende vorsieht, 2020 der Windstromanteil im Netz auf 35% vergrößert haben wird.

Um eine Vorstellung davon zu bekommen, welche Energiemengen zu speichern sind, muss man sich vor Augen halten, dass das Produkt aus Leistung und Zeit die Energie darstellt. Somit symbolisieren alle Flächen in einem Leistungs-Zeit-Diagramm Energiewerte. **Abbildung 11** zeigt (wie Abb. 10) ein solches mit den Achsenbezeichnungen Leistung (in MW) und Zeit, diesmal aus einem Monat im Jahr 2007. Es sind die Kurven für die 24-Stunden-Prognose und die tatsächliche Windstromeinspeisung eingetragen. Würden die Flächen unter den Kurven ausgemessen werden, so erhielte man eine Aus-

sage darüber, ob die Windkraftanlagen des betrachteten Gebietes mehr oder weniger als die vorausgesagte Energie erzeugt haben. Drei Flächen sind in dieser Abbildung hervorgehoben, die sich jeweils auf ein angenommenes Speichervolumen von drei Millionen m³ beziehen. Links, mit einem Kreis markiert, ist diejenige Fläche zwischen Prognose- und Produktionskurve hineinkopiert, die der Speicherenergie eines Pumpspeicherkraftwerks entspricht. Für das gesamte Speichervolumen des Kraftwerks Goldisthal wäre diese Fläche auf das Vierfache zu vergrößern. Diese Anlage wäre also im angenommenen Beispiel zum Ausgleich von Prognoseabweichungen geeignet. Rechts oben passt eine Rechteckfläche in einen Bereich, der durch eine deutlich größere Prognoseabweichung entstanden ist. Diese Energiemenge wäre noch immer zu gering, um im Beispiel tägliche Abweichungen auszugleichen. Sie gehört zum Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf. Erst in der dritten Fläche im linken unteren Teil des Diagramms könnten die Schwankungen der Windstromproduktion über Tage und Wochen nivelliert werden: Würde man die Vergleichskaverne mit Wasserstoff unter dem geologisch zulässigen Druck füllen, so wäre außer der mechanischen auch noch die chemische Energie des Speichermediums nutzbar.

Erst eine Wasserstoffspeicherung in dem hier angedeuteten Maßstab würde eine vergleichmäßigte Einleitung von Windstrom in das Netz ermöglichen und die derzeit für den Ausgleich sorgenden konventionellen Kraftwerke entbehrlich machen.

Zusammengefasst: Selbst in regionalen Netzen wird Wasserstoffspeicherung im Terawattstundenbereich erforderlich sein, um die geplantermaßen deutlich steigende Windstromspeisung gleichmäßig zu gestalten.

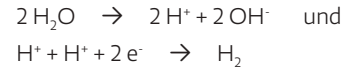
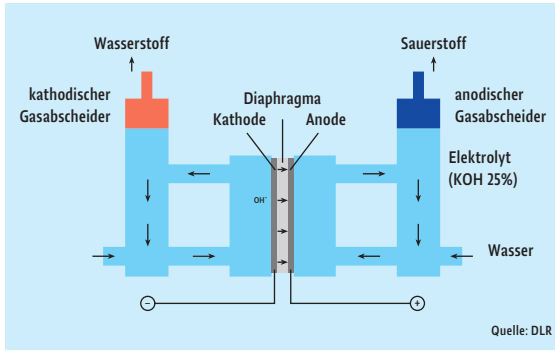
02 DIE TECHNISCHE BASIS

Die im vorigen Abschnitt grob vorgestellte Wasserstoff-Energietechnologie besteht aus den Bereichen Wasserstoffherstellung, -speicherung, -transport und -verteilung sowie der Rückverwandlung der chemischen Energie des Wasserstoffs in Elektrizität, mechanische Energie und Wärme. In Kapitel 2 werden diese Bereiche genauer untersucht. Außerdem behandelt dieses Kapitel die Sicherheit beim Umgang mit Wasserstoff.

02.1 Elektrolyse

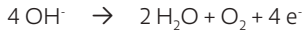
Abbildung 12 zeigt die elementare Einzelzelle eines alkalischen Elektrolyseurs. Zwei Elektroden sind mit einer Gleichstromquelle verbunden und werden dadurch zu Kathode (minus) und Anode (plus). Dazwischen befindet sich ein Diaphragma, meist eine Membran, die ausschließlich bestimmte Ionen leitet und verhindern soll, dass sich die gebildeten Gase vermischen. Elektroden und Membran tauchen in einen Elektrolyten, ein Wasser-Laugen-Gemisch, das ionenleitend ist, ein. Das Elektrodenmaterial ist porös, damit eine möglichst große Oberfläche für die an ihr ablaufenden Reaktionen zur Verfügung steht. Die Oberflächen haben eine katalytische Wirkung. Dadurch laufen an der Kathode die folgenden Reaktionen ab:

Abb. 12
Prinzip des
alkalischen
Elektrolyseurs



In Worten: Wassermoleküle werden in Ionen zerlegt, in Protonen (H^+) und Hydroxylionen (OH^-). Die Protonen verweilen an der negativen Oberfläche und bilden unter Aufnahme von jeweils einem Elektron Wasserstoffmoleküle, die übliche Erscheinungsform des elementaren

Wasserstoffs. Diese sammeln sich zu Bläschen und steigen auf. Die negativ geladenen Ionen wandern zur Anode. Dort können sie die Elektronen abgeben, die entsprechend der Reaktion



frei werden. In Worten: Immer zwei Hydroxylionen verbinden sich zu Wasser, und die jeweils verbleibenden Sauerstoffatome bilden O_2 -Moleküle, die normale Erscheinungsform des Sauerstoffs, die als Bläschen aufsteigen.

Die aus der Elektrolytflüssigkeit austretenden Gase werden getrennt aufgefangen, von Aerosol – einem mitgeschleppten Elektrolyt – befreit, getrocknet und in Gasspeichern verwahrt.

Die alkalische Elektrolyse ist die älteste Elektrolysemethode. Sie wird optimalerweise bei etwa 80°C durchgeführt und bei Normaldruck oder im Falle eines Druckelektrolyseurs auch bei einem Druck von bis zu 60 bar. Gut entwickelte Elektrolyseure dieser Art arbeiten mit Wirkungsgraden von bis zu 75 %. Dieser Wert wird als steigerungsfähig betrachtet.

Um Wasserstoff mit einem Energieäquivalent von 1 kWh zu erzeugen, werden ca. 300 ml Wasser benötigt. Dabei wird das Wasser gebraucht, aber nicht verbraucht, denn es wird bei der Stromerzeugung

(s. Kap. 2.3: Brennstoffzelle) verlustfrei zurückgewonnen und kann dann in den Wasserkreislauf eingespeist werden.

Es gibt eine weitere Methode der Wasserspaltung, die inzwischen technische Bedeutung erlangt hat: Die sogenannte »PEM-Elektrolyse«, bei der statt eines flüssigen Elektrolyten eine ausschließlich protonenleitende Membran (Proton Exchange Membrane) benutzt wird. Auf die Wirkungsweise dieser Membran wird im Abschnitt über Brennstoffzellen (s. Kap. 2.3) näher eingegangen. Anwendungsnah ist darüber hinaus die Hochtemperaturelektrolyse, bei der ein Großteil der zur Wasserspaltung notwendigen Energie als Wärme zugeführt wird. Als Elektrolyt fungiert ein Festkörper, eine Metalloxidkeramik, die Sauerstoffionen leitet. Auch dazu mehr in Kapitel 2.3.

Wasserstoff kann außerdem u. a. fotoelektrochemisch bei Verwendung von Halbleitermaterialien und optimierten Katalysatoren sowie biologisch unter Ausnutzung von Stoffwechselfvorgängen bestimmter Algen gewonnen werden. Ausführliche Darstellungen dazu sind in dem Standardwerk von Winter, Nitsch^[10] zu finden, wo auch das System des Elektrolyseurs sowie Optimierungsmöglichkeiten der Elektrolyse beschrieben werden. Anzumerken ist, dass bei Temperaturen oberhalb von 2.500 °C die thermische Wasserspaltung möglich wird, ein Verfahren, das beispielsweise in Verbindung mit Hochtemperatur-Solarthermie eingesetzt werden könnte. Radiolyse, die Zersetzung von Wasser durch den Einfluss radioaktiver Strahlung, ist ein beim Betrieb von Kernreaktoren störender Effekt.

02.2 Eigenschaften von Wasserstoff

In der folgenden Aufstellung werden die wesentlichen Eigenschaften von Wasserstoff zusammengetragen, denn ihre Kenntnis bildet die Grundlage für den Einsatz dieses Energieträgers und den sicheren Umgang damit:

- Nicht giftig, farb-, geruch- und geschmacklos
- Häufigstes Element im Universum, 90 % aller Atome sind Wasserstoff.
- Tritt elementar als zweiatomiges Molekül auf.
- Sein Isotop »Schwerer Wasserstoff« (Deuterium) existiert etwa im Verhältnis Wasserstoff : Deuterium = 6000 : 1.
- Dichtewerte: gasförmig $0,0899 \text{ kgm}^{-3}$ (Normaldruck), flüssig $70,99 \text{ kgm}^{-3}$ bei etwa -253 °C .
- Das Verbrennungsprodukt von Wasserstoff ist Wasser.
- Der Heizwert des Gases, d. h. sein Energiegehalt, beträgt $10,8 \text{ MJm}^{-3}$, das sind $3,0 \text{ kWhm}^{-3}$.
- Gemische von Wasserstoff und Luft im Bereich von 4 % bis 75 % Wasserstoffanteil sind brennbar. Die Flamme leuchtet nur schwach.
- Flammpunkt: 2318 °C bei 29 % Wasserstoff in Luft, $> 3000 \text{ °C}$ in reinem Sauerstoff.
- Infolge seiner kleinen Atome / Moleküle diffundiert Wasserstoff leicht.
- Er weist eine etwa 10fache Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu allen anderen Gasen auf.
- Die Energiedichte von Wasserstoff hängt stark von dem Druck ab, unter dem man ihn aufbewahrt:

0,003 kWh/l bei Normaldruck (0,1 Mpa)

0,6 kWh/l bei 20 Mpa

0,8 kWh/l bei 35 Mpa

1,3 kWh/l bei 70 Mpa

2,4 kWh/l verflüssigt

Zum Vergleich:

Erdgas 0,01 kWh/l (unter Normaldruck)

Diesel 10 – 11 kWh/l

02.3 Energieumwandlung

Unter dieser Überschrift sollen die Möglichkeiten zusammengefasst werden, die die Technik bereitstellt, um die im elementaren Wasserstoff enthaltene chemische Energie in direkt brauchbare umzuwandeln, in Bewegungsenergie, in Wärme und in Licht sowie in Elektrizität.

Die erste energetische Nutzung des Wasserstoffs erfolgte als wesentlicher Bestandteil des Stadtgases zur Straßenbeleuchtung (Leuchtmittel: katalysatorhaltige Netze »Leuchtstrümpfe«), beginnend 1808 in London, dann auch zum Kochen und Heizen. Während des 2. Weltkriegs und danach wurde Stadtgas wegen Benzinmangels zum Betrieb von Ottomotoren eingesetzt. Nach 1960 begann man, Wasserstoff für den Raketenantrieb zu benutzen. Zu Beginn der siebziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts zwang die »Ölkrise« dazu, nach Alternativen für einen Kraftstoff für den deutlich angewachsenen Straßenverkehr zu suchen. Sowohl Daimler als auch BMW entwickelten am Ende der siebziger Jahre Pkw mit Verbrennungsmotoren, die mit Wasserstoff betrieben wurden: Einige Exemplare des 7er-Modells von BMW konnten bis in die erste Dekade des neuen Jahrhunderts mit flüssigem Wasserstoff betankt und für etwa 150 km betrieben werden, wahlweise auch umstellbar auf Benzinbetrieb. Daimler stellte diese Entwicklungsarbeiten, bei denen Metallhydridtanks für Personen- und Kombiwagen verwendet wurden, nach

einem Flottenexperiment in der damaligen »Insel« West-Berlin in den achtziger Jahren ein und begann konsequent damit, die Idee des Brennstoffzellenantriebs umzusetzen. Im Laufe der folgenden Jahre haben sich alle Automobilkonzerne auf diesen Weg begeben. Unbestritten hat diese Branche damit den größten Anteil daran, dass Brennstoffzellen inzwischen zur Marktreife entwickelt worden sind, auch wenn auf anderen Gebieten (Lehrmittel, Heizungssysteme, mobile und netzferne Stromver-

Abb. 13
Hyundai ix35 FCEV
(Fuel Cell Electric
Vehicle: Brennstoff-
zellen-Batterie-
Hybridfahrzeug)

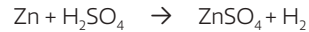


Quelle: Sven Geitmann

sorgungen) entsprechende Geräte mit leistungsschwächeren Brennstoffzellen bereits am Markt sind. Zweifellos werden die von asiatischen Herstellern gestarteten Serien den endgültigen Durchbruch der Brennstoffzellen-Hybrid-Antriebe am Markt einleiten.

Anders als bei der explosionsartigen Umsetzung im Verbrennungsmotor ist es für Wasserstoff typisch, dass eine katalytisch gesteuerte sogenannte »kalte« Verbrennung möglich ist. Das erste Produkt,

das sich diesen Effekt zunutze gemacht hat, ist das »Döbereinersche Feuerzeug« (Jena, um 1820). Auf **Abbildung 15** kann man erkennen, dass durch Eintauchen eines Zinkzylinders in Schwefelsäure entsprechend der Gleichung



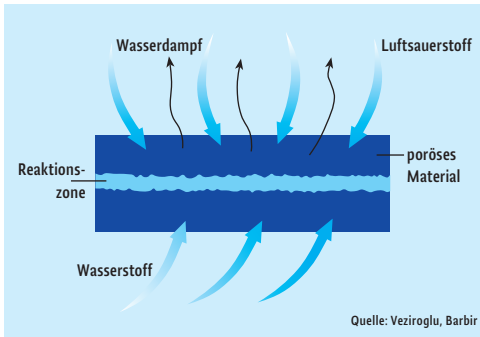
Wasserstoff freigesetzt wird. Lässt man nun durch einen Hahn den im oberen Zylinderteil angesammelten Wasserstoff so entweichen, dass er in Gegenwart von Sauerstoff auf die Oberfläche von Platin als Katalysator trifft, entzündet sich das Gasgemisch umgehend. Die Flamme ist nutzbar. Dabei greift ein Katalysator nicht in Reaktionen ein, verringert aber die Aktivierungsenergie. In diesem Fall setzt er die Entzündungstemperatur herab.

Ein zweites Beispiel ist der katalytische Brenner: Entsprechend dem in **Abbildung 15** dargestellten Prinzip enthält er Brennelemente, die aus

Abb. 14
Döbereinersches
Feuerzeug



Abb. 15
Prinzip des
katalytischen
Brenners



Quelle: Veziroglu, Barbir

Abb. 16

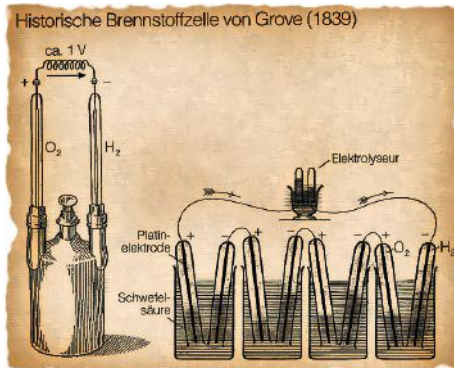
Katalytischer
Kocher mit
Metallhydrid-
speicher



Quelle: FH Stralsund

Abb. 17

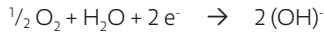
Groves
»Gas Chain«,
Urform der
Brennstoffzelle



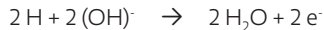
poröser Keramik hergestellt sind und katalytisch wirkendes Material (z. B. Nickel) enthalten. Zentral wird Wasserstoff zugeführt, der durch das Material diffundiert. Von außen diffundiert Luft ein, deren Sauerstoff sich im Brennelement mit dem Wasserstoff trifft und an den inneren Oberflächen die katalytische Reaktion einget. Es entstehen Wärme und als Verbrennungsprodukt Wasser in Form von Dampf. Dieser behindert die Diffusion, so dass mittels Porosität und Durchlässigkeit die Intensität der gewünschten Reaktion gesteuert und somit die sich einstellende Temperatur beeinflusst werden kann.

Das dritte Beispiel für die katalytische Verbrennung von Wasserstoff ist das Brennstoffzellenprinzip. **Abbildung 17** zeigt die von William Grove 1839 vorgestellte Idee: seine »Gas Chain«. Oben ist der als Indikator benutzte alkalische Elektrolyseur angedeutet. Wir wissen, Sauerstoff entsteht auf der Anodenseite, an der positiven Elektrode; Wasserstoff auf der Kathodenseite, an der negativen Elektrode. Die im Bild unten dargestellten Röhren enthalten abwechselnd sauerstoff- oder wasserstoff-umspülte katalytisch wirkende Elektroden. Alle sind durch den ionenleitenden Elektrolyten verbunden. Die links außen liegende Elektrode wird

zur Anode, weil der im Glaskolben eingeschlossene Sauerstoff infolge der katalytischen Wirkung dissoziiert und mit Wasser aus dem Elektrolyten wie folgt reagiert:



Die Elektronen kommen aus dem Metall, es nimmt positiven Charakter an. Die entstandenen Hydroxylionen wandern durch den Elektrolyten zur wasserstoffumspülten Elektrode, an der sich die Gasmoleküle ebenfalls unter katalytischer Einwirkung in Atome aufspalten und mit den ankommenden Hydroxylionen reagieren:

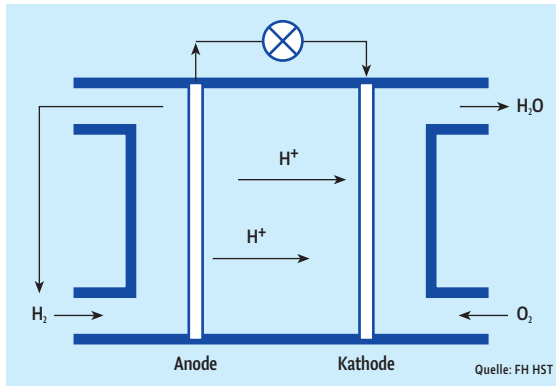


Die frei gewordenen Elektronen treten in die Elektrode ein, wodurch am Ende der Kette die unten und oben verbindende Elektrode einen negativen Charakter annimmt. Im Elektrolyseur entsteht an ihr Wasserstoff.

Hätte Grove zur Anzeige ein Messgerät verwendet, wäre vermutlich das Verfolgen der beschriebenen Vorgänge etwas einfacher. So aber steckt in der Betrachtung die Erkenntnis, dass in Brennstoffzelle und Elektrolyseur die gleichen Reaktionen ablaufen, nur eben jeweils im umgekehrten Sinne, die Bezeichnungen Anode und Kathode müssen vertauscht werden. Beim Experimentieren mit einem Elektrolyseur kann man dies einfach prüfen: Wird nach dem Betrieb der Elektrolyse die Stromversorgung abgeklemmt, so zeigt ein Kontrollvoltmeter noch eine ganze Weile eine Spannung an, allerdings mit umgekehrter Polarität, weil ja die Elektroden noch von Bläschen der jeweils erzeugten Gase umgeben sind und die Brennstoffzellenreaktionen ablaufen. Elektrolyseure lassen sich als Brennstoffzellen verwenden und umgekehrt, allerdings werden sie produktionstechnisch jeweils für einen Zweck optimiert.

Obwohl die alkalische Brennstoffzelle entsprechend der langen Tradition der alkalischen Elektrolyse einen sehr guten Entwicklungsstand aufweist, werden vorwiegend PEM-Brennstoffzellen eingesetzt. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass als Elektrolyt die bereits im Abschnitt »Elektrolyse« eingeführte

Abb. 18
Prinzip der
PEM-Brennstoffzelle

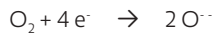


protonenleitende Membran benutzt wird. Im Innern dieser Geräte wird der Stromkreis also durch wandernde positive Ladungsträger (H^+) geschlossen, außerhalb besorgen das wie üblich die in metallischen Leitern beweglichen Elektronen.

Abbildung 18 stellt das Prinzip einer Einzelzelle einer PEM-Brennstoffzelle dar. Zentral ist die Membran-Elektroden-Einheit angedeutet, eine im Allgemeinen vorgefertigte Kombination aus der PEM-Folie und den innig mit ihr verbundenen Elektroden. Diese sind aufgrund ihrer großen Porosität großflächig gestaltet und mit Katalysatormaterial versehen. Das Material der Elektroden gewährleistet, dass in ihnen hydrophile und hydrophobe Bereiche existieren, solche also, die von Wasser benetzt werden können, um die mit Feuchtigkeit verbundene Protonenleitung zu ermöglichen, und solche, die wasserabweisend für die Anhaftung von Gasmolekülen frei bleiben, damit das Gas am Katalysator reagieren kann. An der von Wasserstoff umspülten linken Elektrode vollziehen sich Dissoziation und Ionisierung der Wasserstoffmoleküle:



Die frei gewordenen Elektronen treten in das Metall ein und wandern über einen elektrischen Verbraucher zur rechten Seite, wo sie benötigt werden, weil hier der Luftsauerstoff dissoziiert und ionisiert:



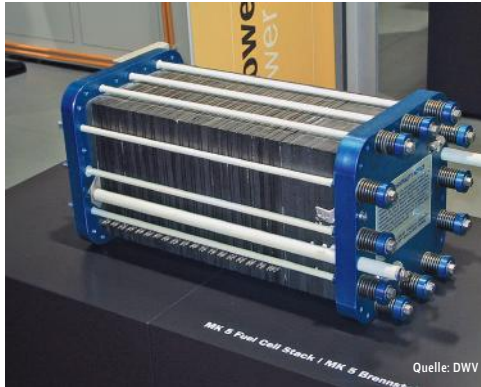
Bezeichnung	Arbeits- temperatur	Elektrolyt	Anwendung	Kraftstoff	Bemerkung
AFC alkalisch	60 – 90 °C	30 – 50 % Kalilauge	stationär, mobil	H ₂	CO ₂ -freie Reaktanden erforderlich
PEMFC Polymer-Elektrolyt	bis 80 °C	polymere Membran	mobil, portabel, Hausheizungen, Kraft-Wärme- Kopplung, APU	H ₂	sehr breites Anwendungs- gebiet
DMFC Direkt-Methanol	bis 80 °C	polymere Membran	portabel, mobil	Methanol	kleinere Leistungen
PAFC Phosphorsäure	160 – 220 °C	konzentrierte Phosphorsäure	Kraft-Wärme- Kopplung	Erdgas	externe Reformierung
MCFC Schmelzkarbonat	ca. 650 °C	Li ₂ CO ₃ / Na ₂ CO ₃	Kraft-Wärme- Kopplung	Erdgas Biogas	interne Reformierung
SOFC Festoxid	> 800 °C	ZrO ₂ / Y ₂ O ₃	Hausheizungen, Kraft-Wärme- Kopplung, APU	Erdgas	interne Reformierung

Protonen, die die Membran durchdringen, schließen den elektrischen Stromkreis und reagieren mit den Sauerstoffionen:



Die Summe der umgewandelten chemischen Energie des Wasserstoffs besteht somit aus 1) dem Stromfluss, 2) der Wärme, die durch die von den Ladungsträgern überwundenen inneren Widerstände entsteht,

Abb. 19
PEM-Brennstoffzellen-Stack von Ballard



sowie 3) der Kondensationswärme des produzierten Wassers. Strom und Wärme stehen dabei etwa im Verhältnis von 1:1, weshalb man sagt, dass der elektrische Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle 50 % betrage. Eine einzelne Zelle entwickelt eine Spannung von weniger als 1V. Deshalb werden in der Praxis mehrere solcher Elemente zu einem Stack elektrisch in Reihe geschaltet, um die für den Anwendungsfall notwendige Spannung zu erreichen (s. **Abb. 19**). Eine detailliertere Darstellung dieser Vorgänge und eine tiefer gehende Charakterisierung des Membranmaterials wird beispielsweise in ^[1] gegeben.

Außer den beiden angesprochenen Brennstoffzellenarten existieren noch vier weitere Typen, die alle bereits als industrielle Produkte entwickelt wurden und auch am Markt erhältlich sind. Ihre Bezeichnung richtet sich nach dem eingesetzten Elektrolyten. Sie sollen an dieser Stelle nicht im Einzelnen besprochen werden. Bemerkt sei, dass die bei hohen Temperaturen arbeitenden Brennstoffzellen (Festoxid- und Schmelzkarbonat-Zellen) nicht Wasserstoff benötigen, sondern intern reformieren und sich somit in die existierende Infrastruktur für fossile Kraftstoffe einfügen.

02.4 Speicherung von Wasserstoff

Wasserstoff ist das chemische Element mit der kleinsten Dichte. Deshalb ist seine Energiedichte gering und kann während des Speicherungsprozesses enorm gesteigert werden. Dies gelingt wie bei anderen Gasen im einfachsten Fall durch Komprimieren. In den üblichen stählernen Industriegasflaschen werden Drücke

Abb. 20

Druckspeicher aus Kompositmaterial von Magna Steyr



Abb. 21

Kryospeicher bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung



Abb. 22

Metallhydridspeicher eines U-Boots, Klasse 212A



bis zu 35 MPa verwendet, in großvolumigen stationären Speichern sind weniger als 10 MPa üblich. Bei speziell für den mobilen Bereich entwickelten Kompositbehältern – das sind mit Karbonfasern umwickelte und vergossene Metall- oder Kunststoffbehälter – können 70 MPa erreicht werden, und in Kavernen liegen geologisch mögliche Drücke um 15 MPa vor. Um diese Drücke zu erreichen, müssen für Wasserstoff geeignete Kompressoren Arbeit verrichten. Beschreibt man nun die Einspeicherung bei etwa 10 MPa mit einem Wirkungsgrad von ca. 95 % und die bei 70 MPa mit ca. 90 %, so bedeutet das, dass für den jeweiligen Vorgang bis zu 10 % des gespeicherten Wasserstoffs als Energie zum Komprimieren aufgewendet werden müssen.

Die Verflüssigung von Gasen stellt eine zweite Methode dar, ihre Dichte zu erhöhen. Für Wasserstoff braucht man dazu $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, nur Helium siedet bei noch niedrigerer Temperatur. Je nach Größe der verwendeten Apparatur wird dabei bis zu einem Drittel der chemischen Energie des eingespeicherten Wasserstoffs benötigt. Nach Stolzenburg/Quack^[12] wird bei diesem Verfahren ein Wirkungsgrad von 80 % erreichbar sein. Kryobehälter haben oben eine Öffnung, um abdampfenden Wasserstoff auszulassen.

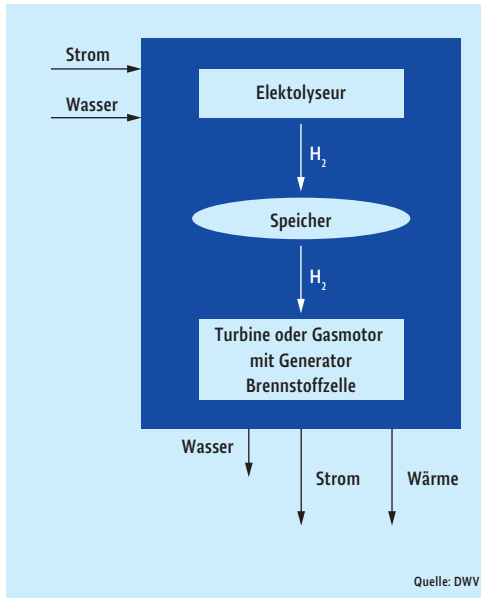
Eine weitere, nur bei Wasserstoffgas mögliche Speicherungsart ist die Einlagerung von Wasserstoffatomen in metallische Legierungen sehr unterschiedlicher Zusammensetzung. Die Atome werden auf Zwischengitterplätzen schwach gebunden; es entstehen Metallhydride. Dabei erwärmt sich das speichernde Medium wegen der frei werdenden Bindungsenergie. Es muss gekühlt werden, weil sich die Aufladung des Metalls nicht mehr steigern lässt, wenn die Temperatur so hoch ist, dass genügend Energie für die Abspaltung der Wasserstoffatome aus ihren Bindungen entsteht. Üblicherweise werden Metallhydridspeicher mit einem Kühl-/Heizsystem ausgestattet, um einerseits rasch genug »tanken« zu können, andererseits aber um zur Benutzung des eingelagerten Gases einen hinreichend starken Gasstrom zu erzeugen. In Metallhydridspeichern wird leicht eine doppelt so hohe Energiedichte wie im verflüssigten Wasserstoff

erreicht. Allerdings macht das große Gewicht dieser Speicher ihren Einsatz in Kraftfahrzeugen praktisch unmöglich. Benutzt werden sie dennoch in stationären Anwendungen und in speziellen Maschinen wie in Gabelstaplern, wo sie gleichzeitig als Ausgleichsmassen dienen. Vorteilhaft ist ihr Einsatz bei Schiffen und Booten, sowohl wegen der großen Energiedichte als auch durch ihre Nutzung als Ballastmasse zur Stabilisierung.

Es wird intensiv geforscht, um die hohe Energiedichte dieser Feststoffspeicherung für Kraftfahrzeuge ausnutzen zu können. Dabei werden unter anderem zur Gewichtsverminderung leichte Metalle (Magnesium, Aluminium) und die Nanotechnologie eingesetzt sowie MOF-Materialien (metal-organic-frames) entworfen. Aus technischer Sicht muss aber auf Ergebnisse dieser Ar-

Abb. 23

Schema für einen Stromspeicher mit Wasserstoff als Energieträger



beiten nicht gewartet werden, um praktische Schritte in der Umsetzung der Wasserstofftechnologie zu unternehmen; die verfügbaren Lösungen erfüllen die technischen Anforderungen bereits heute.

Die vierte und letzte Möglichkeit, Wasserstoff zu speichern, besteht darin, chemische Verbindungen, die Wasserstoff enthalten, einzusetzen und am Ort der Wasserstoffnutzung eine Reformierung durchzuführen, um das Gas elementar darzustellen. Allen voran eignen sich dazu Kohlenwasserstoffe, aber auch Ammoniak und viele andere Stoffe, deren Moleküle einen hohen Wasserstoffanteil enthalten. Vorteilhaft ist dabei die hohe Energiedichte solcher Energieträger und – zumindest bei den Kohlenwasserstoffen – die mögliche Nutzung der vorhandenen Infrastruktur. Nachteilig ist die Notwendigkeit einer zusätzlichen Komponente innerhalb des angewendeten Systems. Dieser Nachteil trifft für die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle und für Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit interner Reformierung allerdings nicht zu. Anwendungen haben sich bei Hausheizungen und beim Heizen im mobilen Bereich etabliert. Direkt-Methanol-Brennstoffzellen spielen bei kleinen (< 100 W) Stromversorgungen eine Rolle.

Zusammengefasst: Wasserstoff zu speichern bedeutet, für den Nutzer eine möglichst hohe Energiedichte vorzuhalten. Im Abschnitt »Eigenschaften von Wasserstoff« werden dazu Werte aufgeführt, die für eine grobe Abschätzung der geometrischen Volumina von Speichern geeignet sind.

Auch **Abbildung 23** stellt als symbolische Struktur eine Zusammenfassung dar: Der Speicher für Wasserstoff ist eines von drei Elementen des gesamten Speicherprozesses von elektrischem Strom. Wasserstoff ist zunächst elementar herzustellen, wird in einer der besprochenen Formen gespeichert und schließlich im Bedarfsfall auf unterschiedliche Weisen in Elektrizität zurückverwandelt. Jede dieser drei Komponenten ist dadurch gekennzeichnet, dass Energie entsprechend der besprochenen Wirkungsgrade verbraucht wird. Der Gesamtwirkungsgrad des Speicherverfahrens ergibt sich durch Multiplikation der einzelnen Wirkungsgrade. Das Ergebnis liegt bei 35 %. Das bedeutet, von dem zur Speicherung gebrachten Strom steht schließlich für die Nutzung noch ein Drittel zur Verfügung. Das mag zunächst nach einer geringen Ausbeute klingen, jedoch wird diese durch einen enormen Vorteil relativiert: Der auf diese Weise in jeder Größenordnung speicherbare Strom steht genau im Moment des Bedarfs zur Verfügung.

Damit entfällt die mit dem Vorhalten eines elektrischen Netzes verbundene »Energieverschwendung«. Hinzu kommt, dass ein Wirkungsgrad von 35 % gegenüber konventionellen Energieumwandlungsverfahren (Dampfmaschine, Ottomotor, konventionelles Wärmekraftwerk) eine wesentliche Verbesserung bedeutet – ein weiterer Vorteil des Power-to-Hydrogen-Verfahrens.

02.5 Verteilung von Wasserstoff / Infrastruktur

Mit den beschriebenen Speichermöglichkeiten sind auch die Grundlagen für die Verteilung von Wasserstoff gegeben. Stahlflaschen, Druckflaschenbündel, Flüssiggastransporter, Kryo-Container, das alles wurde entwickelt, technisch erprobt und ist nun im täglichen Gebrauch zu Wasser und zu Lande

im Einsatz. Kleinere Metallhydridspeicher für portable Geräte könnten künftig über Baumärkte im Austausch voll gegen leer gehandelt werden. Gleiches gilt für Methanolpatronen.

Bisher weitgehend unbekannt ist, dass die Chemieindustrie bereits seit 1940 ein etwa 230 km langes Rohrleitungsnetz im Ruhrgebiet betreibt. Inzwischen gibt es auch zwischen Frankreich, Belgien und den Niederlanden (810 km, von Air Liquide), in Mitteldeutschland zwischen Leuna, Schkopau, Bitterfeld und Piesteritz (90 km, von Linde) und mit mehr als 1.000 km in Nord-

Abb. 24
Wasserstoff-
Verbundsystem
Rhein-Ruhr,
ca. 210 km,
seit 1940

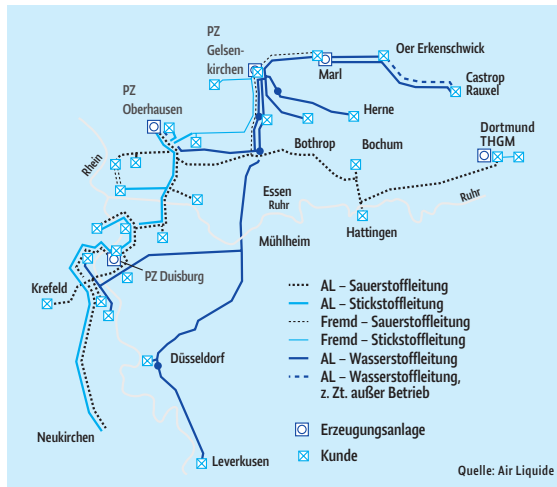


Abb. 25

H₂-Tankstelle
im Klärwerk Barth
mit BZ-Bus und
O₂-Tank (hi.)



Abb. 26

Hochtank der
H₂-Tankstelle
am Flughafen
Berlin-Brandenburg



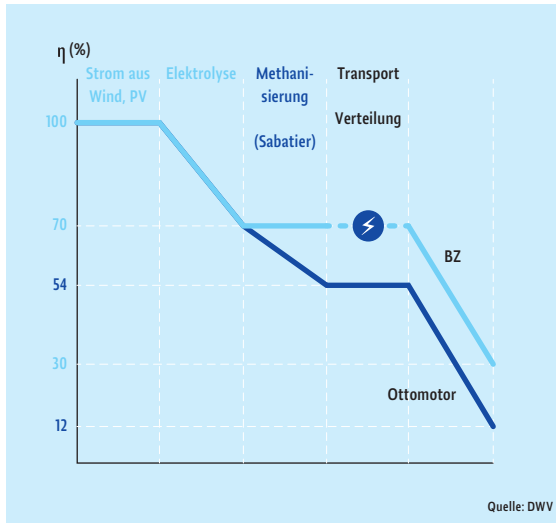
amerika sowie in Thailand und Brasilien Verbundsysteme für Wasserstoff. Prinzipiell gilt, dass Energie mittels Röhren billiger als über elektrische Netze verteilt werden kann.

Unter den bisher errichteten Tankstellen für Wasserstoff gibt es Stationen, die beliefert werden, und solche, wo der Wasserstoff an Ort und Stelle hergestellt wird, wie z. B. in Barth (s. Abb. 25) und Barcelona. Hier erzeugen Photovoltaikanlagen den Strom für die Elektrolyse. Am Berliner Flughafen Schönefeld sorgen Windräder für den Elektrolysestrom. Obwohl Deutschland beim Ausbau der Wasserstoff-Tankstellen-Infrastruktur deutlich hinter Japan und Kalifornien zurückliegt, sind bei uns in den Ballungsräumen Rhein-Ruhr, Rhein-Main, Stuttgart, München, Berlin und Hamburg Tanksysteme in Erprobung.

Wie vorab erwähnt, wird in letzter Zeit viel über »Power-to-Gas« gesprochen. Damit ist gemeint, aus grünem, nicht bedarfsgerecht produziertem Strom Wasserstoff herzustellen. Dieser »grüne Wasserstoff«

kann auch in das Erdgasnetz eingeleitet werden, um aufwendige Speicherung zu umgehen. Diese Verfahrensweise wäre eine akzeptable Lösung, sollten keine anderen Wasserstoffspeichermöglichkeiten bestehen, denn so könnte bei einem Stromüberangebot die Abregelung der Windkraftanlagen vermieden werden. Als generelle Verfahrensweise bleibt diese Lösung jedoch umstritten, weil einerseits der Wasserstoff nur mühevoll wieder aus dem Gemisch herausgenommen werden kann und er außerdem für Niedertemperatur-Brennstoffzellen, also für den Verkehrsbereich, verloren wäre. Zum anderen sind die Wärmenutzer unter den Erdgaskunden zum Betrieb der Anlagen auf einen konstanten Energiegehalt des Gemisches angewiesen. Diese Kontinuität kann bei der Einspeisung des Wasserstoffs ins Gasnetz nicht garantiert werden. Würde man, um dieses Problem zu umgehen, den Wasserstoff vor der Einleitung methanisieren, so entstünde beim Sabatierprozess ein weiterer Wirkungsgradverlust. Vorangesetzt, dieses Gasgemisch fände in Verbrennungsmotoren im Verkehr Anwendung, läge der Gesamtwirkungsgrad bei 10 %, also noch unter dem der Dampfmaschine.

Abb. 27
 Vergleich der Wirkungsgrade bei direkter Nutzung des grünen Wasserstoffs in der Brennstoffzelle und nach Methanisierung des Wasserstoffs im Ottomotor



Ein letzter Gesichtspunkt im Zusammenhang mit der Infrastruktur zur breiten Anwendung von Wasserstoff ist die Frage, ob das Erdgasnetz auch für Wasserstoff geeignet ist. Die Antwort lautet: Prinzipiell schon. Allerdings müssten dafür dem neuen Medium angepasste Verdichter eingeführt sowie einige Komponenten und Materialien ausgetauscht werden. Insbesondere müssten Werkstoffe vermieden werden, die unter den gegebenen Bedingungen zur H_2 -Versprödung

neigen. Letzteres gilt auch für Leitungen und Behälter, die Wasserstoff enthaltende Gasgemische führen. In vielen Fällen können lange Beförderungswege jedoch vermieden werden, da Wasserstoff praktisch überall herstellbar ist.

02.6 Sicherheit mit Wasserstoff

Als Energieträger hält Wasserstoff – genauso wie Erdgas und Benzin – Energie bereit. Beim Umgang mit energietragenden Substanzen ist es generell wichtig, bestimmte Regeln einzuhalten, damit die Energie ausschließlich gezielt und im gewünschten Ausmaß freigesetzt wird.

Bei Wasserstoff sind es vor allem drei Eigenschaften, deren Kenntnis und Beachtung für seine sichere Handhabung wichtig sind:

- Als Gas mit der geringsten Dichte steigt Wasserstoff im Allgemeinen stets nach oben. Räume, in denen mit Wasserstoff gearbeitet wird, müssen deshalb nach oben entlüftet werden.
- Wegen ihres sehr kleinen Durchmessers bewegen sich Wasserstoffmoleküle in Luft schneller als andere Teilchen. Wasserstoffatome können in Materialien hineindiffundieren und sich in ihnen bewegen. Dadurch wird in bestimmten Stoffen Versprödung bewirkt.
- Wasserstoff bildet im Unterschied zu anderen Energieträgern mit Luft in einem weiten Bereich, nämlich zwischen 4 % und 75 % Anteil, brennbare Gemische. Deshalb ist die breite Anwendung von warnenden Sensoren beim Umgang mit Wasserstoff unbedingt erforderlich.

Mehrere chemische und physikalische Effekte erlauben es, sicher wirkende Sensoren zu konstruieren. Zunächst sei daran erinnert, dass Platinoberflächen dank ihrer katalytischen Wirkung in Gegenwart von Wasserstoff und Sauerstoff umgehend die Verbrennung von Wasserstoff bewirken, wobei Wärme ent-

steht. Die Erwärmung des Materials kann gemessen werden und als Indikator für die Gegenwart von Wasserstoff genutzt werden.

Weiterhin besitzt Wasserstoff eine gegenüber allen anderen Gasen etwa zehnfach größere Wärmeleitfähigkeit. Diese Eigenschaft wird ausgenutzt, um sehr empfindliche Sensoren zu konstruieren, die eine kontinuierliche Messung der Wasserstoffkonzentration erlauben. Dieses Messprinzip wird seit langem in Gaschromatographen eingesetzt.

Schließlich kommt auch Palladium als sensorisches Element zum Einsatz, da es von Wasserstoff durchdrungen werden kann und Wasserstoff aufnimmt, wie etwa ein Schwamm Wasser. Dabei vergrößert sich einerseits das Volumen eines Palladiumkörpers, zum anderen aber verändern dünne aufgedampfte Schichten den elektrischen Widerstand und auch das optische Verhalten, wobei genügend kalibrierbare Messmöglichkeiten entstehen. Es sind auch andere Materialien mit solchem Verhalten gefunden worden, und es wurde eine Vielzahl von Sensoren dieser Art entwickelt und in der Wasserstofftechnik eingesetzt.

Zusammengefasst: Der Umgang mit Wasserstoff ist nicht gefährlicher als der mit anderen Energieträgern. Für ein unfallfreies Arbeiten mit Wasserstoff ist der Einsatz von Sensoren sinnvoll. In der Praxis ist es wichtig, den für die betreffende Messaufgabe jeweils optimalen Sensor aus dem breiten Angebot auszuwählen.

03 AUSBLICK

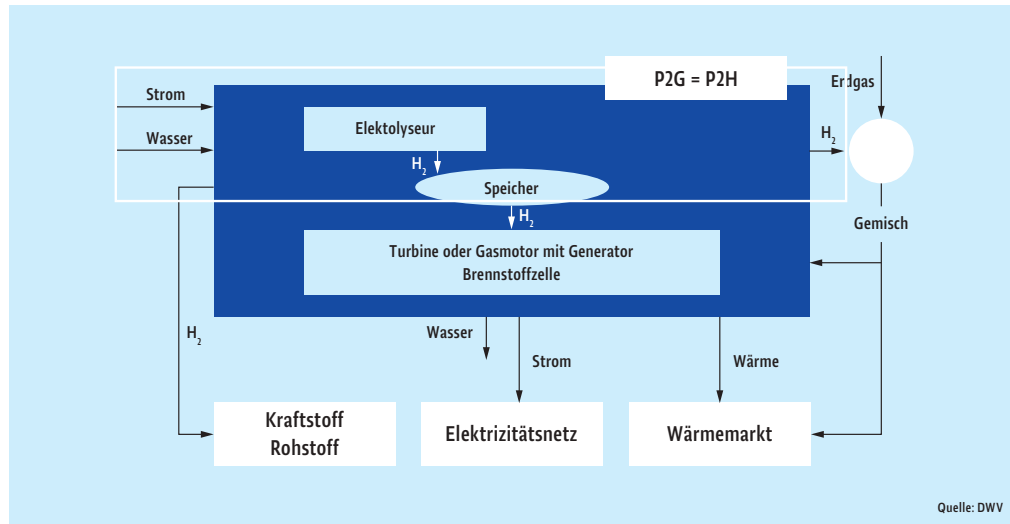
Die Nutzung von Wasserstoff wird die Energiewirtschaft in Bezug auf Nachhaltigkeit und Sparsamkeit grundsätzlich verändern. Der Einsatz von Wasserstoff ist nachhaltig, weil im Wesentlichen erneuerbare Energiequellen genutzt und hauptsächlich die umweltfreundlichen Energieträger Strom und Wasserstoff in allen Teilen der Energiewirtschaft eingesetzt werden. Sparsamkeit im Umgang mit Energie ergibt sich einerseits daraus, dass Strom im großen Stile als Wasserstoff gespeichert wird und nur im Bedarfsfall in Strom zurückverwandelt zu werden braucht – beispielsweise zur Netzstabilisierung. Andererseits bräuchten Anlagen zur Gewinnung grüner Energie im Überangebotsfall nicht abgeschaltet zu werden. Wenn Wasserstoff aus dem Speicher als Kraftstoff im Transportwesen eingesetzt wird, kehrt er nicht wieder ins elektrische Netz zurück, belastet dieses also nicht, weshalb sich die Notwendigkeit von Netzausbau grundsätzlich vermindert. Schließlich bedeutet der Einsatz von Brennstoffzellen im mobilen Bereich eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrades gegenüber dem Gebrauch von Verbrennungsmaschinen. Die Speicherung von Strom wird also zum zentralen Punkt und zum verbindenden Element zwischen den einzelnen Bereichen der Energieversorgung und macht so aus der »Stromwende« eine wirkliche Energiewende, die die Sektoren Mobilität, Strom und Wärme umfasst.

Der Überschussstrom wird – wie wir bereits in **Abbildung 23** gesehen haben – mit Hilfe der Elektrolyse in den sauberen Energieträger Wasserstoff verwandelt. Es bieten sich dann unterschiedliche Wege zur Verwendung des Energieträgers.

Der geringste Aufwand entsteht bei der Einspeisung des Wasserstoffs ins Erdgasnetz. Wie weiter oben angedeutet, kann zuvor ggf. auch eine Methanisierung des Wasserstoffs erfolgen. Beide Verfahrensweisen bedeuten allerdings eine Entwertung des Wasserstoffs: Er ist danach nicht mehr in PEM-Brennstoffzellen nutzbar.

Lagert man den Wasserstoff in einem eigenen Speicher, so wird aus diesem die Belieferung des Verkehrssektors und anderer Wasserstoffverbraucher möglich. Die Zumischung zum Erdgas bleibt eine Option. Mit reinem Wasserstoff aber können Niedertemperatur-Brennstoffzellen zur Unterstützung des elektrischen Netzes oder in netzfernen Lagen, Notstromversorgungen und Heizungsanlagen bei einer deutlichen Minderung schädlicher Emissionen betrieben werden. Wasserstoff wird in allen drei Bereichen der Energiewirtschaft fossile Energieträger ersetzen und kann auch in der Produktion umweltfreundlicher Erzeugnisse eingesetzt werden.

Abb. 28
Grüner Wasserstoff durchdringt die Energiewirtschaft



04 DER DWV POSITIONIERT SICH

Bereits seit den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts nimmt Deutschland eine Vorreiterrolle bei der Nutzung regenerativer Energiequellen, insbesondere von Photovoltaik und Windkraft ein. Dank des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG, April 2000) mit dem Einspeisegebot grüner Elektrizität hat sich in beeindruckendem Tempo eine starke Sparte für Wind- und Photovoltaikstrom entwickelt. Obwohl andererseits schon seit Ende der siebziger Jahre überzeugende Demonstrationsprojekte zu energetischem Wasserstoffeinsatz realisiert worden sind, engagiert beschrieben durch Weber^[13], hat eine solche Entwicklung bedauerlicherweise erst viel später eingesetzt. Allerdings hat bis heute grüner Wasserstoff keinen Eingang in die fördernde Gesetzgebung gefunden, obwohl die Forschung auf diesem Gebiet, insbesondere auch die Entwicklung von marktreifen Produkten innerhalb des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (2006)^[14] staatliche Unterstützung erfährt. Nur eine fördernde Gesetzgebung kann Investitionssicherheit geben und damit privatwirtschaftliche Initiativen auslösen.

In der Überzeugung, dass ohne Wasserstoff als Energieträger in großem Stil die Energiewende nicht erfolgreich sein wird, hat der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband ein Positionspapier entworfen.^[15] Thesenartig werden der Stand und die Möglichkeiten der Wasserstofftechnologie umrissen sowie Forderungen in Richtung Politik erhoben, konsequent die Voraussetzungen für die breite Einführung des Energieträgers Wasserstoff zu schaffen.

Noch direkter wurde anlässlich der Jahrespressekonferenz des Verbandes im Februar 2014 in Berlin formuliert:^[16]

- Es ist unverständlich, dass letztendlich auch im Rahmen der Energiewende doch noch immer eine der wesentlichen zielführenden Schlüsseltechnologien (Power-to-Hydrogen) in der Politik so wenig Beachtung findet.
- Der erste Schritt der Nutzung von nicht bedarfsgerecht produziertem elektrischem Strom aus erneuerbaren Energien mittels Elektrolyse muss in die Konzeption zu einer nachhaltigen Energiewende konsequent integriert werden.
- Ein Markteinführungsprogramm für mit Wind- und Solarstrom erzeugten Wasserstoff ist so zu gestalten, dass Rahmenbedingungen für die wirtschaftliche Realisierung der notwendigen Anlagen – Elektrolyse und Speicherung – Investitionssicherheit geben.
- Aus regenerativem Strom erzeugter Wasserstoff ist auf die Treibhausgasminderungsquote anzurechnen, wobei er mehrfach bewertet werden muss, damit seine Marktverbreitung 1) im reinen Wasserstoffpfad, 2) dem Erdgas beigemischt und 3) als Grundstoff in der Produktion fossiler Kraftstoffe möglich wird.
- Wer Wasserstoff ausschließlich mit Wind- und Solarstrom herstellt, damit er im Verkehrsbereich eingesetzt werden kann, und einerseits den Strom dafür direkt beim Erzeuger erwirbt, sich andererseits aber dabei dem Systemintegrationsregime unterwirft, sollte einen Bonus erhalten.
- Power-to-Hydrogen ist in die existierenden technischen Regelungen für die Erdgasinfrastruktur einzubeziehen, wobei Anpassungen insbesondere hinsichtlich der Beimischung von Wasserstoff zum Erdgas erforderlich sein werden.

Investitionszuschüsse und Förderungen werden nur für eine begrenzte Einführungszeit notwendig sein. Ausschlaggebend für eine erfolgreiche Markteinführung ist aber die gesetzliche Klarstellung, dass Power-to-Hydrogen-Anlagen keineswegs Letztverbraucher für den grünen Strom darstellen und demzufolge nicht mit Abgaben belastet werden dürfen.

Bei dieser aufwendigen und anspruchsvollen Aufgabe sollten wir nicht aus den Augen verlieren, dass die Energiewende eine nationale Angelegenheit ist, die für die Wirtschaft Zukunftssicherung bedeutet. Künftig wird noch viel mehr als bereits heute nicht der Reichtum an Bodenschätzen bestimmend für das Nationaleinkommen sein, sondern technologisches Können und Innovation. Wir befinden uns auf einem guten Weg, indem wir für Kinder und Enkel Kosten und Mühen auf uns nehmen und dem verlockenden Gedanken »Nach uns die Sintflut« keinen Raum lassen.

05

DIE POSITION DES DWV ZUR ENERGIEVERSORGUNG DER ZUKUNFT

1. Die zukünftige Energieversorgung in Deutschland wird aus Gründen des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung mehr und mehr auf **erneuerbaren Primärenergien** beruhen. Diese werden im ersten Schritt, solange ihr Anteil an der Gesamtenergieerzeugung noch relativ gering ist, direkt in Strom umgewandelt und in das Netz eingespeist. Ihre anfängliche Nutzung erfolgt daher auch ohne weitere Umwandlung oder Zwischenspeicherung und die dabei auftretenden Wirkungsgradverluste.
2. Die meisten erneuerbaren Primärenergien treten allerdings häufig nur fluktuierend auf, was bei größeren Anteilen an der Energieversorgung Energiespeicherung notwendig macht. Das gilt insbesondere für die in Deutschland stark vertretenen Anlagen zur Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie. Bis zum Jahre 2020 werden diese beiden **volatilen Stromquellen** ca. 80 % der installierten Kapazitäten aus erneuerbaren Energien ausmachen.
3. Zur Stabilisierung der elektrischen Netze und Schaffung eines lang-, mittel- und kurzfristigen Bedarfsausgleichs sind deshalb – neben Netzausbau und Etablierung von Regelenergiekapazitäten – auch leistungsfähige **Energiespeicher** notwendig. Die Speicherung großer Energiemengen in der

Größenordnung von mehreren Terawattstunden über mehrere Tage oder längere Zeiträume stößt dabei an die Grenzen konventioneller Technologie (Pumpspeicherwerke oder Druckluftspeicher) und kann **nur durch Wasserstoff** in Kavernen gesichert werden. Durch die elektrolytische Erzeugung ergibt sich auch eine ausgleichende Wirkung auf die Stromnetze (»Abschöpfung« von Stromüberschüssen im Netz). Die Rückverstromung kann dann in GuD-Kraftwerken, oder in fernerer Zukunft auch über Brennstoffzellen mit jeweils hohen Wirkungsgraden, erfolgen. Nur durch die Möglichkeit der Speicherung großer Energiemengen werden erneuerbare Primärenergien erst grundlastfähig.

4. Der gespeicherte Wasserstoff sollte als solcher direkt verwendet werden, um weitere Wirkungsgradverluste (z. B. durch Methanisierung) zu vermeiden und den **hohen Wirkungsgrad der Brennstoffzelle** in der weiteren Verwendung zu nutzen. Den höchsten Substitutionswirkungsgrad erbringt Wasserstoff in brennstoffzellenelektrischen Antrieben von Pkw und Stadtbussen als Ersatz für Verbrennungsmotoren. Durch den hohen Wirkungsgrad der Brennstoffzelle ist zu erwarten, dass im Bereich der Mobilität der Wasserstoff die Wirtschaftlichkeit sehr früh erreicht.
5. **Elektromobilität** ist der integrale Oberbegriff für alle Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben, die entweder aus Batterien und/oder Wasserstoff und Brennstoffzellen mit Energie versorgt werden. Jedoch ermöglichen nur Wasserstoff und Brennstoffzelle die heute üblichen Reichweiten und kurzen Betankungszeiten. Die Kombination der Brennstoffzelle mit einer Batterie ermöglicht einen besonders hohen Wirkungsgrad und geringen Kraftstoffverbrauch.
6. Die technischen Probleme für den Einsatz von H₂/BZ-Fahrzeugen sind inzwischen gelöst und ihre kommerzielle Einführung ist absehbar. So plant zum Beispiel Daimler erste kommerzielle Fahrzeuge ab 2017. Aber auch Toyota, Hyundai, GM/Opel und Honda haben ähnliche Programme etwa ab Mitte dieses Jahrzehnts angekündigt, wobei Toyota schon erste Fahrzeuge verkauft. Zeitgleich muss eine geeignete Infrastruktur aufgebaut werden, um die breite Einführung solcher Fahrzeu-

- ge zu ermöglichen. Dazu sind die Zusammenarbeit aller Beteiligten und erhebliche politische Unterstützung erforderlich, um die immer noch bestehenden Unsicherheiten zu beseitigen.
7. Eine weitere Anwendung für Wasserstoff und Brennstoffzelle ist die **unterbrechungsfreie Stromversorgung für sicherheitsrelevante Anlagen** in der Datenverarbeitung oder Steuerungs- und Verkehrstechnik wie auch in der Medizin. Damit können Batterien, Notstrom-Dieselaggregate oder sonstige konventionelle Techniken insbesondere für längere Laufzeiten ersetzt werden. Diese Anwendung wird terrestrisch bereits eingesetzt. Die Einführung für die Luftfahrt steht bevor (Airbus, Boeing).
 8. In **portablen Anwendungen** oder sonstigen elektrischen Arbeitsgeräten (z. B. an Bord von Fahrzeugen) ermöglichen Wasserstoff und Brennstoffzelle erheblich längere Betriebszeiten als Batterien bei ebenfalls sauberem Betrieb.
 9. In der **Hausenergieversorgung** ermöglicht die Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik mit Hilfe der Kraft-Wärme-Kopplung ebenfalls hohe Wirkungsgrade, wobei aufgrund der heute vorhandenen Infrastruktur auch kurzfristig Anwendungen mit der Brennstoffzelle mit Hilfe von Erdgas und dessen Reformierung möglich sind. Darüber hinaus kann die sauerstoffarme Abluft der Brennstoffzelle auch für Sicherheitszwecke benutzt werden, z. B. in den elektrischen Schaltzentralen, Kühlhäusern, Magazinen und ähnlichen wichtigen Versorgungseinrichtungen.
 10. Der jährliche Wasserstoffbedarf der chemischen Industrie beträgt in Deutschland zurzeit etwa 20 Mrd. Nm³. Dieser Wasserstoff wird bisher größtenteils über die Reformierung von Erdgas unter hohen CO₂-Emissionen hergestellt. Die Herstellung aus erneuerbaren Primärenergien kann diese **CO₂-Emissionen vermeiden**. Gleichzeitig werden bereits heute erhebliche Mengen Wasserstoff als Nebenprodukt erzeugt und können genutzt werden.

11. In allen genannten Technologien gehört Deutschland zu den weltweit führenden Nationen. Die konsequente Weiterentwicklung unterstützt diese führende Stellung und sichert Technologievorsprung und Arbeitsplätze. Im Zentrum muss dabei die Entwicklung einer leistungsfähigen Zulieferindustrie stehen.
12. Auch die vorhandene Infrastruktur der Gasnetze kann anfänglich und für Teilmengen zur schnellen Integration der erneuerbaren Primärenergien genutzt werden. Wesentliche Anteile des Energietransportes lassen sich über das vorhandene Gasnetz realisieren. Bereits heute sind Wasserstoffkonzentrationen im Erdgasnetz von ca. 5 % ohne nennenswerte Umstellungen möglich. Die Anwendbarkeit noch höherer Konzentrationen (bis ca. 10 %) wird derzeit untersucht.
13. Im Falle größerer Energiemengen ist auch eine Methanisierung (Sabatier-Prozess) zu synthetischem Erdgas denkbar, allerdings mit Wirkungsgradverlusten von ca. 20 %. Weitere Wirkungsgradverluste kommen hinzu, da das Methan dann nur noch über Verbrennungsprozesse und nicht mehr über die Brennstoffzelle zur weiteren energietechnischen Nutzung verwendet werden kann. Damit wird ein wesentlicher Vorteil von Wasserstoff verschenkt. Im Falle einer rein thermischen Anwendung (z. B. Hausheizung) ist allerdings die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur von Vorteil.

FAZIT

Wasserstoff ist ein wichtiger Energieträger in einer zukünftigen CO₂-freien Energiewirtschaft.

Als leistungsfähiges Energiespeichermedium ist er bestens geeignet und unerlässlich, um den weiteren starken Ausbau der erneuerbaren Energien zu unterstützen.

Wasserstoff und Brennstoffzellen werden zur Erfüllung der technischen und klimapolitischen Ziele durch den Einsatz von erneuerbaren Primärenergieträgern gebraucht. Die Phase der Markteinführung ist angelaufen, in mobilen (»Elektromobilität«) wie auch stationären Anwendungen. Ob diese Technologien letztendlich aus Deutschland kommen oder nach Deutschland, das entscheiden wir selbst in der Umsetzung der aktuellen Energiepolitik.

Die Entwicklung einer CO₂-freien Wasserstoffwirtschaft ist deshalb eng verknüpft mit der erneuerbaren Energieversorgung der Zukunft. Aus diesem Grund muss der Wasserstoff in allen gesetzlichen Regelungen und Verordnungen der Energiewirtschaft gleichrangig mit den erneuerbaren Primärenergien behandelt werden. Insbesondere bei den Regelungen für Energiespeicher ist der Wasserstoff als geeignetes Medium zu berücksichtigen, so z. B. im EEG und/oder EnWG.

Der DWV bietet mit seiner Sachkompetenz zu Wasserstoff und Brennstoffzellen in Zusammenarbeit mit Partnern wie DVGW, VDMA, VDE, Industrieunternehmen aus Chemie und Mobilität und Energieversorgern seine Mitarbeit bei der Erarbeitung entsprechender Regeln an.

06 QUELLEN

06.1 Referenzen

- [1] von Weizsäcker, E.U., u. a., Faktor 4, Drömer/Knauer, München, 1996
- [2] Rahmsdorf, S., Bild der Wissenschaft, Heft 1 / 2003
- [3] Forschungszentrum Umwelt (FZU) an der Universität Karlsruhe, Inst. IWC, 2001
- [4] Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST), Energie-Infrastruktur 21, www.dwv-info.de
- [6] LBST, Wasserstoff und Brennstoffzellen – starke Partner der regenerativen Energien, www.dwv-info.de
- [6] Solarer Wasserstoff, Deutsche Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, 1990
- [7] Miede, A., u. a., Vergleichmäßigte Einspeisung von Windstrom, Studie für das Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern, Stralsund, 2004/5
- [8] Weinmann, O., Zukunft Energie-Speicher, FOCUS-Symposium, Berlin, 2011
- [9] Crocogino, F., R. Hamelmann, Kavernenspeicherung, 14. Energiesymposium Stralsund, 2007, Tagungsband 11–17
- [10] Winter, C.-J., J. Nitsch, Wasserstoff als Energieträger, Springer, Berlin, 1989, ISBN 3-540-50221-1
- [11] Lehmann, J., T. Luschtinetz, Technik im Fokus – Wasserstoff und Brennstoffzellen, Springer, Heidelberg, 2014, ISBN 978-3-642-34667-5

- [12] Stolzenburg, K., H. Quack u.a., Wasserstoffverflüssigung, 20. Energiesymposium Stralsund, 2013, Tagungsband 227-234
- [13] Weber, R., Der sauberste Brennstoff, Olynthus, Oberbözberg, 2. erw. Auflage, 1991
- [14] Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (2006), www.ptj.de oder nip@now-gmbh.de
- [15] Positionspapier des DWV 2013/14, www.dwv-info.de
- [16] Pressekonferenz des DWV, Februar 2014, www.dwv-info.de

06.2 Weiterführende Literatur

Kordes, K., Simader, G., Fuel Cells and Their Application, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1996, ISBN 3-527-28579-2

Pehnt, M., Energierevolution Brennstoffzelle, Wiley-VCH, Weinheim, 2002, ISBN 3-527-30511-4

Geitmann, S., Wasserstoff und Brennstoffzellen, Hydrogeit, Kremmen, 2004, ISBN 3-937863-04-4

Geitmann, S., Wasserstoff-Autos, Hydrogeit, Kremmen, 2006, ISBN 3-937863-07-9

Stolten, D., Hrsg., Hydrogen Energy, Wiley-VCH, Weinheim, 2010, ISBN 978-3-527-32711-9

Töpler, J., Lehmann, J., Hrsg., Wasserstoff und Brennstoffzelle – Technologien und Marktperspektiven, Springer Vieweg, Heidelberg, 2013, ISBN 978-3-642-37414-2

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e.V.

Moltkestraße 42, 12203 Berlin

Tel.: (030) 39820 9946-0

Fax: (030) 39820 9946-9

www.dwv-info.de

h2@dwv-info.de

Der DWV dankt allen seinen Mitgliedern, die durch ihre Zuarbeit, Diskussionsbeiträge und kritischen Hinweise an der Fertigstellung dieser Broschüre maßgeblich beteiligt waren.

Redaktion: Prof. Jochen Lehmann, Dr. Ulrich Schmidtchen

Zusammenstellung: Ortrud Luschtinetz

Druck: printec offset

Cover-Design: Volker Blandow, Robert Müller

Satzgestaltung: Andreas Wolter, Robert Müller

© DWV, Erstauflage: 2002, überarbeitet: 2006, 2007, 2009 & 2015

Erschienen 2015 im Hydrogeit Verlag, Oberkrämer

ISBN: 978-3-937863-45-0

**Deutscher Wasserstoff- und
Brennstoffzellen-Verband e.V.**

Moltkestraße 42
12203 Berlin

Tel.: (030) 39820 9946-0

Fax: (030) 39820 9946-9

www.dwv-info.de

h2@dwv-info.de



9 783937 863450