

Technologie I

Bereitstellung

Produktion

Speicherung

Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse

Rolf A. Brand, GHW Gesellschaft für Hochleistungselektrolyseure zur Wasserstofferzeugung mbH

Die Wasserelektrolyse mit Hilfe von elektrischem Strom ist ein Basisprozess einer nachhaltigen Energiewirtschaft: Die elektrolytische Abspaltung von Wasserstoff aus Wasser kann auch unabhängig von fossilen Energieträgern betrieben werden. Je nach Art der Stromerzeugung kann dieser Weg der Wasserstoffproduktion praktisch emissionsfrei sein.

⇒ Die Wasserstofferzeugung mittels Elektrolyse erfolgt durch die Nutzung elektrischer Energie, um Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen.

Das Verfahren der alkalischen Elektrolyse unter Normaldruck wird bereits seit Jahrzehnten kommerziell eingesetzt und ist dementsprechend bewährt. Dabei wird eine prozessauslösende Gleichstromspannung von etwa 1,5 V an zwei Elektroden angelegt, die sich in einem Ionen leitenden Elektrolyten befinden. An der positiven Elektrode (Anode) entsteht Sauerstoff, an der negativen Kathode bildet sich Wasserstoff. Ein Ionen durchlässiges Diaphragma sorgt für den Ladungsausgleich in der Zelle und hält die Reaktionsgase voneinander getrennt.

Technische Konzepte und Wirkungsgrade

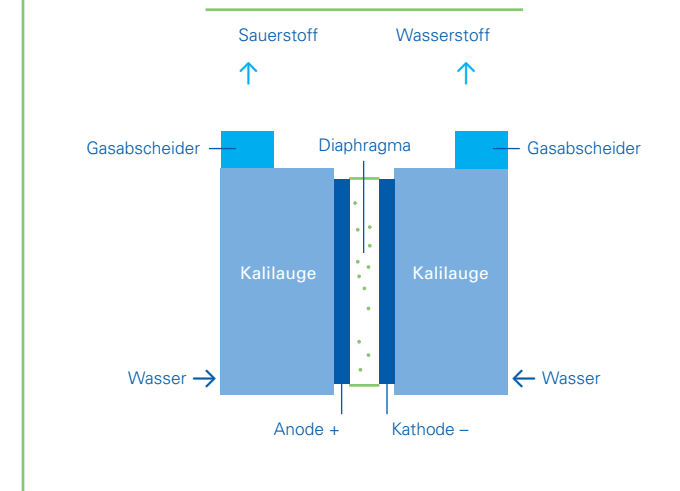
Großtechnisch wird das Prinzip durch Hintereinanderschaltung von vielen Einzelzellen zu einem Zellblock umgesetzt, der durch weitere Systeme

zur Gasabscheidung, Kühlung und Steuerung ergänzt wird. Bei alkalischen Elektrolyseuren sind in der Regel auch Pumpen für die wässrige Elektrolytlösung notwendig.

Ein Großteil der heutigen Elektrolyseanlagen wird bei Atmosphärendruck betrieben. Die Steigerung des Betriebsdruckes hat prinzipiell aber Vorteile, da der bei hohem Druck produzierte Wasserstoff zu Speicherungszwecken weniger stark nachkomprimiert werden muss. Neben der Energieeinsparung bei der Kompression ergibt sich auch eine solche bei höherem Druck in der Elektrolyse, da das Gasvolumen in den Zellen umgekehrt proportional zum Druck sinkt. Für geringere Leistungen existieren neben den alkalischen Systemen auch PEM-Elektrolyseure (Polymer Electrolyte Membrane). Diese nutzen als Elektrolyten statt einer Kalilauge eine Protonen leitende Membran. Als jüngeres technisches Konzept liegen die Wirkungsgrade noch weit unter den theoretisch erzielbaren Werten und auch unterhalb der Effizienz von alkalischen Elektrolyseuren, deren Systemwirkungsgrade bis zu 70 % betragen können. PEM-Systeme finden vor allem bei kleineren Leistungen Verwendung. Ihre Stärke liegt im guten Regelverhalten bei starken Stromschwankungen. Nachteilig sind noch die hohen Kosten für die H⁺-Membran und die Edelmetallelektroden.

Praktizierte Elektrolysetechniken im Überblick

Technologie	Prozess-/Betriebsparameter	Bemerkungen
1. Alkalische Wasserelektrolyse Kalilauge ist Ionenträgermedium	Betriebstemperatur: ca. 80 °C Betriebsdruck: atmosphärisch bis 120 bar, kommerziell bis ca. 30 bar	gebräuchlichstes Verfahren für alle Leistungsklassen < kW bis > MW
2. PEM, Ionen-Austauschmembran Elektrolyse	Betriebstemperatur: ca. 80 °C Betriebsdruck: atmosphärisch bis 120 bar, kommerziell bis ca. 30 bar	für kleinere Leistungen bis ca. 100 kW/Zellblock ca. 20 Nm ³ H ₂ /h



Konzepte für Treibstoffherstellung und Stromspeicherung

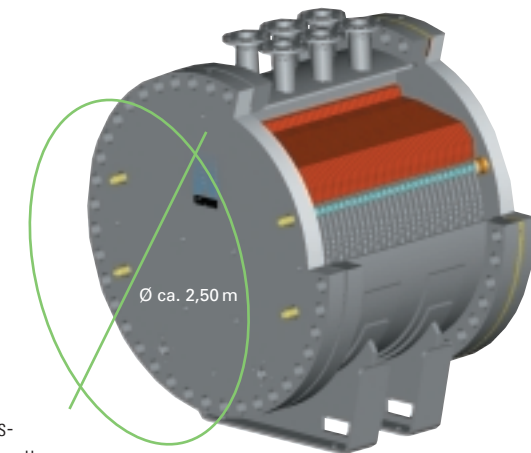
Zurzeit werden etwa 2 % der Weltwasserstoffproduktion durch Elektrolyse erzeugt, davon stammen weniger als 1 % aus der Wasserelektrolyse. Elektrolyseure kommen bisher vor allem dort zum Einsatz, wo Strom sehr günstig produziert werden kann, da etwa zwei Drittel der Betriebskosten durch die Stromkosten bestimmt werden.

Als Massenprodukt sollte Energiewasserstoff für Treibstoff- und Stromspeicheranwendungen jedoch zu marktgerechten Preisen und in großen Mengen möglichst emissionsfrei herstellbar sein. Soll die Erzeugung des Wasserstoffs auch dezentral am Ort des Bedarfes, zum Beispiel an einer Tankstelle, erfolgen, ergeben sich damit zusätzliche Anforderungen an Elektrolyseure.

Wichtige Parameter sind dabei die schnelle Regelbarkeit, eine kompakte Bauweise – selbst bei hohen Leistungen – sowie eine hohe Lebensdauer und Betriebssicherheit bei geringen Investitionskosten.

Ein technischer Lösungsansatz für eine günstige Massenproduktion von Energiewasserstoff ist die regelbare alkalische Druckelektrolyse. Mit einem hohen Betriebsdruck von bis zu 3 MPa ist das System schnell regelbar und kann so auf unterschiedliche Spannungen flexibel eingestellt werden. Die Arbeitsbereiche decken im Optimum eine Spanne von 10 bis zirka 150 % der Nennlast ab. Das System eignet sich aus diesem Grund für den Einsatz als stabilisierendes Element bei der Einspeisung von stark schwankenden Strommengen in das Stromnetz. Diese kommen speziell bei Strom aus regenerativer Erzeugung vor. Der Elektrolyseur nutzt u.a. die im Stromnetz vorhandenen Spannungsspitzen und erzeugt dabei Wasserstoff. Der erforderliche Regelaufwand in den Kraftwerken kann auf diese Weise gering gehalten werden. Der gleichzeitig erzeugte Wasserstoff steht als Fahrzeugtreibstoff oder als Energiespeicher zur Verfügung.

Weitere Potenziale für Effizienzsteigerung und Kostenminderung eröffnen sich durch den Verzicht auf Elektrolytpumpen und die Integration aller drucktragenden Funktionseinheiten in einen gemeinsamen Druckkessel. Dieses Lösungskonzept verfolgt zurzeit die GHW Gesellschaft für Hochleis-



2,5-MW-PME-Elektrolyseur

tungselektrolyseure zur Wasserstofferzeugung, ein Unternehmen von MTU Friedrichshafen GmbH, Norsk Hydro ASA und Vattenfall Europe AG. Das so genannte Pressure Module Elektrolyseurkonzept (PME) wird nur ein Drittel bis ein Viertel des Raumbedarfs einer leistungsgleichen, unter atmosphärischem Druck betriebenen Anlage und einen wesentlich geringeren Energieverbrauch haben. Als Preisziel werden für die Erstellung von Systemen der MW-Größenordnung etwa 400 €/kW angepeilt. Damit läge dieser Anlagentyp im Bereich der preisgünstigsten konventionellen atmosphärischen Anlagen.

Wasserstoff aus fossilen Energieträgern

Joachim Wolf, Linde AG

Der weitaus größte Teil der weltweiten Wasserstoffproduktion von rund 500 Mrd. m³ stammt aus fossilen Quellen wie Erdöl, Erdgas und Kohle. Rund 40 % der weltweiten Produktion entstehen bei chemischen Prozessen oder in Raffinerien, wo Wasserstoff als Nebenprodukt zum Beispiel bei der Rohölsynthese anfällt.

⇒ Die üblichen Verfahren der Wasserstoffproduktion aus fossilen Rohstoffen sind die Dampfreformierung aus Erdgas und die partielle Oxidation von schweren Kohlenwasserstoffen.

Die Dampfreformierung ist mit Wirkungsgraden von 70–80 % eine der effektivsten Methoden. Im ersten Schritt werden in einem katalytischen Prozess bei zirka 950 °C und einem Druck von zirka 2,5 MPa leichte Kohlenwasserstoffe, wie zum Beispiel Erdgas, unter Einwirkung von Wasserdampf zunächst in ein wasserstoffreiches Gasgemisch mit einem relativ hohen Anteil an Kohlenmonoxid überführt. Dieses geschieht endotherm, also unter Wärmezufuhr. In einer weiteren katalytischen Re-

aktion (Shiftreaktion) wird in einem Wärme freisetzenden, exothermen Prozess das Kohlenmonoxid mit Wasser in Kohlendioxid umgewandelt, wobei aus dem Wasser weiterer Wasserstoff gewonnen wird.

Große Dampfreformierungsanlagen weisen Produktionskapazitäten von bis zu 100.000 m³ H₂/h pro Einheit auf. Aber im Kontext der Brennstoffzellentechnologie wächst auch das Interesse an kleineren Produktions-Einheiten.

Unter Energiefreisetzung – Partielle Oxidation

Bei der partiellen Oxidation wird dem Prozess Sauerstoff bzw. Luft zugeführt. Bei der Reaktion mit dem Rohstoff wird Energie frei, die für den Gesamtprozess genutzt wird. Auch hier wird in einer nachgeschalteten Shiftreaktion Kohlenmonoxid in CO₂ konvertiert. Bei der partiellen Oxidation können auch weniger reine, flüssige oder feste Kohlenwasserstoffe eingesetzt werden.

Der Plasmabogen-Prozess

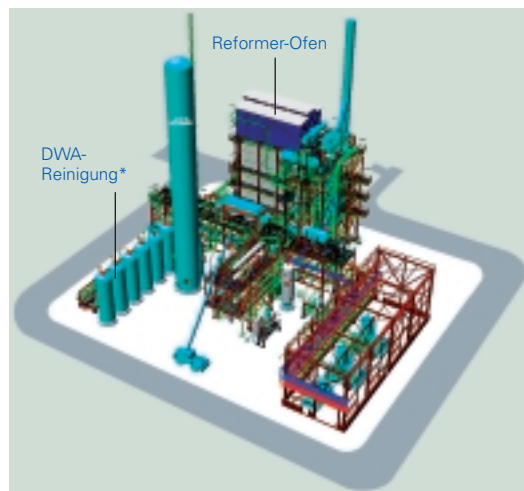
Gasförmige Kohlenwasserstoffe wie Erdgas können auch mittels Elektrizität in Wasserstoff und hochreinen Kohlenstoff umgewandelt werden. Dieser Prozess läuft bei Temperaturen über 1.500 °C und praktisch emissionsfrei ab.



Steam-Reformeranlage, Leuna / Deutschland; Quelle: Linde AG

Steam-Reformeranlage
(CAD-Grafik); Quelle: Linde AG

* Druck-Wechsel-Adsorptions-
Reinigung



Wasserstoffgewinnung mit schweren Kohlenwasserstoffen

Ulrich Wagner

Schwere Kohlenwasserstoffe lassen sich mittels Dampfreformierung katalytisch nicht mehr spalten. Der Grund ist die oberhalb 800 °C einsetzende Abscheidung von festem Kohlenstoff, der Katalysator und Gasfluss in kurzer Zeit blockiert. Die Umsetzung zu Wasserstoff erfolgt daher in diesen Fällen durch partielle Oxidation. Im Gegensatz zur Dampfreformierung stellt dieses Verfahren keine besonderen Anforderungen an die Qualität der Rohstoffe. Damit können auch Rückstandsöle oder schwere Heizöle zur Wasserstoffgewinnung eingesetzt werden. Der Prozess erfolgt ohne Einsatz eines Katalysators bei Temperaturen zwischen 1.300 und 1.500 °C sowie einem Druck von 30 bis 100 bar.

In der Praxis ist die partielle Oxidation von Schweröl in zwei großtechnischen Verfahren – Texaco und Shell – realisiert worden.

Kohle ist nach wie vor eine wichtige Säule unserer heutigen Energieversorgung. Die Reichweite der weltweiten Kohlevorkommen übertrifft bei weitem die von Erdöl. Auch aus Kohle kann Wasserstoff gewonnen werden. Bei der Kohlevergasung erfolgt eine thermische Zersetzung des Brennstoffes in ein brennbares Gas. Dabei werden Luft, Sauerstoff, Wasserstoff, Wasserdampf oder ein Gemisch dieser Medien zugeführt. Für die Umsetzung der Vergasung sind sehr hohe Temperaturen erforderlich, die entweder durch Wärmezufuhr von außen erreicht werden – man spricht dann von allothermer Vergasung – oder der Prozess sorgt selbst durch die Verbrennung eines Teils des Brennstoffs für die nötige Temperatur (autotherme Vergasung).

Welche Rolle spielen Katalysatoren?

Norbert Modl, Süd-Chemie AG

Ein großer Teil der heutigen industriellen Wasserstoffproduktion wird erst durch Katalysatoren ermöglicht. Am Beispiel der Erdgasreformierung soll die Bedeutung von Katalysatoren für die Bereitstellung von hochreinem Wasserstoff erläutert werden:

Erdgas enthält zu über 90 Volumenprozent (vol %) Methan (CH_4), jedoch auch Verunreinigungen in Form von organischem Schwefel. Der Schwefel wirkt für Katalysatoren als Gift und muss deshalb entfernt werden. Im nächsten Schritt wird das gereinigte Erdgas auf Temperaturen bis zu 800 °C aufgeheizt und Wasserdampf zugeführt. Über einem Reformierkatalysator erfolgt die Zersetzung des Erdgases zu H_2 , CO , CO_2 und Restmethan. CO ist zum Beispiel für bestimmte Brennstoffzellentypen schädlich. Daher wird der CO -Gehalt über verschiedene Katalysatoren von 10–14 vol % bis unter 50 CO -Moleküle von 1 Mio. Teilchen verringert.

In der traditionellen H_2 -Produktion werden meist Nichteledmetalle wie Nickel oder Kupfer-Zink verwendet. Sie stehen ausreichend zur Verfügung. In der Brennstoffaufbereitung für Brennstoffzellen werden auch Edelmetallkatalysatoren eingesetzt. Das Edelmetall kann nach dem Einsatz zurück gewonnen werden und steht wieder zur Verfügung.

Wasserstoff aus Biomasse

Heinz-Jürgen Mühlen

Aufgrund des Interesses an regenerativen Energieträgern und ihrer ausgeglichenen CO_2 -Bilanz gerät auch Biomasse in den Fokus energie-wirtschaftlicher Betrachtungen. Ein möglicher Verwertungsweg ist die Umwandlung in verschiedene Bio- und Synthesegase, zu denen auch Wasserstoff zählt. Sogar die biochemische Wasserstofferzeugung durch Grünalgen wird zurzeit erforscht.



Der „Blaue Turm“:
Versuchsanlage zur
Gestuften Reformie-
rung biogener Rest-
stoffe

➔ Biomasse ist in den unterschiedlichsten Formen und Zusammensetzungen als Energieträger nutzbar. Durch Biomasse ließen sich in Deutschland nach Schätzungen 5 bis 10 % des derzeitigen Primärenergiebedarfs zur Verfügung stellen, momentan sind es noch weniger als 1 %.

Neben der Umwandlung in Wärme durch direkte Verbrennung oder Verflüssigung zu Brennstoffen können durch Vergärung oder Vergasung von Biomasse auch Methan oder Wasserstoff erzeugt werden. Die vergleichsweise geringe Energiedich-

te der Biomasse beschränkt zwar aus Effizienzgründen die Länge der Rohstoff-Transportwege, der Vorteil von Biomasse besteht allerdings in der guten Steuerbarkeit der Energiebereitstellung im Vergleich zu den natürlich bedingten Schwankungen in solartechnischen Anlagen, Wind- oder Wasserkraftwerken. Wasserstoff ist dabei auch direkt, also ohne die Zwischenstufen Stromerzeugung und Elektrolyse, herstellbar.

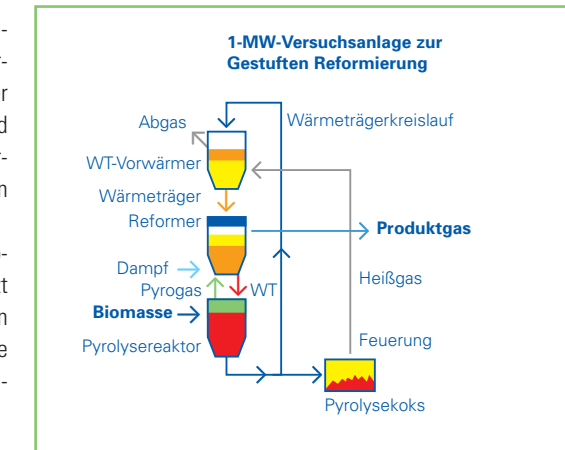
Wasserstoff aus Biomasse – Entwicklungsprojekte

Zur Erzeugung von Gas aus Biomasse werden verschiedene Verfahren angewendet. Gängige Anlagen verwenden Luft als Vergasungsmittel und erzeugen Rohgase mit vergleichsweise niedriger Energiedichte. Zur Erzeugung wasserstoff- und energiereicheren Gases kommen statt Luft Sauerstoff oder auch Wasserdampf unter Zuführung von Wärmeenergie zum Einsatz.

Ein Weg, mit dem in Zukunft insbesondere Abfallbiomasse zur Wasserstoffproduktion genutzt werden könnte, ist das Verfahren der Gestufteten Reformierung. Unter Luftabschluss werden die festen oder flüssigen Ausgangsstoffe bei Tempera-

turen von über 500 °C in einem so genannten Pyrolysereaktor in kohlenwasserstoffhaltiges Gas umgewandelt. Als Reststoff fällt dabei Koks an, dessen Verbrennung die Wärme für den Gesamtprozess liefert: In einem nachgeschalteten Reformer wird bei bis zu 950 °C und unter Wasserdampfzufuhr ein Produktgas erzeugt, das zu weit mehr als 50 % aus Wasserstoff bestehen kann. Die Besonderheit des Verfahrens besteht darin, dass hier die Wasserdampfvergasung unter Atmosphärendruck durchgeführt wird und dass mittels eines Wärmeträgermaterials die Prozesswärme besonders einfach in den Prozess eingebracht werden kann.

Für eine wirtschaftliche Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse sind zum einen die in der Erprobung befindlichen Verfahren zur Marktreife zu führen, zum anderen das generelle Problem kleiner, dezentraler Anlagen zu lösen, dass aus einem nicht immer homogenen Inputstrom, wie dies Biomasse eben ist, ein gleichmäßig fließender Output, nämlich ein hochgradig wasserstoffhaltiges Produktgas, erzeugt werden soll. Hierfür bietet die Gestufte Reformierung gute Voraussetzungen, da sie durch ihre drei Wanderbettreaktoren relativ träge ist und große interne Puffer bietet. Gleichzeitig wird damit auch der Einsatz sehr unterschiedlicher Biomassen möglich.



Wasserkraft zur Wasserstoff- erzeugung

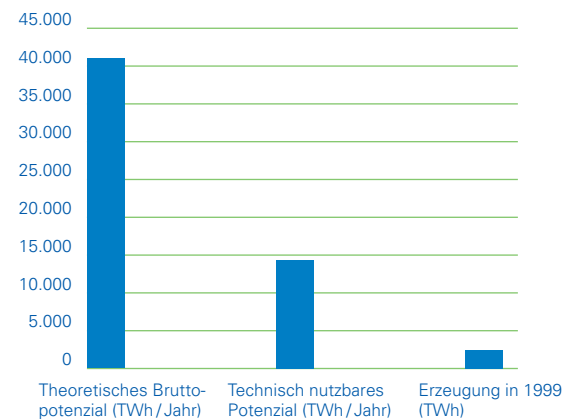
Serge Roy, Hydro-Québec

Wasserkraft ist mit Abstand die meistgenutzte Quelle erneuerbarer Energie – auf sie entfallen 92 % der Energieversorgung aus erneuerbaren Energien weltweit. Im Jahr 2000 wurden mit einer installierten Erzeugungsleistung von 740 GW mit Wasserkraft 2.705 TWh Elektrizität erzeugt (17% der Weltenergieversorgung). Kanada ist mit 358 TWh in 2000 mit einer Wasserkraftleistung von 67 GW der größte Hydroenergieerzeuger der Welt. Auf Québec, in erster Linie auf Hydro-Québec, entfielen davon 165 TWh und somit mehr als 6 % der Weltgesamterzeugung, mit einer verfügbaren Hydroenergieleistung von 38 GW.

Hydroenergie-Erzeugungsländer	TWh (2000)	% der Weltgesamterzeugung	Installierte Leistung in GW (1999)
Kanada	358	13,2	67
Québec	165	6,1	38
Brasilien	305	11,3	59
Vereinigte Staaten	275	10,2	99
VR China	222	8,2	53
Russland	165	6,1	44
Norwegen	142	5,2	28
Japan	97	3,6	45
Übrige Welt	1.141	42,2	345
Welt	2.705	100,0	740

Quelle: United Nations, IEA

Wasserkraft – theoretisches / technisch nutzbares Weltbruttopotenzial und Erzeugung in 1999 (Anlagen aller Art)



Wasserkraftpotenzial

Nach Angaben der Mitgliedsausschüsse des Weltenergieerats (WEC), ergänzt durch Daten der Fachzeitschrift „The International Journal on Hydropower & Dams“, beträgt das gesamte technisch nutzbare Wasserkraftpotenzial der Welt etwa

14.400 TWh/Jahr. Davon gelten derzeit etwa 8.000 TWh/Jahr als wirtschaftlich entwicklungs-fähig. Die installierte Wasserkraftleistung liegt derzeit bei 740 GW.

Das noch verbleibende wirtschaftlich nutzbare Potenzial beträgt etwa 5.400 TWh/Jahr: Geht man von derselben durchschnittlichen jährlichen Nut-

zung wie für die Gesamtheit der bestehenden Wasserkraftwerke aus, würde die Nutzung dieses Potenzials die Errichtung von etwa 1.400 GW Hydroleistung erfordern (d. h. das Zweifache der derzeit installierten Leistung).



Das Kraftwerk La Grande-3



Robert-Bourassa-Komplex

Der Kraftwerkskomplex La Grande

Die sechs größten Wasserkraftanlagen liefern nahezu 8 % der gesamten Wasserkraftleistung weltweit. Der größte Komplex ist das von Hydro-Québec errichtete Kraftwerk La Grande in Québec.

Wasserkraftanlagen Leistung (GW)

La Grande (Québec, Kanada)	15,2
Itaipu (Brasilien-Paraguay)	12,6
Guri (Venezuela)	10,3
Grande Coulee (USA)	6,5
Sajano-Schuschensk (Russland)	6,4
Krasnojarsk (Russland)	6,0

Quellen 1999: Ministère des Ressources naturelles du Québec, International Water and Dam Construction

Der La Grande-Komplex – er erzeugt nahezu 50 % der installierten Leistung von Hydro-Québec – umfasst acht Wasserkraftwerke in der Region James Bay in Nord-Québec, einer Fläche annähernd so groß wie Deutschland. Die Jahresleistung beträgt 80,7 TWh.

Umwelt und Gesellschaft

Aufgrund des relativ hohen Anteils an erneuerbaren Energien war bei jeder von Hydro-Québec im Jahr 2000 erzeugten Terawattstunde der CO₂-Ausstoß um das 40,1-fache, der SO₂-Ausstoß um das 31,5-fache und der NO_x-Ausstoß um das 28,7-fache geringer als im regionalen Mittel der benachbarten Versorgungsunternehmen in den sechs Neuengland-Staaten, dem Staat New York, Ontario und New Brunswick.

Von 1990 bis 2000 wurden durch den Import von Wasserkraftstrom aus Québec in die Vereinigten Staaten etwa 116 Mio. t CO₂-Emissionen vermieden, d. h. Luftverschmutzung, die bei der Erzeugung dieser Elektrizität durch Wärmekraftwerke verursacht worden wäre. Dies entspricht den jährlichen Emissionen von etwa 35 Mio. Kraftfahrzeugen.

Nutzung von Wasserkraft zur Erzeugung sauberen Wasserstoffs

Würde das gesamte Wasserkraftpotenzial von Québec (200 TWh / Jahr) für die Wasserelektrolyse genutzt, könnten jedes Jahr 4 Mio. t Wasserstoff in nachhaltiger Weise produziert werden – genug, um auf unbegrenzte Zeit mehr als 22 Mio. Fahrzeuge mit Treibstoff zu versorgen.

Doch der Großteil dieser Wasserkraft sowie weitere erneuerbare Energiequellen befinden sich weit entfernt von städtischen Zentren. Der Trans-

port des sauberen, nachhaltigen Wasserstoffs vom Erzeugungsort zum Einsatzort über hunderte oder tausende von Kilometern wird zum Schlüsselproblem. Die Verflüssigung von Wasserstoff ist derzeit der bevorzugte Weg für den Langstreckentransport, doch flüssiger Wasserstoff muss auf einer Temperatur von –253 °C gehalten werden. Das Euro-Québec-Hydro-Wasserstoffprojekt hat sich mit dieser Frage in den frühen 90er Jahren beschäftigt und das Konzept des Flüssigwasserstoffbehälters entwickelt. Diese patentierte Technologie macht Langstreckentransport und Lagerung am Verwendungsort sehr attraktiv. Hydro-Québec ist gemeinsam mit Econoden und der Regierung von Québec Patentinhaberin dieser Technologie.

Für Hydro-Québec ist die vermehrte Nutzung erneuerbarer Energie zur Wasserstoffherzeugung ein Schlüsselement: insbesondere die verstärkte Nutzung der Wasserkraft – nach wie vor die meistgenutzte regenerative Energiequelle. Zur Erzeugung der Elektrizitätsmengen, die die moderne Gesellschaft verlangt, bietet Wasserkraft eine hervorragende Lösung, wo immer sie praktisch durchführbar ist. Auf lange Sicht bietet die Kombination von Energieerzeugung aus Wasserstoff und Wasserkraft bei der anhaltenden Suche nach Lösungen für die Luftverschmutzung ausgezeichnete Möglichkeiten.

Solare Wasserstofferzeugung

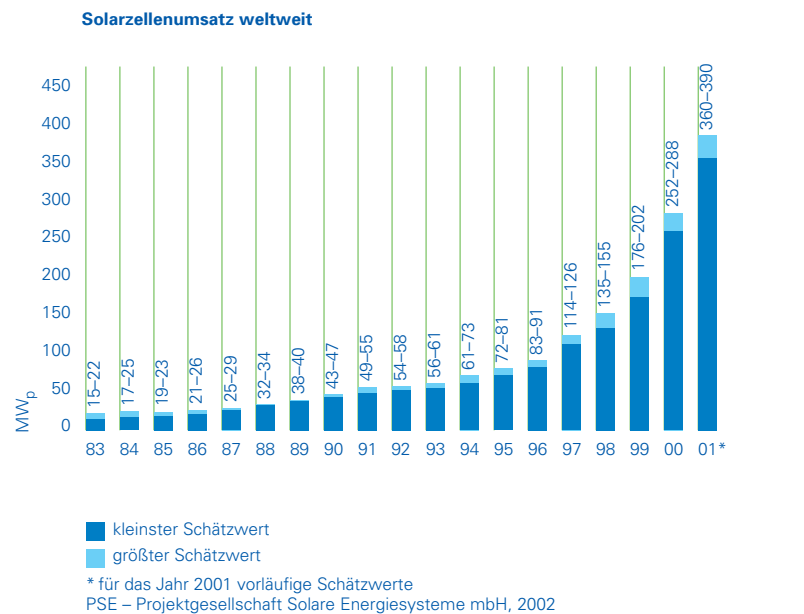
Ulf Groos, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Mit Hilfe von chemischen Anlagen können durch Reformierungsprozesse Kohlenwasserstoffe bei vergleichsweise geringen Kosten zur Wasserstofferzeugung genutzt werden. Ein anderes Verfahren, die Elektrolyse, nutzt elektrischen Strom, um das Wassermolekül zu zerlegen und Wasserstoff und Sauerstoff zu gewinnen. Im Sinne einer nachhaltigen Energiewirtschaft sollte der Elektrolysestrom aus regenerativen Energiequellen zur Verfügung gestellt werden. Neben Wasser-, Wind- und geothermischen Kraftwerken werden seit langem auch Solarkraftwerke diskutiert und für die Erzeugung des Elektrolysestroms erprobt.

⇒ Prinzipiell unterscheidet man zwei Verfahren zur Stromgewinnung aus Sonnenenergie: Photovoltaische Anlagen erzeugen elektrischen Strom direkt aus der Sonnenenergie, während solarthermische Kraftwerke die durch Strahlung erzeugte Wärme indirekt zur Stromgenerierung nutzen.

Effektiv bei kleinen Einheiten

Die Photovoltaik (PV) nutzt den photovoltaischen Effekt in Halbleitermaterialien, um bei Sonneneinstrahlung eine elektrische Spannung zu generieren. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist die Photovoltaik häufig für Leistungen unterhalb von 1 MW, insbesondere bei netzfernen Anwendungen oder für energieautarke (Klein-)Systeme interessant. Der Wirkungsgrad von kommerziellen Solarmodulen liegt, bedingt durch das Funktionsprinzip und die Materialeigenschaften, bei bis zu 15%. Der einfache Systemaufbau, die Wartungsarmut, heute übliche Garanziezeiten von 20 Jahren und die Vorteile in kleinen Leistungsbereichen bewirken einen stetig steigenden Bedarf an Solarzellen und photovoltaischen Systemen.



50 m Prototyp des EuroTrough Parabolrinnenkollektors, einer gemeinsamen Entwicklung eines deutsch-spanischen Industriekonsortiums mit dem DLR, Quelle: ForschungsVerbund Sonnenenergie (FVS)



Kombination mit fossiler Verbrennung

In solarthermischen Kraftwerken wird direktes Sonnenlicht auf einen Absorber gelenkt und dadurch Wärme auf einem hohen Temperaturniveau erzeugt. Diese Wärme kann anschließend zum Antrieb konventioneller Kraftmaschinen, wie Dampfturbinen oder Stirlingmotoren, eingesetzt werden. Solarthermische Kraftwerke sind eng mit der klassischen Kraftwerkstechnik verwandt. Deshalb ist auch eine Kombination von fossiler Feuerung mit solarthermischer Wärmeerzeugung in Hybridkraftwerken denkbar. Diese Kombination ergäbe eine bedeutend bessere Auslastung und wesentlich niedrigere Kosten. Folgende drei Verfahren wurden bislang erprobt:

Mit Hilfe parabolischer Reflektoren (Parabolrinnen) wird die Sonnenstrahlung konzentriert und überhitzter Wasserdampf erzeugt. Damit wird eine klassische Dampfturbine zur Stromerzeugung angetrieben. Die Systeme werden typischerweise auf eine Leistung von 30–80 MW ausgelegt. Eine interessante Zukunftsvariante liegt im so genannten Fresnel-Kollektor: Die zur Konzentration von Sonnenlicht erforderliche Parabelform wird hier aus vielen kleinen, planen Glasspiegeln gebildet.

Bei Solarturmkraftwerken fokussiert ein Feld beweglicher Spiegel das Sonnenlicht auf einen

Jährliche regenerative Energieerzeugung weltweit

Angaben in Mio. kWh/a	heutige Produktion	theoretisches Potenzial	technisches Potenzial
Solarenergie	0,028	1.083.420	größer als 437,5
Der globale Primärenergiebedarf betrug 1998 111,7 Mio. kWh			

Quelle: UNDP, World Energy Assessment 2000

PV-Module auf der Zentralbibliothek der Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ)



Empfänger, der auf einem Turm montiert ist. Das Konzept ermöglicht sehr hohe Temperaturen von bis zu 1.000 °C. Mittlerweile sind Anlagenleistungen von 200 MW in Planung. Die Bereitstellung hoher Lufttemperaturen ermöglicht es, Sonnenenergie direkt in eine Gasturbine bzw. in ein modernes Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk einzukoppeln.

Paraboloidkraftwerke setzen konkave Parabolspiegel ein, in deren Brennpunkt ein Medium hoch erhitzt werden kann. Die Anlagen haben in der Regel Leistungen von mehreren 10 kW und bieten sich daher auch für dezentrale Anwendungen an. Die Energie wird dabei direkt in Wärmekraftmaschinen (insbesondere Stirling-Motoren) in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt.

Prognose

Langfristig erscheinen die Konzepte der Parabolrinnen oder der Solartürme viel versprechender als die kleineren Paraboloidkraftwerke. Letztere haben gegenüber Photovoltaik-Anlagen, mit denen sie bei kleineren Einheiten konkurrieren, den Nachteil einer verschleißbehafteten Mechanik. Im Bereich großer Kraftwerke stellen Parabolrinnen und Solartürme mit Abstand die kostengünstigste Möglichkeit zur Nutzung der Sonnenenergie dar. Es ist zu erwarten, dass beide Technologien je nach Rahmenbedingungen (Kraftwerksgröße, Infrastruktur, Einstrahlungsbedingungen, etc.) Einsatz finden werden.

Wasserstoffherzeugung aus Windenergie

Wolfgang Schönharting, Solantis Energy AG / Stefan Nettesheim, Staxon GmbH

Zahlreiche Standorte überall auf der Welt verfügen über bedeutende regenerative Energieressourcen (z. B. Wind- und Sonnenenergie), die jedoch aufgrund fehlender Infrastruktur für die Elektrizitätsübertragung und -verteilung bisher nicht genutzt werden können. Dieses Problem stellt sich in den Entwicklungsländern in weitaus gravierenderer Form: Sie sind von Ölimporten abhängig, um Stromgeneratoren und Wasserversorgungssysteme betreiben zu können. Die weltweite Errichtung von Anlagen zur Nutzung regenerativer Energiequellen kann eine nachhaltige Wasser-, Wärme- und Elektrizitätsversorgung sichern.



Abb. 1:
Die spanische Testanlage im Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) in Santa Lucía Las Palmas de Gran Canaria. Im großtechnischen Maßstab wird eine solche Anlage am Hauptkraftwerksstandort der Endesa/Unelco auf den Kanaren betrieben werden.

→ Die Deckung des Energiebedarfs in abgelegenen Gebieten (über 32 GW im Jahr 2000) ist eines der wichtigsten Ziele weltweit. Wind bleibt die am schnellsten wachsende Energiequelle der Welt.

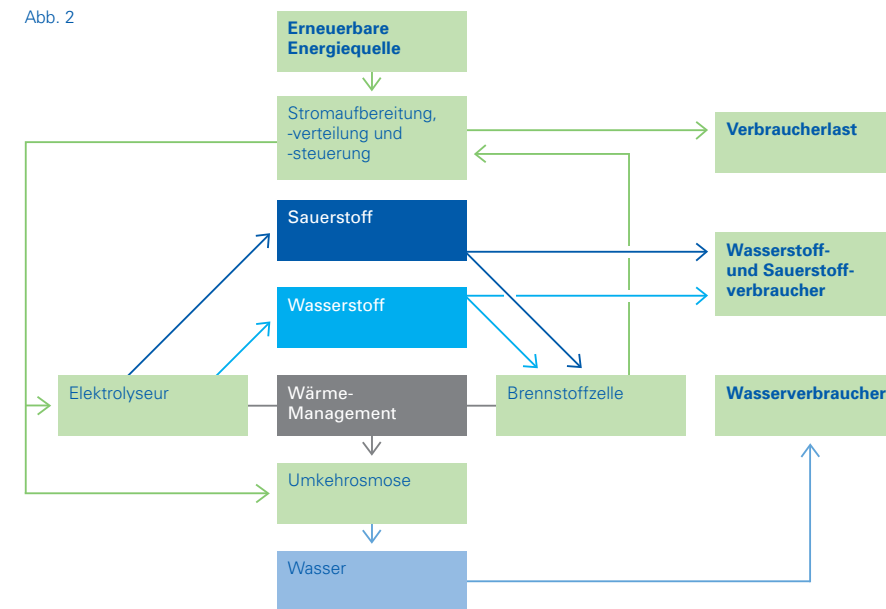
Die Entwicklung sowohl bei der Errichtung neuer als auch bei der kumulierten Windkraftleistung gleicht annähernd einer Exponentialkurve. Dies ist zum Teil auf die Installation viel größerer Turbinen, aber auch darauf zurückzuführen, dass Windkraft zu einer wahrhaft globalen Unternehmung geworden ist. Windkraftanlagen mit einer installierten Leistung von 20 GW sind weltweit bereits errichtet; davon wurden etwa 5.000 MW erst im vergangenen Jahr installiert. Europa hat in Bezug auf die installierte Leistung und die Technologie die Nase vorn. Auf Deutschland, Spanien und die USA entfallen drei Viertel aller Neuanlagen. Seit der Einführung von Turbinen im Megawatt-Leistungsbereich vor vier Jahren ist die durchschnittliche Turbinengröße ständig gewachsen: heute sind Turbinen mit einer Leistung von bis zu 3,6 MW lieferbar.

Die Charakteristik des Windstroms

Neben allen damit verbundenen Chancen sind die inhärenten Merkmale von Elektrizität aus Windkraft, wie standortspezifische Ressource, saisonale Verfügbarkeit, diskontinuierliche Leistung und Niedrigleistungsfaktor, eine Herausforderung für die Integration. Für an schwache, isolierte Netze angeschlossene Windkraftanlagen kann es schwierig werden, die Stromqualität zu halten und zuverlässige Versorgungszusagen abzugeben.

Kurzzeitige Schwankungen in der Energieleistung lassen sich nicht genau vorhersagen. Die Versorgungsunternehmen stützen sich daher auf ausreichend ausgestattete Betriebsreserven, um die Integrität der Elektrizitätsversorgung aufrechterhalten zu können. Eine flexible Lösung für schwache oder isolierte Netze wäre die Investition in Energiespeichersysteme, wobei Wasserstoff als universeller Energievektor benutzt würde.

Abb. 2



Das von der EU finanziell geförderte Pilotprojekt „Nutzung erneuerbarer Energiequellen für die Wasserstoffgewinnung: RES2H2“ wurde 2002 in Angriff genommen. Hauptziel des Projekts ist die flexible Integration erneuerbarer Energiequellen durch Wasserstoff- und Wassererzeugung und Energieerzeugung „nach Bedarf“ mit Brennstoffzellen (s. Abb. 2). Mit der Pilotanlage sollen verschiedene Vorteile nachgewiesen werden, die für eine daraus abgeleitete kommerzielle Anwendung von Nutzen sein können:

- Verminderung der Treibhausgasemissionen, insbesondere CO₂, im Vergleich zur Wasserstoffherzeugung durch konventionelle Prozesse (1 kg CO₂/Nm³H₂ aus Erdgas-Reformierung, 4,5 kg CO₂/Nm³H₂ aus Elektrolyse bei Betrieb mit dem derzeitigen europäischen Energiemix)
- vermehrte Energienutzung aus erneuerbaren Quellen unter Verwendung von Wasserstoff und Wasser als Speichermedien

- erhöhte Verfügbarkeit „grünen“ Wasserstoffs in einer globalen Wasserstoffinfrastruktur
- Elektrizitätserzeugung in abgelegenen Regionen mit Hilfe von Brennstoffzellen
- erhöhter Anteil erneuerbarer Energiequellen für eine nachhaltige Entwicklung
- Pufferung der Diskontinuität und Phasenunterschiede der aus erneuerbaren Energien erzeugten Leistung
- Abbau der Spitzenlastzeiten und Erzielung optimierter Preise für die Netzeinspeisung elektrischer Energie
- Zugang zu Nischenanwendungen in abgelegenen Gebieten
- Zugang zu lokaler Wasserstoff- und Sauerstoffversorgung für Kleinbetriebe
- wachsende Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen

Pilotanlagen sollen realitätsnah sein

Eine Gruppe von Universitätsinstituten und Industriepartnern wird zwei Pilotanlagen errichten, die in Griechenland und Spanien in Betrieb genommen werden. Beide Anlagen sind vor Ort mit Windturbinen gekoppelt. Der griechische Standort konzentriert sich auf die Speicherung und Weiterverteilung grünen Wasserstoffs für industrielle Anwendungen und den Transportsektor. Neuartige Technologien zur Metallhydrid- und Druckgasspeicherung von Wasserstoff werden geprüft. Die Wasserstoffherzeugung erfolgt gemeinsam mit ortsansässigen Industriebetrieben.

Der spanische Standort (Abb. 1) wird sich auf die Nutzung von Wasserstoff zur flexiblen Stromerzeugung mit Brennstoffzellen konzentrieren – zum Ausgleich des diskontinuierlichen Aufkommens von Windenergie. Die Speicherung von Wasserstoff und Sauerstoff erfolgt in konventionellen Druckbehältern. In einer zusätzlichen Umkehrosmose-Entsalzungsanlage wird die überschüssige Windkraft und Abwärme aus dem Elektrolyseur/Brennstoffzellen-System zur Produktion von Frischwasser genutzt.

Container für Energie nach Bedarf

Eines der ersten Produkte, das aus dem Projekt abgeleitet werden soll, ist ein Energie-Container, der Brennstoffzelle und Elektrolyseurmodul zu einer flexiblen Einheit verbindet, die Energieüberschüsse speichern und Wärme und Energie nach Bedarf liefern kann. Diese Containerlösung, die von einem Konsortium unter Beteiligung der Solantis Energy AG/Portugal, P21 GmbH/Deutschland, Integral Drive Systems AG/Schweiz und Hydrogen Systems GmbH/Deutschland entwickelt wird, ist speziell für den Bedarf kleiner Versorgungsbetriebe und Gemeinwesen sowie von Klein- und Mittelbetrieben gedacht.

Verflüssigung und Speicherung von Wasserstoff

Joachim Wolf, Linde AG

Seit über 70 Jahren wird Wasserstoff großtechnisch verflüssigt und für die verschiedensten Anwendungen eingesetzt. Vor allem die Raumfahrt setzte schon früh auf flüssigen Wasserstoff als leichten, energiereichen Treibstoff für ihre Raketen. Im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen wie Benzin oder Diesel besitzt Wasserstoff etwa die dreifache Energiemenge pro Kilogramm. Seit einigen Jahren wird auch die Nutzung von H_2 als Antrieb für Fahrzeuge erprobt.



Tiefkalt und flüssig – Speicherung mit höchster Dichte

Der Energieträger Wasserstoff besitzt in tiefkalt verflüssigter Form (-253°C) eine wesentlich höhere Energiedichte als gasförmig komprimierter Wasserstoff. Auf diese Weise ermöglicht Flüssigwasserstoff (LH_2) nahezu gleiche Fahrzeug-Reichweiten wie sie mit konventionellen Kraftstoffsystemen erzielt werden können. Vorteile hat LH_2 vor allem

aber auch bei Logistik und Transport. Durch die höhere Dichte wird weniger Speicherraum benötigt, so dass im Vergleich zum gasförmigen Zustand in der Praxis eine vielfache Menge pro Transporteinheit befördert werden kann. Das bedeutet einen nicht unerheblichen Kostenfaktor, der den etwas höheren Energieaufwand, der zur Verflüssigung erforderlich ist, relativiert.

„Kühlschrank“ für den Tank

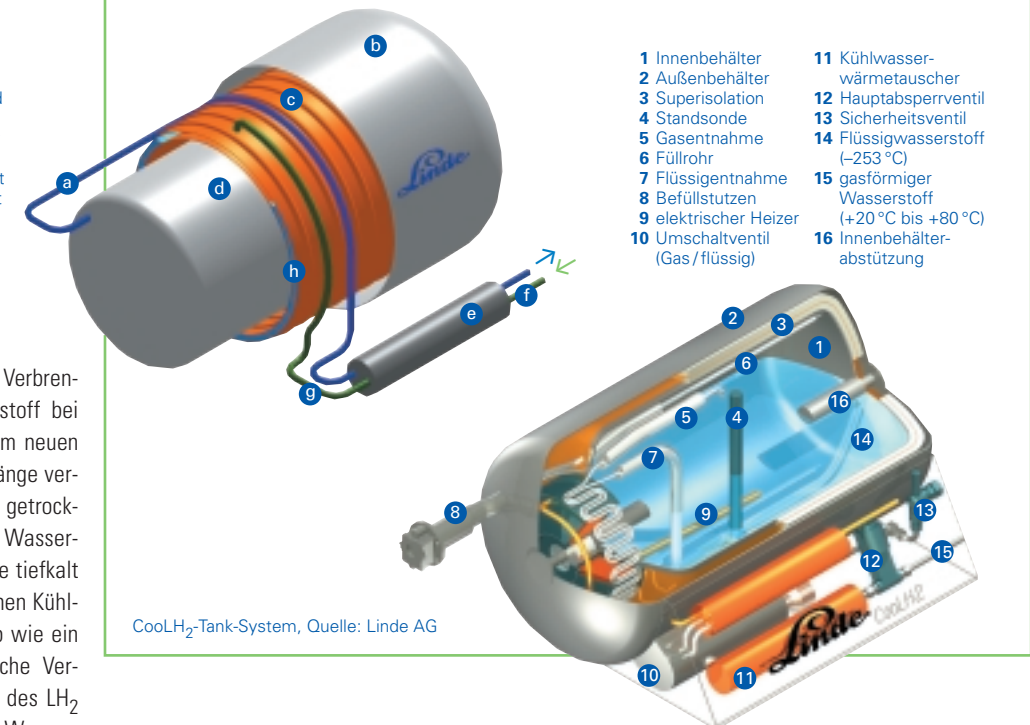
Eine technische Herausforderung stellt allerdings die extrem niedrige Temperatur von -253°C dar, die notwendig ist, um Wasserstoff zu verflüssigen bzw. im flüssigen Zustand zu halten. Die Speicherung von Flüssigwasserstoff erfordert deshalb besondere Maßnahmen. Nach dem Prinzip einer Thermoskanne, die beispielsweise Getränke kalt hält, schützt ein isolierter LH_2 -Tank den flüssigen Wasserstoff weitgehend vor unerwünschtem Wärmeeinfall. So genannte Kryotanks bestehen aus einem äußeren und inneren metallischen Behälter. Der Innenbehälter nimmt den tiefkalten Wasserstoff auf, wobei der äußere Behälter sich weiterhin

bei Raumtemperatur befindet. Um den Flüssigwasserstoff vor Wärmestrahlung zu schützen, wird der Innentank mit einer Vielzahl von Metallfolien mit Zwischenlagen aus Glaswolle geschützt. Der verbleibende Raum zwischen Innen- und Außenbehälter ist außerdem evakuiert, um die Wärmeeinbringung durch Konvektion zu verhindern. Zusätzlich ist der Innentank über mechanisch stabile und gleichzeitig thermisch isolierende Fixierungen mit dem Außentank verbunden. Trotz der aufwändigen Maßnahmen verbleibt eine geringe Wärmeeinbringung auf den Flüssigwasserstoff, was im Laufe der Zeit zu einem Druckanstieg im Tank führt. Bei Stillstand des Fahrzeugs bedeutet dies, dass gegenwärtig nach etwa drei Tagen ein oberer Druckwert im Innentank erreicht wird. Um den Druck konstant zu halten, muss deshalb ab diesem Zeitpunkt etwas Wasserstoff abgegeben werden. Man spricht von so genannten Abdampfverlusten.

Die Lösung: ein effizientes Rückkühlsystem

Diese Abdampfverluste lassen sich jetzt wirkungsvoll minimieren. Linde entwickelte hierfür ein spezielles Rückkühlsystem, das die reine Standzeit des Fahrzeugs bis zum Verlust durch Abdampfen von drei auf mehr als zwölf Tage verlängert. Die im flüssigen Wasserstoff steckende Kälte wurde bisher nicht weiter genutzt, sondern in einem Kühlwasserwärmetauscher vernichtet. Denn für den

- a Wasserstoff
- b Außenbehälter
- c Strahlungsschild
- d Innenbehälter
- e Wärmetauscher
- f Umgebungsluft
- g getrocknete Luft
- h verflüssigte Luft



Cool H_2 -Tank-System, Quelle: Linde AG

- 1 Innenbehälter
- 2 Außenbehälter
- 3 Superisolation
- 4 Standsonde
- 5 Gasentnahme
- 6 Füllrohr
- 7 Flüssigentnahme
- 8 Befüllstutzen
- 9 Umschaltventil (Gas / flüssig)
- 10
- 11 Kühlwasserwärmetauscher
- 12 Hauptabsperrentil
- 13 Sicherheitsventil
- 14 Flüssigwasserstoff (-253°C)
- 15 gasförmiger Wasserstoff ($+20^\circ\text{C}$ bis $+80^\circ\text{C}$)
- 16 Innenbehälterabstützung

Betrieb einer Brennstoffzelle oder eines Verbrennungsmotors wird in der Regel Wasserstoff bei Raumtemperatur benötigt. Anders bei dem neuen Verfahren, hinter dem sich folgende Vorgänge verbergen: Umgebungsluft wird angesaugt, getrocknet und durch die beim Erwärmen des Wasserstoffs abgegebene Energie verflüssigt. Die tiefkalt verflüssigte Luft (-191°C) durchströmt einen Kühlmantel, der den Innentank umgibt und so wie ein Kühlschrank wirkt. Das Resultat: deutliche Verzögerung der unerwünschten Erwärmung des LH_2 und sinnvolle Nutzung der im flüssigen Wasserstoff gespeicherten Energie. Auf die Größe des Tanks wirkt sich das Kühlsystem kaum aus; es findet in der bereits vorhandenen Isolierschicht Platz.

Keine Wartezeiten bei Betankung

Auch die Betankung von Flüssigwasserstoff erfordert technische Raffinesse. So dauerte noch vor zehn Jahren der Betankungsvorgang eines Fahrzeuges gut eine Stunde. Schwierigkeiten bereitete

dabei unter anderem das Vereisen der Verbindung zwischen Befüllschlauch an der Tankstelle und Einfüllstutzen am Fahrzeug. Durch den großen Temperaturunterschied zwischen dem Flüssigwasserstoff (-253°C) und der Umgebung bildete sich aus der Luftfeuchtigkeit Kondensat, das vereiste. Daher musste nach jedem Tankvorgang die Verbindung erst angewärmt und sorgfältig gespült werden. Die von Linde bereits vor etwa zehn Jahren entwickelte Betankungskupplung für Flüssigwasserstoff löst diese Probleme bzw. lässt sie erst gar nicht auftreten. Beide Verbindungen, sowohl am Fahrzeug als auch an der Tankstelle, haben spezielle Ventile, die sich nur dann öffnen lassen, wenn beide Teile verbunden sind. Nach der Verbindung und dem Öffnen der Ventile entsteht so ein hermetisch abgeschlos-

sener Raum in Form einer Röhre, durch den nun vom tankstellenseitigen Kupplungsteil ein so genannter „Cold Finger“ tief in das Verbindungsstück am Fahrzeug eingeführt wird. Das Besondere dabei ist, dass außer diesem „Cold Finger“, der nach dem Betankungsvorgang wieder zurückgezogen wird, keine weiteren Teile der beiden Kupplungshälften mit dem tiefkalten Wasserstoff in Kontakt kommen. Kondensatbildung oder gar Vereisung tritt erst gar nicht auf. Ein Aufheizen zum Lösen der Verbindungen wie auch deren Reinigung ist damit überflüssig. Das heißt, sobald ein Betankungsvorgang abgeschlossen ist, kann der darauf folgende eingeleitet werden. Entstehendes Rückgas wird über das koaxial angeordnete Kupplungssystem wieder direkt zur Tankstelle zurückgeführt. Diese bereits mehrere tausendfach erprobte Methode ermöglicht extrem geringe Betankungszeiten. So dauert der Betankungsvorgang für zum Beispiel 100l gerade mal zwei Minuten, also nicht länger als bei herkömmlichen Treibstoffen.



Fertigung kryogener Tank-systeme für Fahrzeuge

Wasserstoff Druckgasspeicherung

Christian Rasche, Dynetek Europe GmbH / Martin Kesten, Dynetek Europe GmbH

Wasserstoff in geeigneter Weise zu speichern, ist eine der Herausforderungen für dessen erfolgreiche Einführung als Fahrzeug-Kraftstoff. Die Entwicklung von Speicherbehältern bewegt sich dabei im Spannungsfeld zwischen der Erzielung einer maximalen Reichweite bei gleichzeitiger Minimierung von Gewicht, Tankvolumen und Kosten. Eine Lösung bieten Druckbehälter aus Verbundwerkstoffen, in denen Wasserstoff unter hohem Druck gespeichert wird.

Die DyneCell®-Composite-Fahrzeugtanks sind für einen Betriebsdruck von 35 MPa ausgelegt.



➔ Für den Speicherwirkungsgrad (Speichervolumen/Speichergewicht), und somit für die Reichweite von mit Wasserstoff angetriebenen Fahrzeugen, spielt der Betriebsdruck des eingesetzten Behälters eine wesentliche Rolle. Je höher der Druck ist, mit dem der Wasserstoff komprimiert und gelagert werden kann, desto mehr Wasserstoff steht bei gleichem Volumen im Fahrzeugtank zur Verfügung. Industriell übliche Druckgasbehälter aus hochfestem Stahl speichern bei Betriebsdrücken von maximal 30 MPa etwa 2,1 kg komprimierten Wasserstoff in einem Volumen von 100 l. Das entspricht einer Energiedichte von 180 MJ pro 100 l Volumen. Diese Kapazität liegt erheblich unter den Zielvorstellungen der Automobilindustrie.

Eine Alternative bietet die Nutzung von flüssigem Wasserstoff, der zwar eine wesentlich höhere Dichte besitzt, aber in thermisch isolierten Kryobehältern bei -253 °C gespeichert werden muss. Außerdem berücksichtigt werden muss bei dieser Technik der hohe Energieaufwand für die Gasverflüssigung sowie der technische Aufwand, um Verlusten durch eine allmähliche Verdampfung entgegenzuwirken.

Messlatte Reichweite

Ein zukünftiger Brennstoffzellen-Pkw benötigt einen Speicher mit etwa 4 kg Wasserstoff, um eine mit aktuellen Fahrzeugen annähernd vergleichbare Reichweite zu erzielen. Der in heutigen Fahrzeugen für die Unterbringung eines Wasserstofftanks zur Verfügung stehende Raum fordert daher eine hohe Energiespeicherdichte. Wasserstoffgas muss unter so hohem Druck gespeichert werden können, dass eine Energie von etwa 480 MJ pro 100 l Tankvolumen zur Verfügung steht.

Leichtgewicht Verbundwerkstoff

Eine mögliche Lösung für das Problem Betriebsdruck versus Gewicht bieten so genannte Composi-

te-Behälter. Diese Behälter bestehen aus Verbundwerkstoffen und ermöglichen ein relativ geringes Gewicht bei gleichzeitig hoher Stabilität gegenüber hohen Betriebsdrücken.

Die Composite-Fahrzeugtanks bestehen aus einem so genannten „Liner“, einem Innenbehälter, der im Wesentlichen die Gasdichtheit des Speichers gewährleistet. Den Liner umgibt eine Armierung aus Kohlenstofffaser verstärktem Epoxidharz. Diese Armierung nimmt die durch den Speicherdruck hervorgerufenen mechanischen Kräfte auf. Mit diesem Konzept werden auch bei eingeschränkten Platzverhältnissen Wasserstofftanks mit



Der MAN-Brennstoffzellenbus mit Dynetek-Wasserstoffdruckbehälter wurde in Nürnberg und Erlangen im Alltagsbetrieb erprobt.



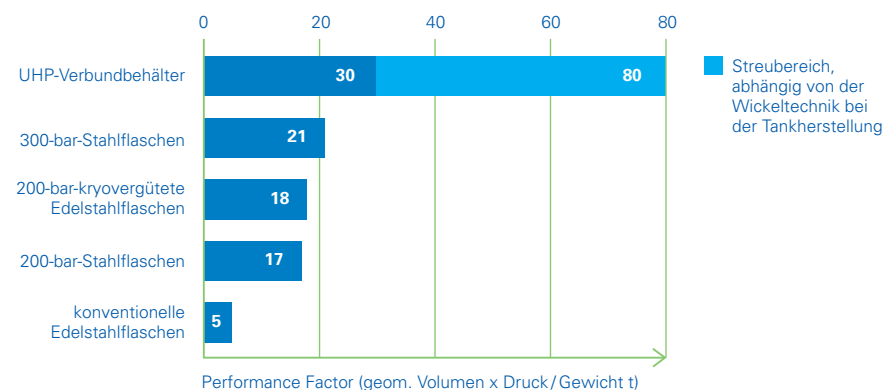
Produktion von DyneCell®-Behältern: Dünnwandige, nahtlose Aluminiumliner werden vollständig mit einem hochfesten Kohlenstofffaserlaminat umwickelt.

Herausforderung Hochdruckspeicherung

Aus der Effizienz von Brennstoffzellen-Systemen und dem begrenzten Tankraum in Fahrzeugen lässt sich der benötigte Speicherwirkungsgrad von Druckgasspeichern ableiten. Eine weitere wichtige Rolle spielt die Mindestreichweite, die mit einer Tankfüllung erzielt werden soll. Als akzeptabel wird eine Reichweite von etwa 640 km bzw. 400 Meilen von seiten der Automobilindustrie angesehen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die Erhöhung des Betriebsdruckes von 35 MPa auf bis zu 70 MPa notwendig. Der technische Lösungsansatz hierfür besteht wiederum aus Verbundwerkstoffen, jedoch mit hochfesten Metallinlinern.

einem guten Gewichts-/Volumenverhältnis möglich, welches im Vergleich zu Stahlflaschen um bis zu Faktor fünf besser ist.

Die ersten Composite-Fahrzeugtanks für einen Betriebsdruck von 35 MPa hat Dynetek bereits vor einigen Jahren in den Markt eingeführt. Diese DyneCell®-Behälter bestehen aus einem dünnwandigen, nahtlosen Aluminiumliner, der vollständig mit einem hochfesten Kohlenstofffaserlaminat umwickelt ist. Der Aluminiumliner schützt und stabilisiert das Laminat auch bei einer möglichen Schlagbeanspruchung des Behälters von außen. Ein weiterer Vorteil von Aluminium ist die hohe Wärmeleitfähigkeit, die beim Füllen und Entleeren des Tanks für einen schnellen Temperaturengleich im Gasraum sorgt. Bei Tanks mit hohen Betriebsdrücken beeinflusst der Temperaturengleich entscheidend die Füllgeschwindigkeit und die maximale Füllmenge.



Erprobung im Cityverkehr

An der Erprobung der Composite-Technologie zusammen mit den dafür entwickelten Brennstoffzellen-Fahrzeugen arbeiten derzeit viele Automobilhersteller. Ein großer Flottenversuch, der die Alltagstauglichkeit von Wasserstofffahrzeugen unter Beweis stellen soll, ist das von der Europäischen Gemeinschaft initiierte und geförderte CUTE-Projekt (Clean Urban Transport for Europe). Über eine Laufzeit von drei Jahren werden in zehn europäischen Städten jeweils drei Citaro-Brennstoffzellenbusse eingesetzt. Bei jedem der 30 Busse ist auf dem Dach ein Tanksystem aus neun DyneCell®-Behältern mit jeweils 205 l Inhalt und 35 MPa Betriebsdruck sowie die dazugehörigen Leitungen und Sicherheitsarmaturen installiert. Mit einem Gesamtinhalt von 45 kg Wasserstoff können diese Stadtbusse je nach Topografie und Auslastung 200 bis 300 km zurücklegen.

Wasserstoffspeicherung in Hydriden

Marc Hubert, HERA Hydrogen Storage Systems Inc. /
Andreas Otto, HERA Hydrogen Storage Systems GmbH

Unzureichende Möglichkeiten zur effektiven und sicheren Speicherung von Wasserstoff waren von jeher einige der Haupthindernisse für die flächendeckende Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff. Die Metallhydrid-Technologie (Wasserstoffspeicherung in „fester“ Form) ermöglicht die Speicherung von Wasserstoff mit hoher Energiedichte, in kompakter Form und bei niedrigem Druck.

⇒ Metallhydride absorbieren gasförmigen Wasserstoff in ganz ähnlicher Weise wie ein Schwamm Wasser aufnimmt. Kommt molekularer Wasserstoff aus dem Wasserstoffgas mit der Oberfläche dieses Speichermaterials in Berührung, zerfällt er in atomaren Wasserstoff und dringt in das Material ein. Wird ein bestimmter Druck des Gases erreicht, reagiert der Wasserstoff in dem Material zu einer als Hydrid bezeichneten hochkonzentrierten Wasserstoffphase, und es bilden sich feste Metall-Wasserstoff-Verbindungen.

Die Absorption von Wasserstoff ist ein exothermer Prozess. Während der Speicherung wird Wärme frei und Prozessabwärme kann beispielsweise genutzt werden, um den Wasserstoff aus dem Metallhydrid wieder zu entnehmen. Wasserstoffgas wird bei einem Druck freigesetzt, der von der Betriebstemperatur und der gewählten Speicherlegierung abhängig ist. Dieser Prozess kann ohne

Verlust an Speichervermögen mehrfach wiederholt werden. Es gibt verschiedene Arten von Hydridmaterialien, die bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturen arbeiten (von Minusgraden bis zu 300 °C oder darüber). Je nach Einsatzzweck lassen sich durch die Wahl des Speichermaterials unterschiedliche Metallhydrid-Speichersysteme zusammenstellen.

Metallhydridsysteme bieten ein sehr sicheres, kompaktes Verfahren zur Wasserstoffspeicherung bei niedrigen Arbeitsdrücken – von Normaldruck bis zu mehreren bar Überdruck – entsprechend den Anforderungen der jeweiligen Anwendung.

Die Firma HERA Hydrogen Storage Systems hat Metallhydrid-Lösungen entwickelt, die in unterschiedlichen Größen und zur Wasserstoffversorgung einer Reihe von Applikationen – stationär, mobil oder tragbar – eingesetzt werden können. HERA, ein Gemeinschaftsunternehmen von Hydro-Québec CapiTech, Gesellschaft für Elektrometallurgie (GfE) und Shell Hydrogen, ist in Europa am Standort Nürnberg vertreten (HERA Hydrogen Storage Systems GmbH).



Metallhydrid-Legierung



24-m³-Speicher



Beispiele für HERA-Metallhydrid-Speicher

Forschungsfeld Wasserstoffspeicherung

Walter Schütz, FutureCamp GmbH

Wasserstoff wird in der Regel gasförmig unter hohen Drücken, flüssig und tiefkalt oder in Metallhydriden gebunden. Die derzeit verfügbaren Systeme zur Wasserstoffspeicherung werden ständig weiterentwickelt. In Forschung und Entwicklung wird aber auch weiterhin nach neuen und gegebenenfalls effektiveren Möglichkeiten gesucht.

⇒ 1997 wurde die Aufmerksamkeit der Forschung auf Kohlenstoff-Nanostrukturen als leistungsfähige Wasserstoffspeichermaterialien gelenkt: Zwei amerikanische Wissenschaftler veröffentlichten hohe Werte für Wasserstoffspeicherkapazitäten in Kohlenstoff-Nanostrukturen.

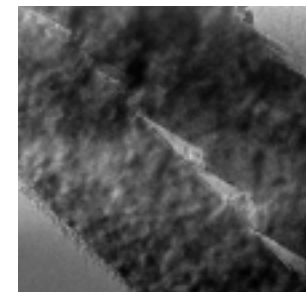
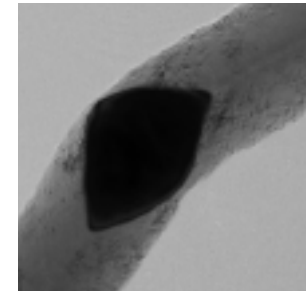
Kohlenstoff-Nanotubes

Kohlenstoff-Nanotubes sind aus konzentrischen Graphitröhren aufgebaut. Entdeckt wurden sie von Iijima im Jahre 1991. Erste Publikationen berichteten von Speicherkapazitäten zwischen 5 und 10 Gewichtsprozent¹. Die Wasserstoffeinlagerung erfolgt bei geringem Überdruck. Etwa zwei Gewichtsprozent Wasserstoff sind bereits bei Raumtemperatur wieder verfügbar, während der Rest erst oberhalb von 530 °C frei wird. Andere Arbeitsgruppen können jedoch oft keine vergleichbar hohen Werte für die Wasserstoffaufnahme beobachten.

¹ A.C. Dillon, T. A. Bekkedahl, K.M. Jones, M.J. Heben, Nature 386 (1997), 377

² Chambers A., Park C., Baker R.T., Rodriguez N.M., Hydrogen storage in graphite nanofibers, Phys. Chem. B 102, 4253–4256 (1998)

Kohlenstoff-Nanofaser,
weitestgehend massiv



Kohlenstoff-Nanofasern

Kohlenstoff-Nanofasern bestehen aus übereinander gestapelten Graphitebenen. 1998 publizierten Prof. Baker und Prof. Rodriguez Wasserstoffspeicherkapazitäten in Kohlenstoff-Nanofasern von bis zu 60 Gewichtsprozent². Der Wasserstoff wird bei Raumtemperatur und einem Druck von zirka 120 bar in die Faser eingelagert. Unterhalb von zirka 40 bar entweicht der Wasserstoff wieder aus dem Kohlenstoff-Nanomaterial – so die publizierten Beobachtungen. Seitdem bemühen sich weltweit Forschungsinstitute, Industrieunternehmen und Universitäten darum, diese Werte zu bestätigen. Die Ergebnisse sind bis heute widersprüchlich: Die Spanne reicht von 0 Gewichtsprozent bis zu 14 Gewichtsprozent. Außerdem ist der Mechanismus der Wasserstoffeinlagerung noch nicht aufgeklärt.

Zurzeit werden von FutureCamp im Rahmen eines vom Bayerischen Wirtschaftsministerium geförderten Projektes zusammen mit der Technischen Universität München und dem Wasserstoffforschungsinstitut in Trois-Rivières (Québec, Kanada)

verschiedene Kohlenstoff-Nanofaser-Modifikationen synthetisiert und auf deren Speicherkapazität für Wasserstoff untersucht.

Viel versprechend, aber umstritten

Es ist bisher noch nicht gelungen, zu einer geschlossenen und konsistenten Beurteilung der Thematik Nanocarbon-Strukturen zu gelangen. Dies liegt zum einen an der Nichtvergleichbarkeit der Messverfahren und zum anderen an der stark schwankenden Probenqualität. Neueste Veröffentlichungen lassen jedoch hoffen, dass technisch interessante Speicherkapazitäten erreicht werden können.

Wasserstoffträger Natriumborhydrid

Natriumborhydrid (NaBH₄) wird als potenzieller Kandidat zur Wasserstoffspeicherung vor allem für den mobilen und portablen Einsatz erprobt. Dabei wird eine wässrige Lösung aus Natriumborhydrid über einen geeigneten Katalysator geleitet: Wasserstoff wird produziert. Zurück bleibt Borax. Mit dem 200-l-Tanksystem eines Versuchsfahrzeugs von DaimlerChrysler erreicht man eine Reichweite von zirka 500 km, wobei dieses Tanksystem auch das „verbrauchte“ Borax speichert. An der Tankstelle wird das Borax entfernt und die frische Lösung aus Natriumborhydrid nachgefüllt. Anschließend wird das Borax in einem chemischen Prozess (Hydrierung) wieder in Natriumborhydrid umgewandelt. Allerdings ist dieser Prozess zurzeit noch sehr energieintensiv.



unter Anwesenheit eines geeigneten Katalysators

Wasserstoffspeicherung in Microspheres

Glaskügelchen mit einem Durchmesser von weniger als 100 Mikrometer und einer Wandstärke von zirka einem Mikrometer können enormen Drücken von bis zu 1.000 MPa standhalten. Bei Temperaturen zwischen 200 °C und 400 °C kann Wasserstoff in diese Kügelchen, auch Microspheres genannt, diffundieren. Bei Raumtemperatur bleibt der Wasserstoff in den Kugeln und wird erst wieder bei Erhöhung der Temperatur des Glases freigesetzt. Allerdings befindet sich diese Technologie noch im frühen Entwicklungsstadium.

Wasserstoffspeicherung in Polymeren

Leitfähige Polymere sollen ebenfalls relevante Mengen an Wasserstoff speichern können. Dies wurde von einem koreanischen Forscherteam beim Treffen der American Chemical Society in Boston berichtet. Polyanilin und Polypyrrol sollen demnach bis zu 8 Gewichtsprozent Wasserstoff aufnehmen können. Aktuelle Versuche beschäftigen sich mit der Freisetzung des Wasserstoffs nach erfolgreicher Speicherung.