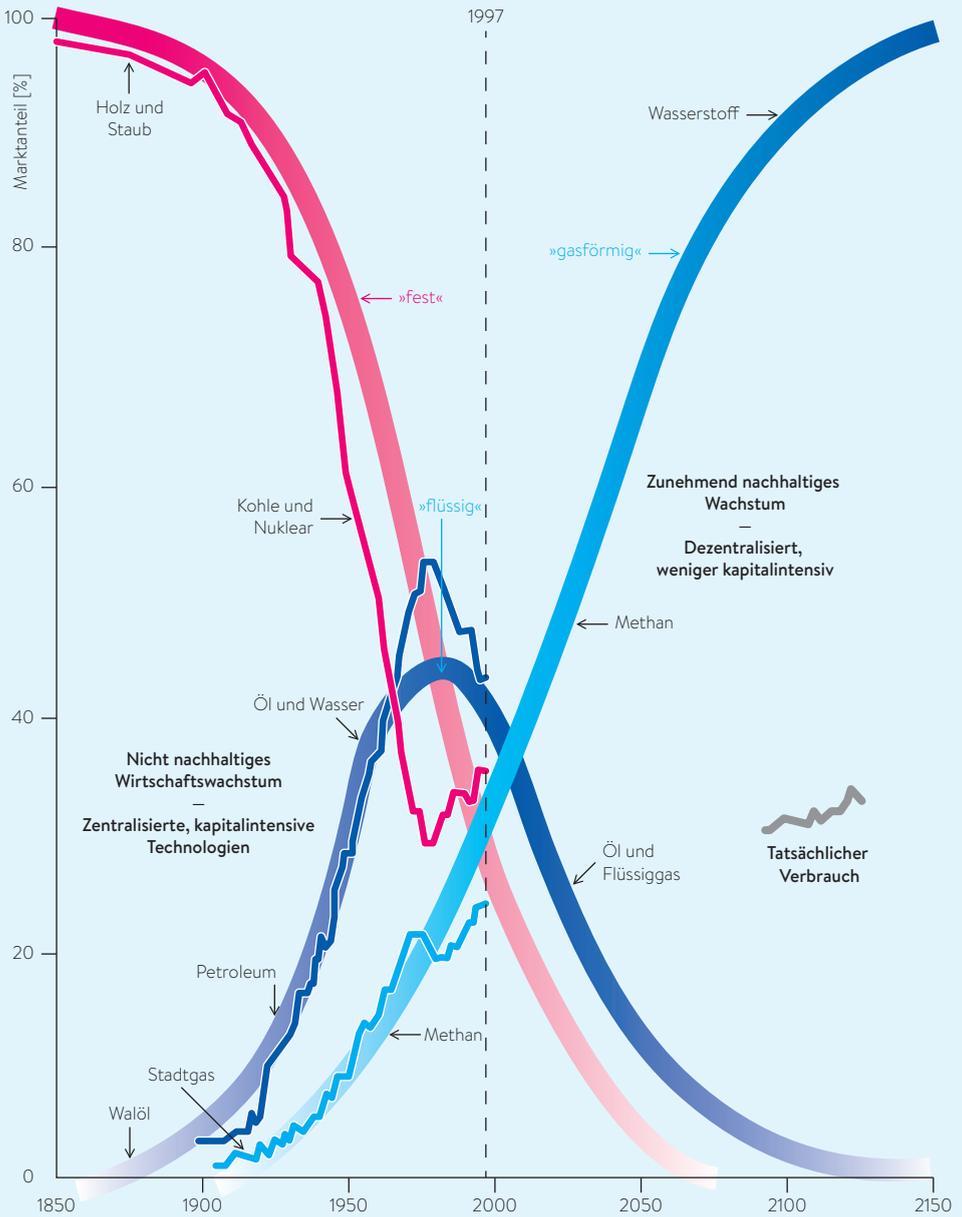


ABB. 1 GLOBALER WANDEL DER ENERGIETRÄGER (1850-2150)



AKTUELLER ENTWICKLUNGSSTAND DER H₂- UND BZ-TECHNOLOGIE

Betrachtet man den globalen Wandel der Energieträger seit Beginn der Industrialisierung und prognostiziert den Verlauf in die nähere Zukunft, so zeigt sich eine deutliche Änderung der physikalischen Form – des Aggregatzustands. Während anfänglich »feste« Energieträger wie Holz, Kohle oder Kernbrennstoffe genutzt worden waren, wurden diese bereits zu Anfang des 20. Jahrhunderts mit Beginn der Automobilität durch »flüssige« und später auch »gasförmige« Rohstoffe wie Öl oder Erdgas ersetzt (s. Abb. 1). Ein Blick in die Zukunft und auf die damit verbundene Ressourcenverfügbarkeit zeigt deutlich, dass Letztere dominieren werden und hierbei der Wasserstoff eine zentrale Rolle spielen wird.

»Was werden wir später einmal statt Kohle verbrennen?«, fragte der Seemann. »Wasser«, antwortete Smith. »Wasserstoff und Sauerstoff werden für sich oder zusammen zu einer unerschöpflichen Quelle von Wärme und Licht werden, von einer Intensität, die die Kohle überhaupt nicht haben könnte; das Wasser ist die Kohle der Zukunft.«

Jules Verne, Die geheimnisvolle Insel, 1875

EIGENSCHAFTEN VON WASSERSTOFF

Wasserstoff ist das leichteste Element, das wir kennen. Es kommt bei Raumtemperatur und Normaldruck als zweiatomiges, gasförmiges Molekül (H_2) vor, das bei $-252,76\text{ °C}$ ($20,39\text{ K}$) flüssig und bei $-259,19\text{ °C}$ ($13,96\text{ K}$) fest wird. Das Gas ist farb-, geruch- und geschmacklos und schlecht löslich in Wasser. Da es sehr leicht ist, weist es eine hohe Auftriebskraft auf und eine hohe Diffusionsgeschwindigkeit, die dazu führt, dass es sich beispielsweise viermal schneller bewegt als der deutlich schwerere Sauerstoff (O_2). Darauf zurückführend weist es auch die höchste Wärmeleitfähigkeit auf. Erst bei einem Druck von mehr als $1.500.000\text{ bar}$ entsteht sogenannter metallischer Wasserstoff, der elektrisch leitend ist. Diese Form des Wasserstoffs wird zum Beispiel im inneren Kern von Riesenplaneten wie dem Jupiter, auf dem enorme Gravitationskräfte wirken, vermutet.

Im Universum ist Wasserstoff das häufigste Element und macht etwa 90 Prozent der Gesamtmasse aus. Bei unserer Sonne sind es etwa 50 % des Gewichts. Elementar kommt er allerdings in der unteren Erdatmosphäre nur in Spuren vor (Volumenanteil: $5 \cdot 10^{-5}\%$). Das sieht anders aus, wenn man den Wasserstoff in gebundener Form betrachtet. So bildet er beispielsweise Verbindungen mit fast allen Elementen des Periodensystems, eine Besonderheit, die sonst kein anderes Element aufweist. Die bekannteste und am häufigsten auf der Erde vorkommende wasserstoffhaltige Verbindung ist Wasser (H_2O). Immerhin 11,2 Gewichtsprozent macht hier der Anteil des Wasserstoffs aus, den man aber erst einmal aus dieser Verbindung freisetzen muss, um ihn dann beispielsweise in der Brennstoffzelle nutzen zu können.

Neben dem am häufigsten vorkommenden Wasserstoff (Häufigkeit: 99,985 %; Symbol: H) gibt es noch zwei weitere Isotope: Deuterium, der schwere Wasserstoff (Häufigkeit: 0,0145 %; Symbol: D) und das radioaktive Tritium, der superschwere Wasserstoff (Häufigkeit: $10^{-15}\%$; Symbol: T; β -Strahler, Halbwertszeit: 12,4 Jahre). Diese beiden Isotope unterscheiden sich dadurch, dass sie durch ein beziehungsweise zwei zusätzliche Neutronen im Atomkern etwa doppelt beziehungsweise dreimal so schwer sind wie der »normale« Wasserstoff. Dies führt zu Massenunterschieden der drei Isotope, die so groß sind wie bei keinem anderen Element.

Diese Besonderheit hat auch zur Folge, dass die Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften der Isotope größer sind als bei jedem anderen Element. So werden D_2 und T_2 beispielsweise erst bei 23,67 K bzw. 25,04 K flüssig. Diese starken Unterschiede gelten nicht nur für die reinen Isotope, sondern auch für entsprechende Verbindungen. So schmilzt beispielsweise schweres bzw. superschweres Eis (D_2O und T_2O) unter Normaldruck erst bei 3,81 °C bzw. 4,48 °C.

Darüber hinaus zeigen diese Isotope sogar leicht unterschiedliche chemische Eigenschaften. Dies ist ein Phänomen, das bei Isotopen anderer Elemente nicht auftritt. So ist H_2 reaktionsfähiger als D_2 und die Reaktionsgeschwindigkeiten von deuterierten Verbindungen sind meist kleiner als die entsprechender wasserstoffhaltiger Verbindungen. Man nennt dieses besondere Merkmal den sogenannten *kinetischen Isotopeneffekt*.

Beschrieben wurde der Wasserstoff erstmals von Robert Boyle (1627–1691) im Jahre 1671, der bei der Reaktion von Schwefelsäure mit Eisenpulver die Bildung eines »leichtbrennbaren Dampfes« beobachtete. Henry Cavendish (1731–1810) war es dann, der ihn 1766 als aus Metallen und Säuren erzeugbare »brennbare Luft« isolieren konnte. Der bekannte französische Chemiker Antoine L. de Lavoisier (1743–1794), der leider im Zenit seines wissenschaftlichen Schaffens stehend von den Jakobinern 1794 hingerichtet wurde, schlug 1783 für Wasserstoff den Namen *Hydrogenium* (*hydor*, *genein* [griech.] = »Wasser«, »erzeugen«) vor.

Betrachtet man die chemischen Eigenschaften des Wasserstoffs, so muss man zunächst sagen, dass er bei Raumtemperatur ziemlich reaktionsträge ist. Dies ist auf die relativ hohe Dissoziationsenergie ($\Delta H = + 436 \text{ kJ/mol}$) zurückzuführen, die aufgebracht werden muss, um das Molekül H_2 in zwei dann sehr reaktive Wasserstoffatome zu spalten. Sogar ein Gemisch aus H_2 und O_2 im Verhältnis 2 : 1 (*Knallgas*) kann über Jahre aufbewahrt werden, ohne dass etwas passiert. Erst eine Aktivierung durch Zufuhr von Wärme oder Strahlungsenergie oder durch Oberflächenreaktionen an Katalysatoren löst die Reaktion



DIE BRENNSTOFFZELLE
HEIZTECHNIK DER ZUKUNFT

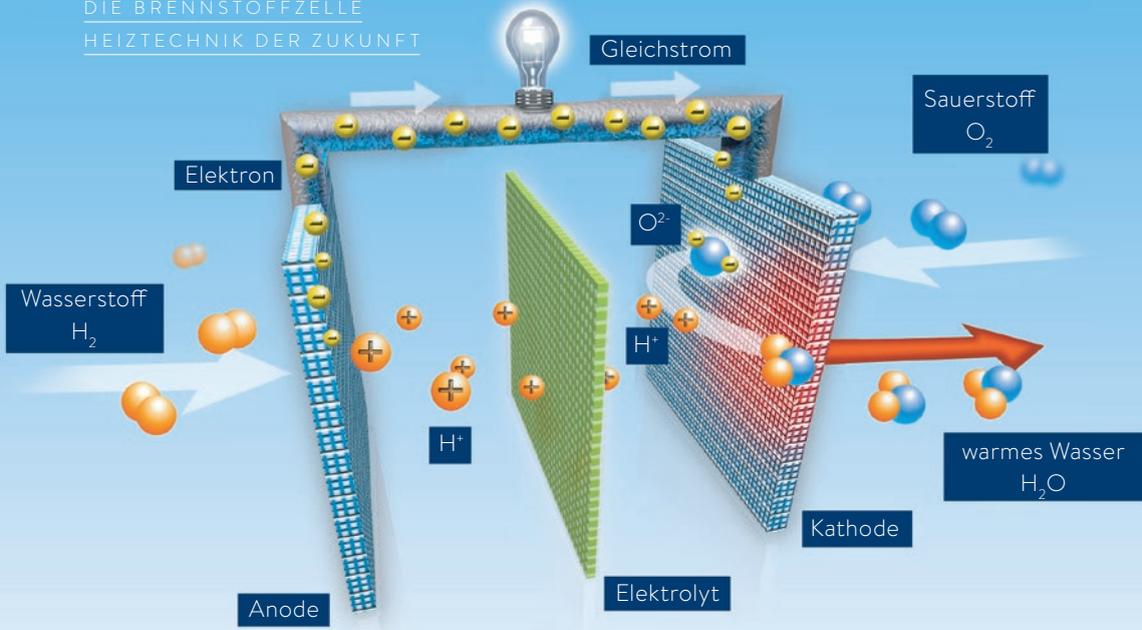


ABB.2 Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer Brennstoffzelle

aus, die dann sehr viel Energie freisetzt ($\Delta H = -572 \text{ kJ/mol}$). Dies ist dann auch die Energiemenge, die man nutzen kann, wenn man Wasserstoff als einen Energiespeicher verwendet. Sie kann durch die explosive Knallgasreaktion, das kontrollierte Verbrennen einer $\text{H}_2\text{-O}_2$ -Mischung oder durch die (elektrochemische) Reaktion in einer Brennstoffzelle (sog. »kalte« Knallgasreaktion) freigesetzt und nutzbar gemacht werden (s. Abb. 2).

Diese Reaktion liefert also Wärme (Verbrennung) oder Strom (Brennstoffzelle) und produziert dabei nur Wasser und keine giftigen Abgase oder Treibhausgase. Vergleicht man die gravimetrische Energiedichte (auf das Gewicht bezogen) von Wasserstoff mit der anderer Energieträger (z. B. Methan, Hauptbestandteil von Erdgas), Benzin oder Methanol, so erkennt man sofort die herausragende Stellung des Wasserstoffs (s. Tab. 1). So ist der Energieinhalt verglichen mit Benzin etwa dreimal so hoch. Vergleicht man die Zündgrenzen in Luft, dann ist der Bereich, in dem Wasserstoff ein zündfähiges Gemisch bildet, deutlich größer als bei anderen Energieträgern. Dieser Punkt sowie die auch sehr geringe Zündenergie erfordern dann im Betrieb besondere Sicherheitsanforderungen, die aber heutzutage technisch erfüll- und umsetzbar sind.

Interessant ist auch die im Vergleich zu Methan etwa sechsmal höhere Verbrennungsgeschwindigkeit von Wasserstoff in Luft. Dies ist ein Punkt, dem bei der Nutzung/Verbrennung von Methan/Wasserstoff-Mischungen (Power-to-Gas) besondere Rechnung getragen werden muss. Dass die technische Nutzung solcher Mischungen nicht unbekannt ist, zeigt zum Beispiel die Verwendung von Stadtgas bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Für die städtische Beleuchtung kamen 1808 in London entsprechende Gaslaternen zum Einsatz. Das hierfür verwendete Stadtgas bestand zu 50 % aus Wasserstoff, zu 30 % aus Methan, zu 9 % aus Kohlenstoffmonoxid, zu 2 % aus Kohlenstoffdioxid, zu 4 bis 5 % aus Stickstoff und zu 4 % aus Kohlenwasserstoffen (z. B. Ethylen).

		Wasserstoff	Methan	Benzin	Methanol
gravim. Energiedichte	MJ/kg	120	50	43	20
	kWh/kg	33	13,9	12	5,5
volum. Energiedichte	MJ/l	9	21	33	16
Dichte (15 °C, 1 bar)	kg/m ³	0,09	0,72	748	791
Zündgrenzen in Luft	Vol.-%	4 – 75	5 – 15	1 – 8	6 – 44
Minimale Zündenergie	mWs	0,02	0,29	0,24	0,14
Verbrennungsgeschwindigkeit in Luft	cm/s	265	43	40	48
Diffusionskoeffizient in Luft	cm ² /s	0,61	0,16	0,05	0,12
spez. CO ₂ -Emission	g/MJ	0	58	74	69

TAB. 1 Stoffdaten von Energieträgern im Vergleich

Quellen: Biedermann et al. (2006), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik

Der gegenüber Benzin dreifach höhere Energieinhalt von Wasserstoff spiegelt sich auch in der jeweiligen Kraftstoffmenge wider, die benötigt wird, um beispielsweise einen Pkw eine bestimmte Strecke zu fahren. So sind für eine Reichweite von 400 km rund 24 kg Benzin, aber nur acht Kilogramm Wasserstoff notwendig, wenn beide in einem Verbrennungsmotor als Energieträger eingesetzt werden. Wird der Wasserstoff – wie zukünft-

Verfahren	Energiequelle
Reaktion wässriger Säuren mit unedlen Metallen z. B. $2 \text{H}_3\text{O}^+ + \text{Zn} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Zn}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	chemische Energie
Dampfreformierung z. B. $2 \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 \rightarrow 4 \text{H}_2 + \text{CO}_2$	chemische Energie
Wasserelektrolyse	elektrische Energie
Thermische Wasserspaltung mit thermochemischen Kreisprozessen	thermische Energie (chemische Energie)
Photolytische Wasserspaltung	Lichtenergie/Photonen

TAB. 2 Verfahren zur Spaltung von Wasser und deren jeweilige Energiequelle

tig geplant – in einer Brennstoffzelle verstromt, dann reduziert sich diese Menge nochmals um etwa 50 % auf vier Kilogramm. Die Ursache hierfür liegt in der höheren Effizienz einer Brennstoffzelle sowie in der direkten Umsetzung von chemischer in elektrische Energie. Im Verbrennungsmotor hingegen kommt es zunächst zur Umwandlung in thermische Energie, die dann ihrerseits noch in mechanische Energie zum Antrieb des Pkw umgesetzt werden muss. Jede Umwandlung ist mit Verlusten verbunden, was am Ende zu einer deutlich höheren Kraftstoffmenge führt, um die gleiche Strecke zurücklegen zu können.

HERSTELLUNG VON WASSERSTOFF

Wie bereits erwähnt liegt molekularer Wasserstoff, der als Energieträger direkt genutzt werden kann, nur in Spuren auf der Erdoberfläche vor. Er muss also für die Nutzung zunächst aus wasserstoffhaltigen Verbindungen gewonnen werden. Hierfür bietet sich das ausreichend vorhandene und leicht verwendbare Wasser an. Um aus Wasser den Wasserstoff freizusetzen, gibt es verschiedene Verfahren, denen aber allen gemein ist, dass Energie aufgebracht werden muss, um H_2O in seine beiden Komponenten zu spalten.



Diese Energie kann in unterschiedlichster Form in die Reaktion eingebracht werden. Im Folgenden sind einige der Verfahren aufgelistet (s. Tab. 2):

REAKTION WÄSSRIGER SÄUREN MIT UNEDLEN METALLEN

Dieses Verfahren ist technisch nicht von Relevanz und eher von wissenschaftshistorischem Interesse, denn auf diesem Wege wurde der Wasserstoff letztendlich entdeckt. Hierbei werden die im Wasser vorliegenden Protonen genutzt, um unedle Metalle (z. B. Zink *Zn* oder Eisen *Fe*) zu oxidieren und dabei selbst zu molekularem Wasserstoff reduziert zu werden.

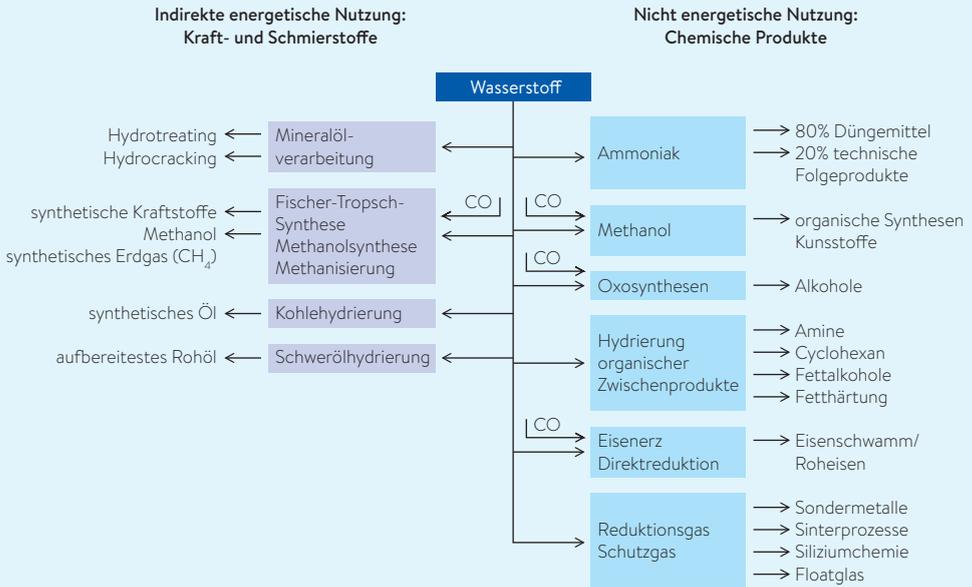
DAMPFREFORMIERUNG

Dieses Verfahren, das auf der direkten Umsetzung von Methan mit Wasser bei erhöhten Temperaturen beruht und in mehreren Teilschritten erfolgt, wird zurzeit noch überwiegend weltweit zur technischen Erzeugung von großen Mengen Wasserstoff angewendet. Da bei den Teilreaktionen aber Kohlenstoffmonoxid (CO) beziehungsweise am Ende Kohlenstoffdioxid (CO₂) gebildet werden, die abgetrennt und gegebenenfalls freigesetzt oder gespeichert werden, ist diese Methode nicht nachhaltig. Die Erzeugung großer Mengen an Wasserstoff, die für eine zukünftige Energieversorgung notwendig wären, wäre somit für die Umwelt problematisch.

WASSERELEKTROLYSE

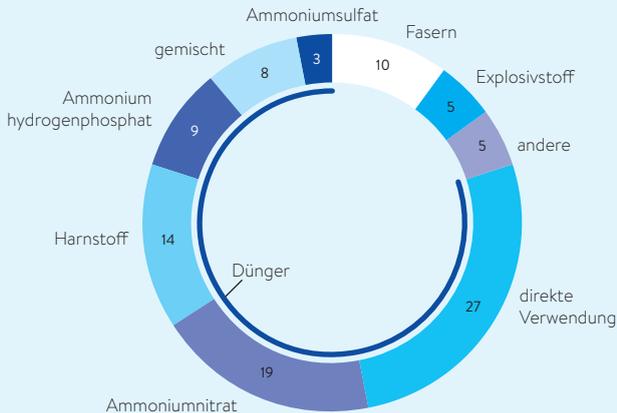
Diese Methode beruht darauf, dass Wasser mit Hilfe von Strom direkt in seine beiden Komponenten Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird. Dieses Verfahren liefert sehr reinen Wasserstoff, da keine verunreinigenden

ABB. 3 WASSERSTOFF IN DER INDUSTRIE UND PETROCHEMIE



Quelle: DLR (2006)

ABB. 4 ANWENDUNGSBEREICHE DER WICHTIGEN INDUSTRIECHEMIKALIE AMMONIAK



Quelle: Atkins, Jones (2006)

Nebenprodukte (z. B. CO oder CO₂) erzeugt werden. Es sind aber große Mengen an Strom notwendig, um auf großer Skala Wasserstoff herstellen zu können. Diese Leistung können nur die regenerativen Energiequellen (z. B. Wind- oder Wasserkraft oder Sonnenenergie) liefern. Zukünftig wird hier die Windkraft für Europa die zentrale Rolle spielen, da sie bezüglich ihrer Leistung skalierbar ist und einen Großteil der erforderlichen Energie zur Verfügung stellen kann. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wird zurzeit in Wissenschaft und Technik sehr intensiv daran gearbeitet, ausreichend große, leistungsfähige, robuste und günstige Elektrolyseanlagen (Elektrolyseure) zu entwickeln.

— THERMISCHE WASSERSPALTUNG

Es ist auch möglich, Wasser bei hohen Temperaturen (> 2000 °C) direkt zu spalten. Diese Möglichkeit ist aber in dieser Form technisch nicht umsetzbar. Eine Absenkung der Temperaturen auf unter 900 °C ist allerdings möglich, wenn der Prozess mit weiteren chemischen Reaktionen (hier: thermochemische Kreisprozesse), die chemische Energie liefern, gekoppelt wird. Es gibt eine Reihe von Ansätzen (z. B. Metalloxid-, Schwefel-Iod- und Schwefelsäurehybrid-Verfahren), die zum Teil schon länger bekannt sind und zurzeit noch erforscht werden. Nichtsdestotrotz werden diese Verfahren auch in näherer Zukunft keine zentrale Rolle bei der Erzeugung von Wasserstoff spielen.

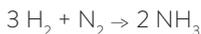
— PHOTOLYTISCHE WASSERSPALTUNG

Hierbei soll Wasser mit Hilfe von Lichtenergie direkt in seine Komponenten zerlegt werden. Dieses Verfahren, das sich zurzeit noch im Forschungsstadium befindet und von dem es einige Varianten gibt, könnte in Zukunft bei erfolgreicher technischer Umsetzung auf großer Skala auch eine wichtige Rolle spielen. Herausforderungen sind hier aber gegenwärtig noch die Kosten, die Langzeitstabilität und die Effizienz der eingesetzten Halbleitermaterialien.

TECHNISCHE NUTZUNG DES WASSERSTOFFS

Wasserstoff, der großtechnisch aktuell im überwiegenden Maße mit Hilfe der Dampfreformierung hergestellt wird, spielt eine wichtige Rolle in der Industrie und Petrochemie. Weltweit werden heutzutage etwa 50 Mio. Tonnen Wasserstoff jährlich erzeugt und in den unterschiedlichsten Prozessen verbraucht. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Verfahren, die Wasserstoff nutzen.

Wenn man von der indirekten energetischen Nutzung von Wasserstoff bei der Verarbeitung von fossilen Energieträgern einmal absieht (deren Anteil soll sich zukünftig weiter verringern), dann wird der Wasserstoff auch in einer Vielzahl von Prozessen in der chemischen und metallverarbeitenden Industrie benötigt. Bezüglich ihrer weltweiten Bedeutung ist aber die Synthese von Ammoniak (NH_3) mit Hilfe des Haber-Bosch-Verfahrens, des wichtigsten großtechnischen Prozesses zur Herstellung einer anorganischen Chemikalie, von zentraler Rolle für die Nutzung von Wasserstoff. Etwa 50 % des gesamten weltweit produzierten Wasserstoffs werden hierfür in folgender Reaktion mit Stickstoff (N_2) verbraucht:



Diese sehr einfach erscheinende Reaktion ermöglicht die Fixierung und letztendlich stoffliche Nutzung des Stickstoffs aus der Luft, der für eine Vielzahl von biochemischen Prozessen in der Tier- und Pflanzenwelt sowie beim Menschen von zentraler Bedeutung ist und unter anderem zur Herstellung von Dünger verwendet wird. In Abbildung 4 sind eine Reihe der Anwendungsbereiche von Ammoniak dargestellt.

SPEICHERUNG VON WASSERSTOFF

Ein Großteil des Wasserstoffs, der in der Industrie benötigt wird, wird in der Regel auch direkt vor Ort erzeugt und dann über Pipelines zu den jeweiligen Verarbeitungsprozessen transportiert. Muss der Wasserstoff über größere Strecken und in kleineren Mengen transportiert werden, dann erfolgt dies

im Allgemeinen in flüssiger Form bei etwa -253 °C (sog. Kryo-Speicherung), da in diesem Zustand die Dichte rund 800-mal höher ist als in Gasform unter Normalbedingungen (25 °C und 1 bar) und somit deutlich mehr gespeichert werden kann. Um sehr große Mengen zu speichern gibt es die Möglichkeit – ähnlich wie bei Erdgas – stationäre Gasspeicher zu verwenden oder, was momentan auch gerade in Norddeutschland sehr intensiv diskutiert und untersucht wird, die Möglichkeit der Speicherung in unterirdischen Kavernen.

Im Zusammenhang mit der Nutzung von brennstoffzellengetriebenen Pkw und Lkw kann man die zurzeit genutzten beziehungsweise sich in der Forschung befindlichen Speichermöglichkeiten in zwei Gruppen unterteilen (s. Abb. 5). Auf der einen Seite sind dies die sogenannten konventionellen oder auch physikalischen Speichertechniken, wie die oben schon erwähnte Kryo- und die Hochdruckspeicherung. Auf der anderen Seite sind das die sich noch im Forschungsstadium befindlichen chemischen Speichertechniken, die darauf beruhen, dass der Wasserstoff in Festkörpern ab- beziehungsweise adsorbiert wird. Hier wiederum kann man zwischen zwei Formen unterscheiden: Die Speicherung in Metallhydriden und die in Hochoberflächenmaterialien.

Letztere zeichnen sich dadurch aus, dass sie Poren im Nanometerbereich ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$) aufweisen und somit eine sehr große innere Oberfläche (bis zu $7.000\text{ m}^2/\text{g}$) besitzen. In den Poren kann der Wasserstoff in molekularer Form gespeichert werden. In all diesen Fällen ist es aber immer von zentraler Bedeutung, dass einerseits so viel wie möglich an Wasserstoff gespeichert werden kann und andererseits diese Speicherung reversibel und der Energieaufwand gering ist.

— KRYO-SPEICHERUNG

Hier erfolgt die Speicherung des Wasserstoffs als Flüssigkeit, was zu der oben schon erwähnten starken Erhöhung der Dichte und damit auch zur Volumenreduktion führt. Was sich so noch sehr vorteilhaft anhört und für den Transport mittelgroßer Mengen in entsprechend dafür ausgerüsteten Tankwagen sinnvoll ist, wird sehr wahrscheinlich für den privaten und kommerziellen Mobilitätsbereich keine Anwendung finden. Die Gründe hierfür

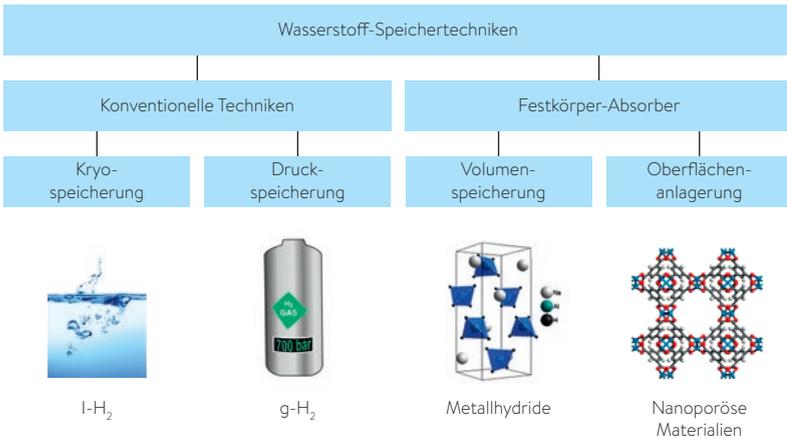


ABB. 5 Schematische Darstellung der verschiedenen Wasserstoffspeichertechniken

Quelle: Daniela Frahm, Universität Hamburg

sind letztendlich die zu hohen Kosten. Um Wasserstoff auf -253 °C zu kühlen, bedarf es einer Reihe an Abkühlungsschritten: Zunächst auf -40 °C mit Hilfe von flüssigem Ammoniak, dann auf -196 °C mit flüssigem Stickstoff und am Ende auf -253 °C durch die Verwendung flüssigen Heliums als Kühlmittel. All diese Schritte kosten Energie, was letztendlich dazu führt, dass etwa 30 % des spezifischen Energieinhaltes des Wasserstoffs, den man ja nutzen möchte, de facto für die Kühlschritte aufgewendet werden muss. Darüber hinaus muss das Tanksystem thermisch sehr gut isoliert sein und auf längere Sicht (bezogen auf die Lebensdauer des Fahrzeuges) auch diesen tiefen Temperaturen standhalten, ohne dass es zu Materialermüdungen und Leckagen kommt. Diese Vielzahl an Kostentreibern hat letztendlich auch dazu geführt, dass die Nutzung von flüssigem Wasserstoff in brennstoffzellenbetriebenen Pkw zurzeit nicht mehr weiterverfolgt wird.

HOCHDRUCKSPEICHERUNG

Um ausreichende Mengen an gasförmigem Wasserstoff in Gasflaschen zu speichern, muss dieser unter hohem Druck verdichtet werden. In ver-

schiedenen Tankformen wird hier der Wasserstoff bei Drücken zwischen 300 und 700 bar gelagert. Speziell die Speicherung bei 700 bar stellt dabei hohe Ansprüche an die verwendeten Druckbehälter, da der Wasserstoff als sehr kleines Molekül mit hoher Beweglichkeit in viele Materialien eindringen und dort zu Versprödungseffekten führen kann. Da die für die Tanks verwendeten Hochleistungsmaterialien und Druckkontrollenheiten aber auf diese besonderen Eigenschaften des Wasserstoffs hin optimiert sind, bestehen heutzutage keine größeren Risiken mehr als die, die man schon von den herkömmlichen mit Benzin betriebenen Fahrzeugen her kennt. Einen gewissen Tribut muss man aber auch für die Verdichtung zollen: So müssen etwa 15 % des spezifischen Energieinhaltes des Wasserstoffs für diesen Prozess aufgewendet werden. Nichtsdestotrotz ist dies die zurzeit für den Einsatz in brennstoffbetriebenen Fahrzeugen favorisierte Speicherform.

METALLHYDRIDE

Bei dieser Speicherform macht man sich die Eigenschaft zunutze, dass der Wasserstoff in ausgewählten Festkörpern mit hoher Dichte im Volumen der Materialien gespeichert werden kann. Man unterscheidet bei dieser Speicherform zwischen den relevanten metallischen beziehungsweise intermetallischen Hydriden und den komplexen Leichtmetallhydriden. Die erste Gruppe zeichnet sich dadurch aus, dass der molekulare Wasserstoff an der Metalloberfläche in seine beiden Atome aufgespalten wird und diese dann im Volumen gespeichert bzw. absorbiert werden. Eine Reihe dieser Hydride zeichnet sich dadurch aus, dass sie reversibel den Wasserstoff aufnehmen und abgeben können und eine hohe volumetrische Speicherdichte aufweisen, da die Metalle eine hohe Dichte und ein geringes Volumen besitzen. Nachteile sind hingegen die in der Regel erhöhten Temperaturen (200 bis 400 °C), die notwendig sind, um den Wasserstoff wieder abzugeben, und die durch das Gewicht der teils schweren Metalle geringe gravimetrische Speicherdichte. Deswegen sind diese Materialien auch für mobile Anwendungen nicht geeignet, wobei sie aber gerne als Wasserstoffspeicher für Brennstoffzellen im maritimen Bereich eingesetzt werden, da hier nur das Volumen und nicht das Gewicht eine große Rolle spielt.

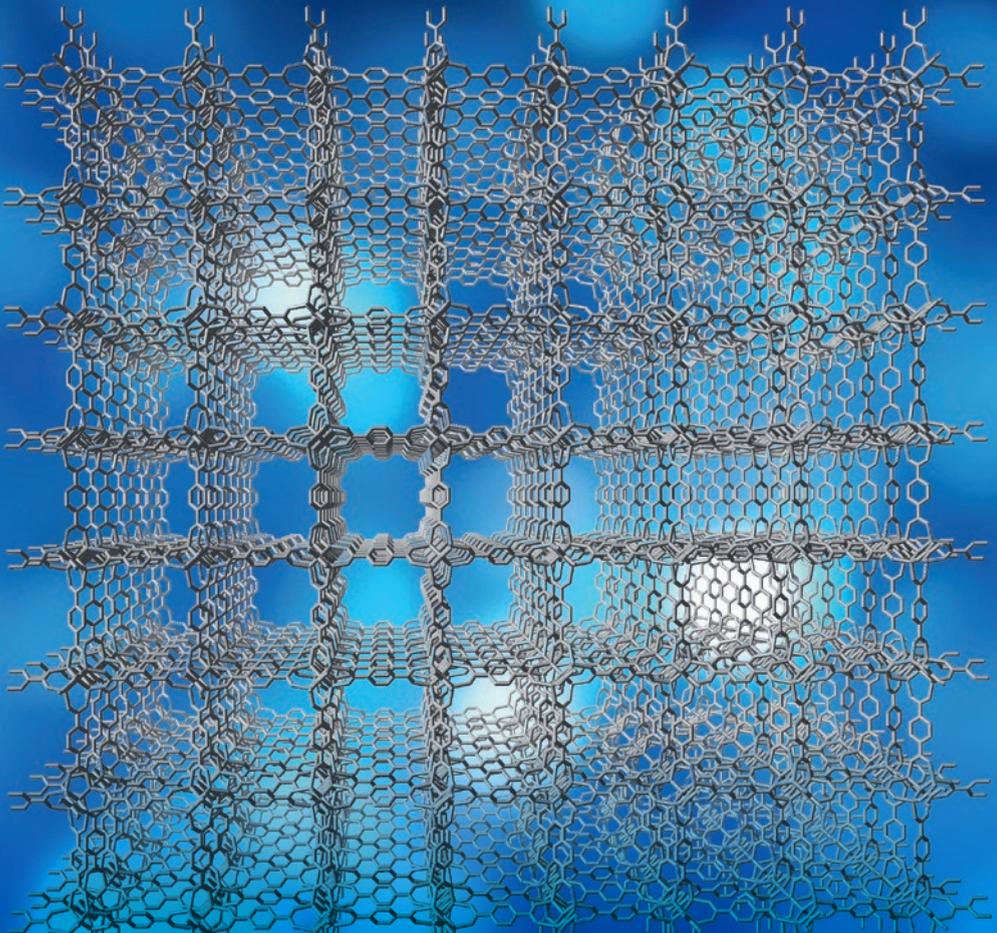


ABB. 6 Schematische Darstellung eines Hochoberflächenmaterials.

Die abgebildeten einheitlichen Poren liegen jeweils im Bereich von 0,5 bis 2 nm.

Quelle: Frank Hoffmann, Universität Hamburg

Komplexe Leichtmetallhydride zeichnen sich dadurch aus, dass sie einerseits leicht sind und bezogen auf ihr Gewicht relativ große Mengen an Wasserstoff in sogenannten komplexen Anionen als Hydrid beinhalten. Der Wasserstoff ist hier in besonderer Weise chemisch gebunden. Deshalb sind häufig spezielle Bedingungen notwendig, um ihn in molekularer Form freizusetzen. Meistens ist dies mit mehreren zum Teil komplizierten Gleichgewichtsreaktionen verbunden, die kontrolliert werden müssen, um die Systeme effizient zu betreiben. Anders als bei den metallischen Verbindungen ist hier die Reversibilität häufiger ein Problem, da es sich um Multikomponentensysteme handelt, in denen der Wasserstoff nur eine Komponente ist. Alle Bestandteile müssen hier in optimaler Weise jeweils hin- und wieder zurückreagieren, um die Abgabe und Aufnahme des Wasserstoffs sicherzustellen. Trotz dieser gewissen Kom-

plexität handelt es sich bei diesen Verbindungen aufgrund ihres hohen Wasserstoffgehaltes um sehr vielversprechende Systeme, die zurzeit intensiv erforscht werden und bei denen es auch schon sehr erfreuliche Teilerfolge gibt.

NANOPORÖSE MATERIALIEN

Bei diesen Hochoberflächenmaterialien handelt es sich um Festkörper, die einheitliche Poren mit Durchmessern jeweils im Bereich von 0,5 bis 2 nm aufweisen und die sich durch die bereits erwähnte hohe innere Oberfläche auszeichnen (s. Abb. 6). Der Wasserstoff wird hier in molekularer Form an der Oberfläche adsorbiert, ohne dass der Festkörper chemisch verändert wird. Nichtsdestotrotz kommt es durch die Wechselwirkungen der Moleküle mit den Oberflächenatomen des Festkörpers zu einer physikalischen Verdichtung und damit zu einer erhöhten Aufnahme des Wasserstoffs innerhalb der Poren. Dieser Effekt gilt natürlich auch für andere Gase. So ist es beispielweise möglich, in einer Druckgasflasche, die mit solch einem Hochoberflächenmaterial gefüllt ist, bei zehn bar und Raumtemperatur dreimal soviel Propan zu speichern wie in einer entsprechend hohlen Flasche gleichen Volumens.

Aufgrund der vergleichsweise geringeren Wechselwirkung des Wasserstoffs mit seiner Umgebung kann dieser durch Druckerhöhung und -reduzierung reversibel aufgenommen und wieder abgegeben werden. Der entscheidende Nachteil ist zurzeit aber noch die Temperatur. Um ausreichend hohe Mengen an Wasserstoff in solchen Systemen zu speichern, sind Temperaturen von -196 °C (der Temperatur von flüssigem Stickstoff) notwendig. Das ist zwar schon deutlich höher als die -253 °C zur Verflüssigung von Wasserstoff, aber für technische Anwendungen zurzeit noch nicht nutzbar. Die weltweit sehr intensiven und umfangreichen Forschungsanstrengungen zielen nun darauf ab, Hochoberflächenmaterialien zu entwickeln, die schon bei Temperaturen zwischen -40 bis -80 °C zufriedenstellend arbeiten.