

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 101 (2010)
Heft: 3

Artikel: Wasserstoff : die Energiespeicherung von morgen
Autor: Borgschulte, Andreas / Züttel, Andreas
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856053>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Wasserstoff – die Energiespeicherung von morgen

Potenzial einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft

Für die nachhaltige Energiewirtschaft der Zukunft ist eine Energiespeicherung unumgänglich. Aber wie kann das Energieäquivalent von 85 Mio. Fass Erdöl pro Tag ersetzt werden? Dieser Beitrag widmet sich dem Potenzial von Wasserstoff als Energieträger und skizziert realisierte und zukünftige Anwendungen.

Andreas Borgschulte, Andreas Züttel

Der rasante Anstieg des Ölpreises hat die breite Öffentlichkeit in schmerzvoller Weise daran erinnert, dass unser modernes Leben auf der Nutzung billiger fossiler Brennstoffe beruht. Der starke Anstieg ist dabei die Reaktion des Markts, an dem die Produktion dieser Rohstoffe nicht in gleichem Masse wächst wie ihre Nachfrage. Das führt zwangsläufig zu der Frage, ob der enorme Energiehunger der Welt auf Dauer durch den Abbau naturbedingt limitierter Ressourcen befriedigt werden kann [1]. Doch die Problematik

ist nicht allein ökonomischer Art; der ökologische Schaden durch die Emission grosser Mengen des klimaschädigenden Gases CO₂, das bei der Verwendung fast aller fossiler Brennstoffe entsteht, ist noch nicht abzusehen [2]. Es gibt zwei prinzipielle Strategien, dieser Problematik zu entgegnen: Adaptation oder Mitigation. Im ersten Fall behalten wir das grundlegende Verhalten bei und mildern allein die damit einhergehenden negativen Konsequenzen. Das heisst zum Beispiel höhere Investitionen in die Explo-

ration neuer Ölfelder, aber auch möglicherweise militärische Interventionen in politisch instabilen Regionen zur Sicherung der letzten verbleibenden Reserven. Im gleichen Sinne sind Effizienzsteigerungen von Motoren und industriellen Prozessen, die Verbesserung von Wärmeisolierungen etc. oder die Verwendung anderer, ergiebigerer fossiler Brennstoffe (zum Beispiel Kohle) zu nennen. Mitigation meint die Vermeidung der Nutzung fossiler Energien oder zumindest die Vermeidung der Emission von CO₂ durch Umstellung auf neue Technologien. Es ist nicht Absicht dieses Artikels, die verschiedenen Möglichkeiten der Adaptation zu diskutieren, sondern das Potenzial einer Technologie zur Mitigation zu einer nachhaltigen, klimafreundlichen Energieversorgung aufzuzeigen. Wasserstoff als synthetischer Energieträger wird aus erneuerbarer Energie und Wasser hergestellt und kann in vielen Anwendungen die fossilen Energieträger ersetzen.

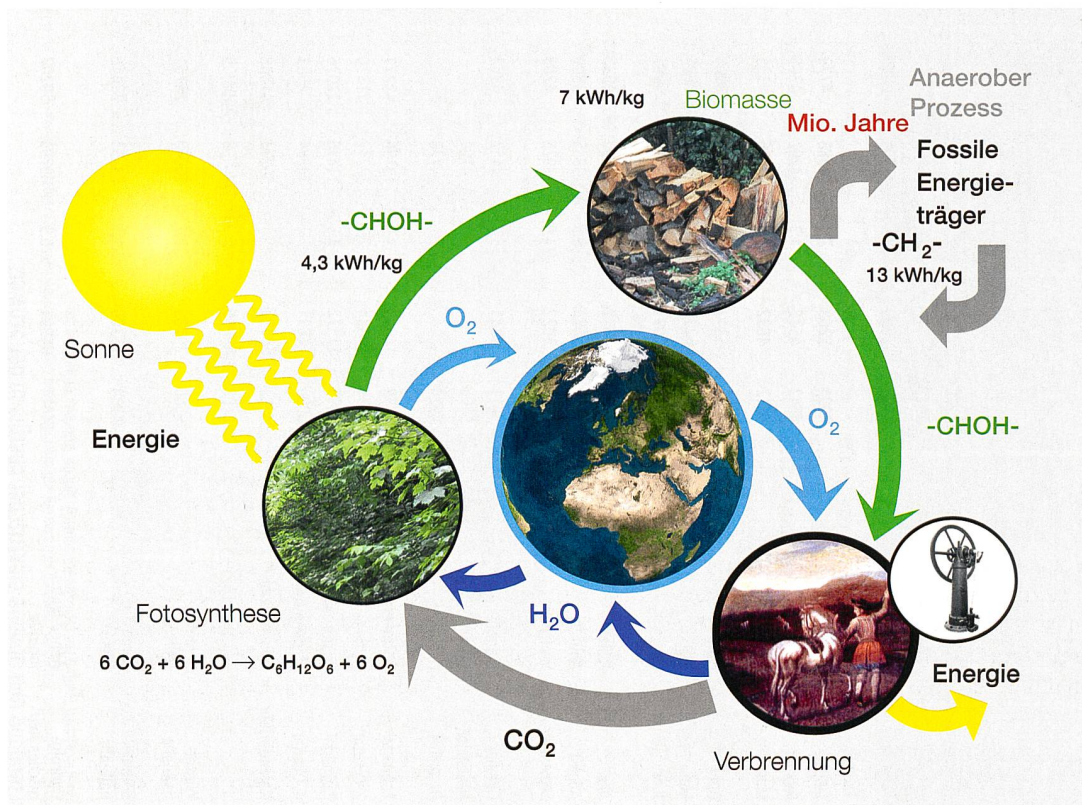


Bild 1 Natürlicher Kohlenstoffzyklus.

Energieumwandlung

Leben und Energie sind untrennbar verknüpft, physikalisch gesehen bedeutet «leben» die Fähigkeit, Energie zu wandeln. Die Primärenergie der Pflanze ist Sonnenlicht, welches über einen komplizierten chemischen Prozess, die sogenannte Fotosynthese, mit Kohlendioxid und Wasser zur Herstellung eines chemischen Energieträgers, den Kohlehydraten, verwendet wird. Die Notwendigkeit eines solchen Langzeitspeichers für das Überleben der Pflanze ist am eindrücklichsten am Beispiel der Gemüse zu verstehen. Die über den Sommer gesammelte Energie wird als Kohlenhydrate gespeichert und ermöglicht den Tieren und Menschen durch deren Verzehr die Energieaufnahme. Abfallprodukt der Fotosynthese ist Sauerstoff, ein für den Verbrennungsprozess notwendiges Gas. Im Erdaltertum hat die Verbreitung von Fotosynthese betreibenden Bakterien die ursprünglich fast sauerstofffreie und CO₂-haltige Atmosphäre in eine sauerstoffreiche und CO₂-arme Atmosphäre geändert. In dieser entwickelte sich neues Leben, welches Sauerstoff mit Kohlenhydraten unter Energiegewinn wieder in Kohlendioxid umwandelt und damit den Kreis schliesst. Dieser sogenannte Kohlenstoffzyklus kann als Vorbild einer nachhaltigen Energiewirtschaft dienen (Bild 1). Er wurde vom Menschen gestört, da die über Jahrtausende angesammelten Kohlenhydrate und die daraus entstandenen Kohlewasserstoffe (Öl, Erdgas) und Kohle mit einer Rate verwendet werden, die eine Million Mal höher als ihre Bildungsrate ist – ausgelöst durch den enormen Energiebedarf einer industrialisierten Gesellschaft.

Nachhaltige Energieökonomie

Die Energieökonomie ist nur dann nachhaltig, wenn eine Energieform verwendet wird, die nicht limitiert ist, und wenn bei ihrer Verwendung/Umwandlung keine Stoffe anfallen oder, falls doch, diese wiederverwendet werden. Der Energie- und Stoffkreislauf muss also geschlossen sein. Die Nutzung verschiedener erneuerbarer Energiequellen wird zurzeit entwickelt mit dem Potenzial, die Energieversorgung der Zukunft sicherzustellen. Letztlich lassen sich alle Energiequellen auf drei Prozesse zurückführen: Kernfusion, Kernspaltung und die Gravitation (Planetenbewegung). Ob die Nutzung der Kernfusion in Reaktoren technisch machbar ist, wird zurzeit intensiv untersucht. Die indirekte Nutzung

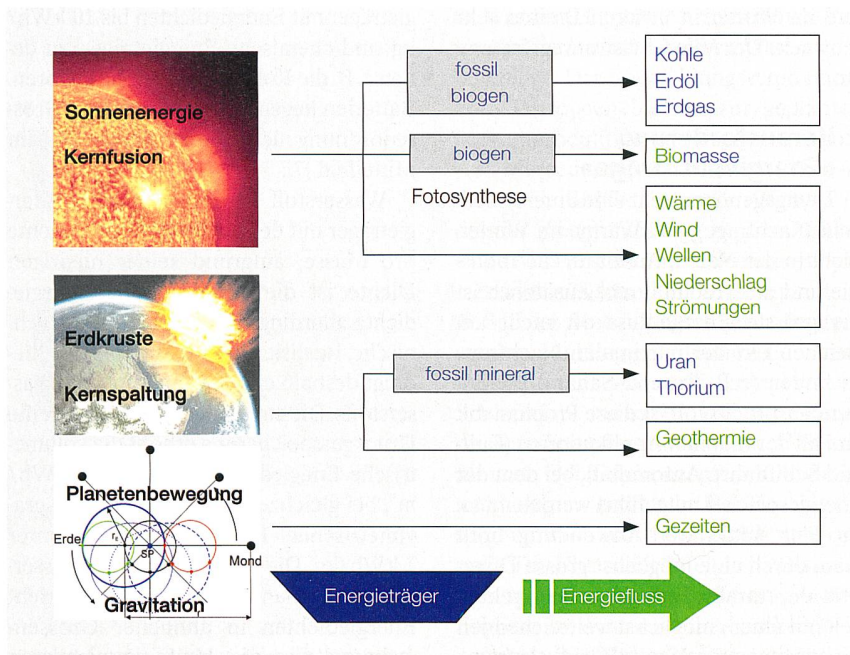


Bild 2 Energieträger und -flüsse.

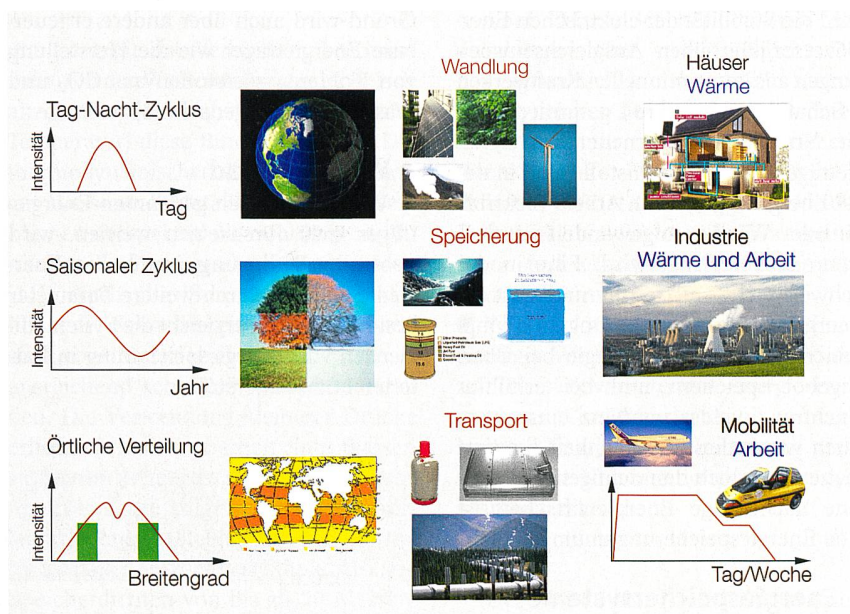


Bild 3 Energieangebot und -nachfrage.

über die Konversion von solarer Energie ist aber eine mittlerweile etablierte Technologie mit grossem Entwicklungspotenzial. Dazu gehört die Nutzung von Sonnenlicht, Wind, Wellen und Niederschlägen. Die direkte Nutzung der Kernspaltung ist ebenfalls eine etablierte, aber umstrittene Technologie. Die Ausnutzung der Planetenbewegung über Gezeitenkraftwerke wurde schon in den 70er-Jahren verwirklicht [3]. Geothermie ist für bestimmte Regionen der Welt eine Alternative (z.B. Island [4]). Abschätzungen des Gesamtenergieflusses unter-

mauern, dass eine Energieversorgung der Welt über erneuerbare Energien möglich ist. Zurzeit beträgt der Weltenergieverbrauch 14 TWh/Jahr. Unter Verwendung realistischer Annahmen für die Effizienz der Umwandlung reicht ein Solarzellenfeld in der Sahara in der Grösse von 490 km² aus, um dieser Nachfrage nachzukommen [5]. Ein wesentlicher Unterschied erneuerbarer Energiequellen zur heutigen Energieversorgung ist, dass diese Energie in Form von nicht beeinflussbaren Energieflüssen zur Verfügung steht. Die Sonne scheint nur tagsüber

und im Winter in unseren Breiten sehr schwach. Der Wind bläst unregelmässig etc.

Herausforderung «Energienachfrage»

Demgegenüber steht eine unterschiedliche Nachfrage nach Wärme im Winter, Licht in der Nacht, Arbeit für die Industrie und die Mobilität etc. Zusätzlich ist der grösste Energiefluss oft nicht am gleichen Ort der maximalen Nachfrage zu finden (z. B. Europa-Sahara) [6]. Extrem anspruchsvoll ist diese Problematik im Fall der mobilen Applikationen (Luft- und Schifffahrt, Automobil), bei dem der Energiespeicher mitgeführt werden muss. Im Fall stationärer Anwendung hofft man, durch eine möglichst grosse Diversität dezentraler Energiequellen, gekoppelt mit einem möglichst weitreichenden Elektrizitätsnetz (Smart Grid), extreme Diskrepanzen abzumildern, wird sie aber nicht völlig vermeiden können. Zurzeit wird die Stabilität der elektrischen Energieversorgung über Ausgleichseinspeisungen aus konventionellen Kraftwerken («Schattenkraftwerke») garantiert, d.h. die Nutzung nicht erneuerbarer Energieträger. Fossile Brennstoffe sind in der Tat Energieträger, die in Arbeit, Elektrizität oder Wärme umgewandelt werden, wenn dies verlangt wird. Eine in der Schweiz viel genutzte Alternative ist die Energiezwischenlagerung in Pumpspeicherwerken, die Energie bei Überangebot speichern und bei erhöhter Nachfrage wieder ins Netz einspeisen. Auch wenn diese Möglichkeit limitiert ist, zeigt sie doch den richtigen Weg: Für eine nachhaltige Energiewirtschaft ist eine Energiespeicherung unumgänglich.

Energiespeichersysteme

Es bleibt die Frage zu beantworten, welche. Verschiedene ökonomische, ökologische als auch physikalische Parameter charakterisieren ein Energiespeichersystem. Einer der wichtigsten ist die Energiedichte. In **Bild 4** werden verschiedenste Systeme bezüglich ihrer gravimetrischen als auch volumetrischen Energiedichte verglichen. Diese variieren über einen grossen Bereich. Wasserkraft als ein etabliertes System hat eine der kleinsten Energiedichten. Dies macht die Limitierung dieses Systems deutlich: Es braucht sehr grosse Wassermengen und grosse Höhenunterschiede. Solche Standorte sind relativ selten. Höchste Energiedichte haben nukleare Brennstoffe. Technisch leichter konvertierbare Ener-

gieträger mit Energiedichten bis 10 kWh/kg sind chemische Energieträger, zu denen z. B. die Kohlenwasserstoffe gehören. Batterien liegen mit mehr als einer Gröszenordnung niedrigerer Energiedichte im Mittelfeld [7].

Wasserstoff ist der chemische Energieträger mit der höchsten Energiedichte pro Masse, aufgrund seiner niedrigen Dichte ist die volumetrische Energiedichte allerdings relativ klein. Eine technische Realisierung in Automobilen bedingt deshalb eine Verdichtung des Wasserstoffs. Die zurzeit technisch ausgereifte Druckgasspeicherung erhöht die volumetrische Energiedichte auf ca. 1000 kWh/m³, bei gleichzeitiger Reduktion der gravimetrischen Energiedichte auf unter 1 kWh/kg. Die Speicherung von Wasserstoff in sogenannten Hydriden verspricht Energiedichten in ähnlicher Gröszenordnung wie die heute verwendeten Treibstoffe (Benzin, Diesel), ist technisch jedoch noch nicht ausgereift. Aus diesem Grund wird auch über andere erneuerbare Energieträger wie die Herstellung von Kohlenwasserstoffen aus CO₂ und Wasserstoff nachgedacht [8].

Wirkungsgrad

Welche der oben genannten Energieträger sich durchsetzen werden, wird neben der Bedingung einer hohen Energiedichte auch durch weitere Parameter bestimmt. **Bild 5** vergleicht die Systemeffizienzen von Energiespeicherung in Batterien und Wasserstoff.

Der Wasserstoffzyklus besteht aus Wasserstoffproduktion, Speicherung und Konversion [9]. Je nach verwendetem Prozess treten verschiedene, zu multiplizierende Energieverluste auf. Grösster Verlust tritt bei der Umwandlung von Wasserstoff in elektrische oder mechanische Energie auf. Multipliziert man alle Verluste, so kommt man auf einen Gesamtwirkungsgrad, der zwischen 20 und 40% der investierten 100% Primärenergie liegt. In dieser Hinsicht ist ein Batteriesystem, z. B. Lithiumionen-Batterien, dem Wasserstoffkreislauf überlegen. Ein anderer wichtiger Parameter ist die Abundanz der verwendeten Materialien, da das Energieäquivalent von 85 Mio. Fass Öl pro Tag ersetzt werden muss. Dies ist eine besondere Stärke des Wasserstoffkreislaufs. Wasserstoff selbst wird aus Wasser gewonnen – und dem Kreislauf rückgeführt und steht daher ausreichend zur Verfügung. Wasserstoff kann in vielen Fällen in der bestehenden Infrastruktur implementiert werden, so z. B. als Beimischung im Erdgas oder als Benzinersatz in Autos mit Verbrennungsmotoren. Der Materialaufwand der Maschinen für Erzeugung, Speicherung und Konversion ist deshalb relativ klein, verglichen mit anderen Systemen. Der Materialaufwand für Hochleistungssysteme bei Verwendung von neuartigen Speichermaterialien und Brennstoffzellensystemen ist höher, jedoch immer noch kleiner als für vergleichbare Batteriesysteme.

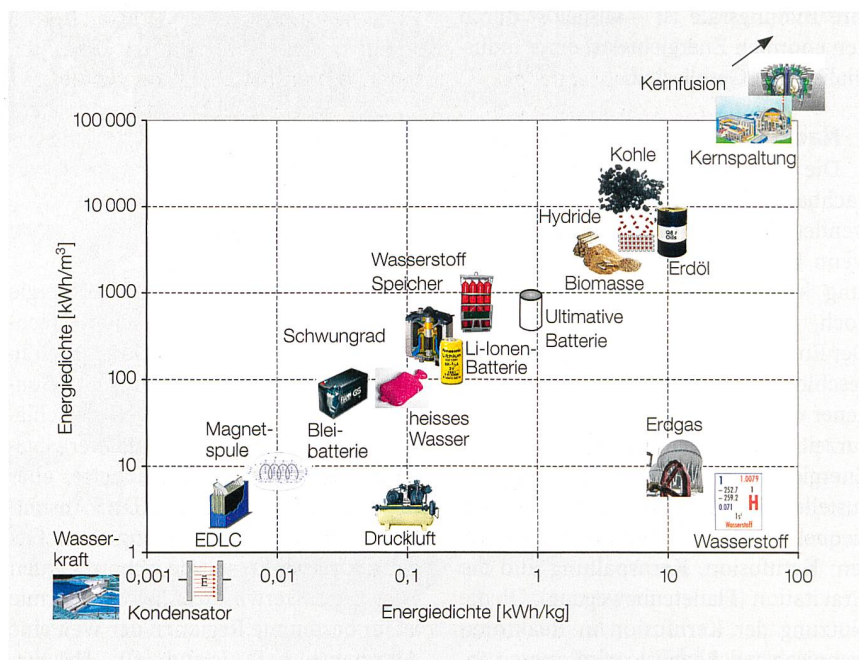


Bild 4 Energiedichte verschiedener Energiespeicher.

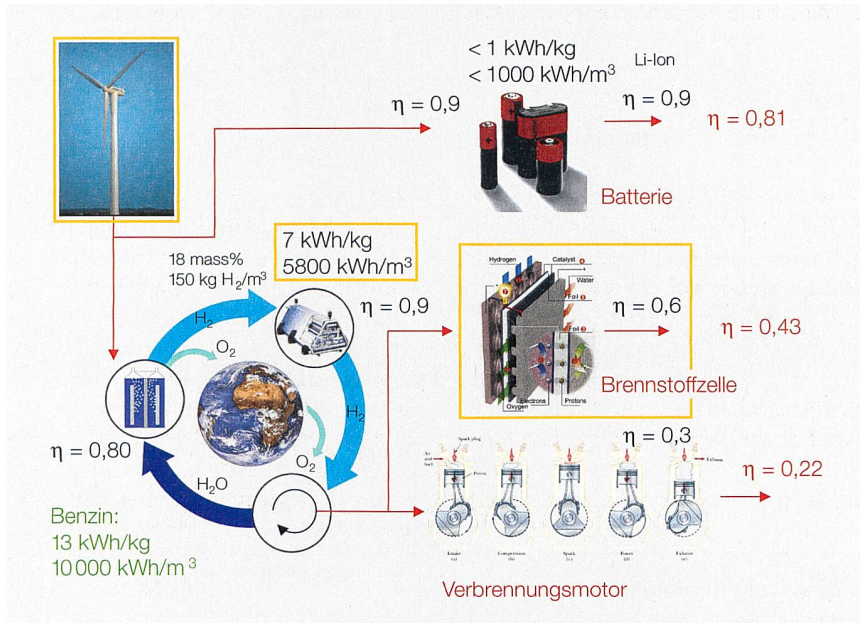


Bild 5 Vergleich der Systemeffizienzen von Speicherung von Energie in Lithiumionen-Batterien und Wasserstoff.

Wasserstoffspeicherung

In den meisten Anwendungen, mit Ausnahme von Automobil und Flugzeug, spielt die Speicherdichte von Wasserstoff eine eher untergeordnete Rolle. Insbesondere in stationären Anwendungen kann Wasserstoff in grossen Druckgasbehältern auch bei relativ geringer Speicherdichte in ausreichender Menge gelagert werden [10]. Bei Verwendung moderner Kompositmaterialien und Drücken bis 350 bar werden volumetrische Dichten von bis zu 50 kg/m³ bei einer gravimetrischen Dichte von ca. 5 Massenprozent erreicht. Für mobile Applikationen wird von der Automobilindustrie eine höhere Speicherdichte verlangt. Für ein Auto mit einer Reichweite von ca. 500 km müssen mindestens 5 kg Wasserstoff mitgeführt werden, was einem mindestens 100 kg schweren Drucktank mit einem Volumen von mindestens 100 l entspricht. Flüssiger Wasserstoff hat eine höhere Dichte. Das erforderliche Herunterkühlen auf -250°C verbraucht jedoch ca. 1/3 des Brennwertes von Wasserstoff und ist daher nur für besondere Anwendungen von Interesse (z. B. in der Raumfahrt). Auch die Oberflächenadsorption von Wasserstoff an Materialien mit grosser innerer Oberfläche ist nur bei Verwendung tiefer Temperaturen geeignet. Die Speicherung von Wasserstoff in Metallhydriden ist eine interessante Alternative für das Automobil. Metallhydride sind chemische Verbindungen von Metalllegierungen mit Wasserstoff. Die Bin-

dungsenergie der Verbindung bestimmt dabei, ob der Wasserstoff unter technisch akzeptablen Bedingungen (Druck und Temperatur) diese Bindung eingeht. Die thermodynamischen Eigenschaften einiger Wasserstoff-Metalllegierungssysteme können optimal auf die erforderlichen technischen Bedingungen angepasst werden [11]. Auch die Sorptionskinetik, das heisst die Schnelligkeit, mit der Wasserstoff vom Material abgegeben wird, ist ausreichend schnell in diesen Materialien. Die Verwendung kleinerer Drücke erhöht auch die Sicherheit eines Wasserstofftanks. Leider ist die gravimetrische Speicherdichte aufgrund der verwendeten schweren Metalllegierungen auf unter 2 Massenprozent beschränkt. Höhere Speicherdichten von bis zu 20 Massenprozent versprechen sogenannte komplexe Leichtmetallhydride. Diese Materialien befinden sich allerdings noch im Entwicklungszustand. Einen guten Überblick über die verschiedenen Wasserstoffspeichermöglichkeiten geben U. Eberle et al. [12].

Anwendungsmöglichkeiten

Aufgrund der Vor- und Nachteile verschiedener Energiespeicher besteht eine Konkurrenz der Systeme, aus der im Laufe der Zeit optimale Lösungen entstehen werden. Im Folgenden sollen daher verschiedene Anwendungen aufgelistet werden, die das grosse Potenzial und Funktionieren einer Wasserstoffwirtschaft demonstrieren:

■ **Wasserstoffautos:** Verschiedenste Automobilhersteller realisieren Wasserstofffahrzeuge. Der Entwicklungsstand reicht vom Prototypen bis hin zur geplanten Massenproduktion im Jahr 2015 (Toyota [13], Mercedes-Benz B-Klasse F-Cell [14], GM [15], BMW [16] etc.). Wichtig in diesem Zusammenhang ist der Aufbau eines Wasserstofftankstellennetzes, wie z. B. in Deutschland für 2012 geplant.

■ **Self** ist eine moderne energie- und wasserunabhängige Raumzelle zum Wohnen und Arbeiten, komplett mit Schlafraum, Nasszelle und Küche, die die Forschungsinstitute Empa und Eawag für neue Gebäudekonzepte und Energietechnologien erproben. Die Energieversorgung wird über Fotovoltaik sichergestellt. Die Überschussenergie im Sommer wird in Wasserstoff gespeichert, um den Engpass im Winter zu überbrücken – ein nachhaltiges Energiekonzept für die Welt.

■ **Protium:** Wasserstoffbetriebenes Kanalboot. Masse ist bei marinen Anwendungen eher nebensächlich. Daher eignen sich konventionelle Metallhydridspeicher hervorragend als Energiespeicher für wasserstoffbetriebene Boote [17].

■ In der U-Boot-Technologie wurde das Potenzial der Brennstoffzellentechnik schon früh erkannt. Verschiedenste U-Boote fahren mit Wasserstoff [18].

■ Windparks kombiniert mit dem Energieträger Wasserstoff [19]. Aufgrund der zeitlich stark variierenden Energieerzeugung aus Wind und der damit einhergehenden Energiepreisschwankung steht eine solche Kombination kurz vor dem Marktdurchbruch.

Fazit

Der Aufbau einer nachhaltigen Energiewirtschaft ist eine der dringlichsten Aufgaben der Welt [20]. Der Rückblick auf einfache und billige Technologien, die auf dem massiven Abbau fossiler Brennstoffe beruhen, verstellt oft den Blick auf die fundamental andere Vorgehensweise einer nachhaltigen Energieversorgung. Während man sich im ersten Fall nur um die Optimierung der Konversion von über Jahrmillionen gewachsener Rohstoffe in nutzbare Energie Gedanken macht, muss in einer nachhaltigen Energiewirtschaft der Energieträger erzeugt, transportiert und wieder in nutzbare Energien umgewandelt werden. Wir haben in diesem Artikel das Potenzial des Wasserstoffkreislaufs für eine erneuerbare Energieversorgung

skizziert. Auch wenn – wie mit jeder neuen Technologie der Fall – verschiedenste Herausforderungen noch zu meistern sind, hat die Wasserstoffrevolution schon begonnen.

Referenzen/Anmerkungen

- [1] www.worldenergyoutlook.org.
- [2] www.ipcc.ch.
- [3] 1966: Bau des Gezeitenkraftwerks Rance in der Bucht von St-Malo.
- [4] www.os.is/page/geothermal_web.
- [5] A. Züttel: Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change (2007) 12:343–365; siehe auch www.desertec.org/de.
- [6] www.desertec.org/de.
- [7] M. Armand, J.-M. Tarascon: Building better batteries, Nature (London) 451, 652 (2008).
- [8] G. Centi, R. A. van Santen: Catalysis for Renewables, Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2007.
- [9] A. Züttel, A. Borgschulte, L. Schlapbach (eds.): Hydrogen as a Future Energy Carrier, Wiley-VCH, Heidelberg 2008.
- [10] Schon um 1900 wurde ein 200 000 m³ grosser Gasbehälter in Hamburg-Grasbrook zur Speicherung von Stadtgas, einer Mischung aus CO und H₂, errichtet.
- [11] A. Percheron-Guéegan et al. J. Less-Common Metals 109 (1985), pp. 287.
- [12] U. Eberle, M. Felderhoff, F. Schüth: Chemische und physikalische Lösungen für die Speicherung von Wasserstoff, Angew. Chem. 2009, 121, 6732–6757.
- [13] www.sustainablemobility.com.
- [14] www.daimler.com/dccom/0-5-1189740-49-1198436-1-0-0-0-0-10400-876574-0-0-0-0-0-0.html.
- [15] www.opel.de/meetopel/umwelt/antriebskonzepte/wasserstoff/index.act.
- [16] www.7-forum.com/cleanenergy.
- [17] www.hydrogen.bham.ac.uk/protium.shtml.
- [18] www.hdw.de/de/brennstoffzelle-aip.html.
- [19] www.hywindbalance.de/index3.html.
- [20] R. E. Smalley: Future Global Energy Prosperity: The Terawatt Challenge, MRS Bulletin 30, 412 (2005).

Résumé

L'hydrogène – l'accumulation d'énergie de demain

Le potentiel de l'hydrogène pour une économie durable

L'accumulation d'énergie sera indispensable à l'économie énergétique durable de l'avenir.

Mais comment remplacer l'équivalent énergétique de 85 millions de barils de pétrole par jour? Cet article étudie le potentiel de l'hydrogène en tant qu'agent énergétique et esquisse quelques applications actuelles et futures.

No

Angaben zu den Autoren

Dr. **Andreas Borgschulte** promovierte 2002 an der Technischen Universität Braunschweig, war von Juli 2005 bis Juli 2006 Projektkoordinator des Wasserstoffspeicherprojekts FuncHy am GKSS Forschungszentrum im deutschen Geesthacht und ist seit 2006 Gruppenleiter der Gruppe Stabilität und Kinetik am Labor für Wasserstoff und Energie an der Empa.

Empa, Abteilung Wasserstoff und Energie, 8600 Dübendorf
andreas.borgschulte@empa.ch

Prof. Dr. **Andreas Züttel** ist Vizepräsident der Swiss Physical Society (SPS) sowie Präsident des Schweizerischen Wasserstoff-Vereins Hydropole. Seit 2006 leitet er die Abteilung Wasserstoff und Energie an der Empa. Ausserdem ist er Professor am Departement für Physik der Universität Freiburg.

Empa, Abteilung Wasserstoff und Energie, 8600 Dübendorf
andreas.zuettel@empa.ch

Anzeige

Verantwortung für die Energiezukunft gemeinsam übernehmen. Sie. Wir. Als Partner.

Wir gestalten die
Energiezukunft der
Schweiz. Zusammen
mit Ihnen. Alpiq, Ihr
Partner für Energie
und Energieservice.

www.alpiq.com



ALPIQ

