

■ Wasserstoff und Brennstoffzellen

Stand der Entwicklungen im Überblick

- Wasserstoff und Brennstoffzellen – Ein Systemüberblick
- Netzmanagement und Integration von Brennstoffzellen
- Internationale Entwicklungen der Wasserstofftechnologie
- Regenerativer Wasserstoff – Erzeugung, Nutzung und Syntheserohstoff
- Wasserstoffnutzung – Ökobilanzen, Kosten und Endenergiestrukturen

Wasserstoff und Brennstoffzellen – ein Systemüberblick

Dr. Gerd Eisenbeiß
FZ Jülich
energie@fz-juelich.de

Prof. Dr.
Jürgen Schmid
ISET
jschmid@iset.uni-kassel.de

Wasserstoff – ein wichtiges Thema im ForschungsVerbund Sonnenenergie

Der FVS • ForschungsVerbund Sonnenenergie wurde vor 14 Jahren auf Initiative der Bundesregierung gegründet. Sein prioritäres Ziel war es, die erneuerbaren Energien zu erforschen und energiewirtschaftlich nutzbar zu machen. „Energiewirtschaftlich“ bedeutete dabei soviel wie „in großem Maßstab“, d. h. die Gründer wollten nicht nur Nischen besetzen, sondern erneuerbare Energien zu einem wesentlichen Pfeiler unserer Energieversorgung machen – unserer Energieversorgung in Deutschland und der Energieversorgung überall in der Welt. Dieses Ziel eint uns im ForschungsVerbund nach wie vor und wir sind stolz auf das zwischenzeitlich Erreichte und unseren Beitrag dabei.

Die Wasserstoff-Idee war schon bei der Gründung ein Teil der Vision, obwohl wir sicher zu jeder Zeit zu den Realisten gehörten, die sich über die Länge des Weges bis zum Erfolg klar waren. Diese Fragen bestimmten die mitunter auch kontroverse Diskussion:

- Brauchen Solar- und Windgeneratoren als stark intermittierend produzierende Stromquellen Wasserstoff als Zwischenspeicher zur Netzstabilisierung?
- Wird die Stromversorgung der Menschheit intersaisonale Stromspeicher brauchen, die Batterien überlegen sind?
- Ist ein indirekter interkontinentaler Stromtransport durch Wasserstoff-Pipelines trotz der zweimaligen Umwandlung günstiger als Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung?

Es ging also insbesondere um die Probleme intermittierender Stromquellen, intersaisonaler Speicherung und interkontinentalen Transports

von Strom oder jedenfalls hochwertiger Energie. Aber es ging auch schon um die Frage, welcher Kraftstoff denn eines Tages dem Verkehr zur Verfügung stehen würde, wenn die natürlich vorkommenden Kohlenwasserstoffe wie Erdöl und Erdgas nicht mehr oder nur extrem teuer zu haben sein würden.

Der solare Brüter

Die Wasserstoff-Idee ist schon relativ alt. Prof. Justi in Göttingen der 30er Jahre oder der AEG-Ingenieur Dahlberg aus den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts dürfen hier zitiert werden. Insbesondere Dahlberg entwickelte die Vision vom solaren Wasserstoff, der aus dem Sand der Sahara mit Hilfe der dortigen Solarenergie Europa versorgen sollte. Er sprach damals vom „solaren Brüter“, weil Solarenergie den Sand der Wüste zu Silizium reduzieren sollte und dieses Silizium wiederum als photovoltaische Zellen den Strom für die Silizium-Reduktion und die Wasserstoff-Produktion liefern sollte (*Abb. 1*).

Das HYSOLAR-Projekt

Mitte der 80er Jahre hatte das Forschungsministerium diese Idee aufgegriffen, nachdem der Reaktorunfall in Tschernobyl die Solarenergieforschung wieder in den Vordergrund politischen Interesses gerückt hatte. In einem spektakulären politischen Ansatz, zu dessen Vätern u.a. der damalige badenwürttembergische Ministerpräsident Lothar Späth und Prof. Bloss aus Stuttgart sowie Prof. Winter aus dem DLR • Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt gehörten, wurde das sogenannte HYSOLAR-Projekt ins Leben gerufen und ab 1986 gemeinsam von BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), dem Bundesland Baden-Württemberg und dem Königreich Saudi-Arabien gefördert. Die Projektleitung lag beim DLR, einem der vier Gründungsmitglieder des FVS 1990.

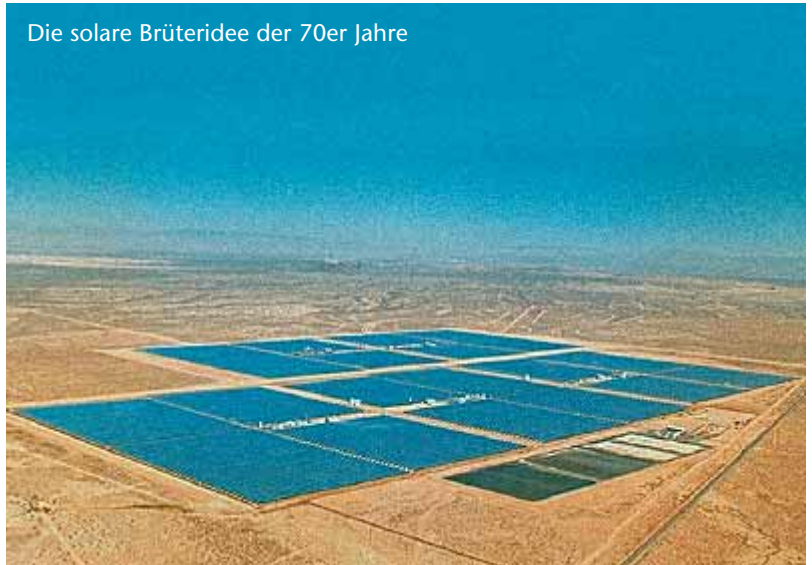
Hauptzweck des Projektes war es, heraus zu finden, ob das Zusammenschalten von photovoltaischen Generatoren und Elektrolyse auf einfache Weise technisch beherrscht werden kann. Dazu musste ein Elektrolyseur entwickelt werden, der auch bei den allnächtlichen Unterbrechungen Wasserstoff mit gutem Wirkungsgrad produzieren konnte. Außerdem wurden verschiedene andere Technologien der Wasserstoff-Erzeugung und Anwendung vor allem in den Universitäten Stuttgart, Riyad und Jeddah erforscht. Brennstoffzellen als Energiewandler von Wasserstoff zu Strom spielten erst ganz am Ende des HYSOLAR-Projektes eine Rolle.

Wasserstoff und Brennstoffzellen im FVS

Neben dem DLR haben auch andere Mitglieder des FVS auf dem Gebiet solaren Wasserstoffs gearbeitet, zum Beispiel das Forschungszentrum Jülich, wo Solarzellen auf dem Dach der Bibliothek den Strom für einen selbst entwickelten Elektrolyseur liefern. Für das ZSW • Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung war die HYSOLAR-Kooperation von DLR und der Universität Stuttgart eine der Gründungswurzeln und das Fraunhofer ISE • Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg hat frühzeitig kleine, dezentrale Solar-Wasserstoffsysteme entwickelt, z. B. für das berühmte erste energieautarke Haus in Freiburg.

In den frühen 90er Jahren wurde deutlich, dass Brennstoffzellen auf Grund fortgeschrittener Werkstoffwissenschaften, Fertigungs- und Verfahrenstechniken eine neue Chance zum Erfolg bieten. Daraufhin haben sich mehrere Mitgliedsinstitute, auch das ISET • Institut für Solare Energieversorgungstechniken in Kassel, den neuen Herausforderungen zugewandt. Dabei wurde im FZ Jülich und beim DLR an die erworbene hohe Kompetenz für Elektrochemie angeknüpft, denn eine Brennstoffzelle ist schließlich im Grundsatz eine umgekehrte Elektrolyse.

Die solare Brüteridee der 70er Jahre



Im DLR kamen auch Fragestellungen aus Weltraumanwendungen (autonome Versorgung von Weltraumplattformen) hinzu, während das Forschungszentrum Jülich vor allem seine beim Hochtemperatur-Reaktor erworbene Kompetenz für Hochtemperaturwerkstoffe nutzen konnte.

Die sich für Brennstoffzellen-Entwicklung engagierenden Forschungsinstitute des FVS lösten sich dabei ein Stück von der solaren Mission, denn die jetzt zu entwickelnden Systeme müssen sich zunächst in der „Erdgas-Welt“ von heute bewähren. Eine Entwicklung ist dabei die Hochtemperatur-Brennstoffzelle, weil sie eine mehr oder weniger interne Reformierung des Brenngases erlaubt, um den am Elektrolyten erforderlichen Wasserstoff bereit zu stellen. Dabei wandten sich DLR und FZ Jülich der SOFC¹ zu, während das ZSW an Problemen der MCFC² arbeitete.

Parallel dazu nahmen die Mitglieder des FVS die Entwicklung der Membran-Brennstoffzellen auf, die – mit Wasserstoff oder direkt mit Methanol betrieben – eine externe Bereitstellung dieser Brennstoffe erfordern. Dabei zielt die Entwicklungsstrategie der Forschungsgruppen nicht primär auf den Fahrzeugantrieb, wie ihn die großen Konzerne der Automobilindustrie mit hohem Aufwand anstreben, sondern eher auf kleinere dezentrale Anwendungen oder gar eine Mikroenergietechnik, die den Ersatz von Batterien in Notebooks und Kameras erlaubt.

Abbildung 1 zeigt ein Solarkraftwerk in Kalifornien, das heute auf thermischem Wege Strom produziert. In Zukunft könnten solche Kraftwerke auch Elektrolyse-Wasserstoff bereitstellen. In den 70er Jahren stellte man sich solche Anlagen als Photovoltaikkraftwerke vor, deren Strom teilweise unmittelbar zur Herstellung von Silizium und Solarzellen genutzt werden könnte.

¹ SOFC = Solid Oxid Fuel Cell

² MCFC = Molten Carbonate Fuel Cell

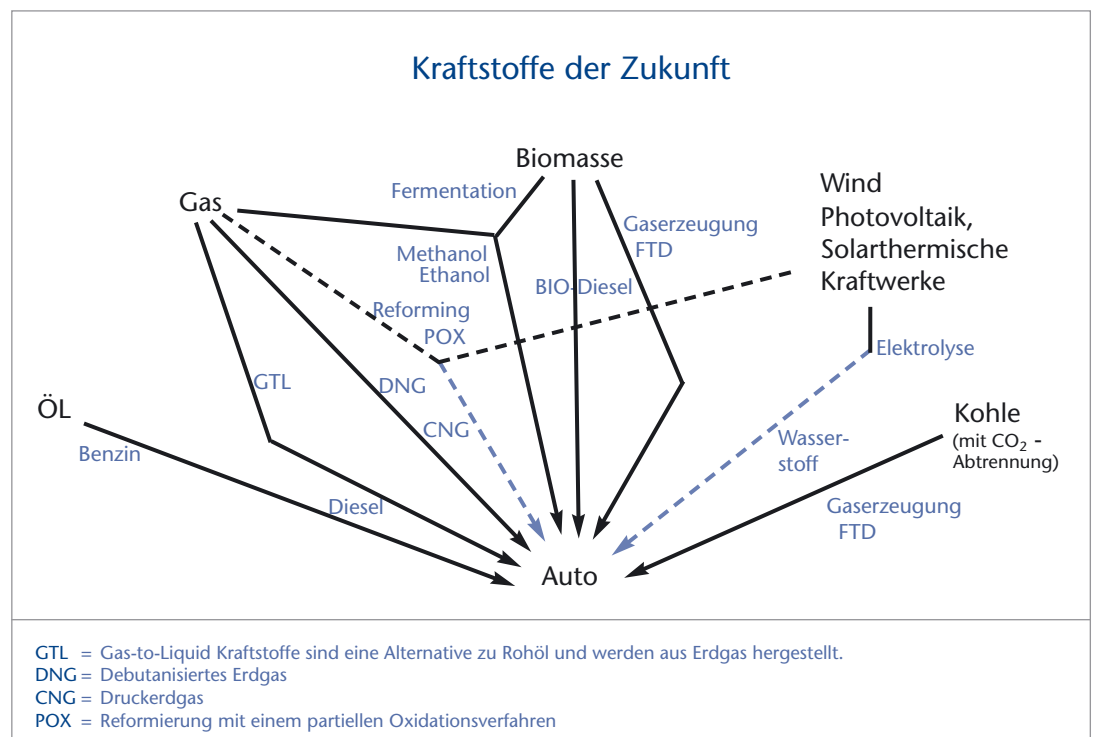
Ein wichtiges Thema des Forschungsverbundes Sonnenenergie ist auch die systemtechnische Herausforderung, Brennstoffzellen ebenso wie Photovoltaik- und Windanlagen so ins elektrische Versorgungsnetz einzubinden, dass Versorgungssicherheit und Frequenzstabilität gewährleistet sind. Hier liegt insbesondere eine Stärke des ISET sowie des Fraunhofer ISE.

Wasserstoff-Energiepolitik und Klimaschutz

Heute ist Wasserstoff wieder ein politisches Thema, und zwar auf der globalen Agenda von Staatspräsidenten. Das überraschte in Deutschland; denn hierzulande galt das Thema in Politik und Forschung nicht als aktuell. Nach den Erfahrungen mit dem Projekt HYSOLAR und dem Großprojekt Solar-Wasserstoff-Bayern schien den Unternehmen und auch den solar engagierten Politikern die Angelegenheit genügend klar: wenn man wegen des notwendigen Klimaschutzes Wasserstoff mittels erneuerbarer Energien gewinnen will, muss man warten, bis diese erneuerbaren Energien entsprechend kostengünstig sind.

Allerdings geht es heute nicht allein um Klimaschutz, sondern auch um die Versorgung mit Kraftstoffen für den Verkehr. Schon seit den 70er Jahren waren Energieforschung und energietechnische Innovationen auch von der Erwartung bestimmt, insbesondere Erdöl werde über die nächsten Jahrzehnte knapp und sehr teuer werden. Hier standen sich stets – und auch heute wieder – unterschiedliche Einschätzungen gegenüber. Global tätige Ölfirmen weisen gerne darauf hin, dass Öl reichlich vorhanden sei und die immer wieder genannten 30 Jahre Reichweite der Vorräte lediglich eine Folge marktbedingt beschränkter Aufwendungen für Prospektion und Exploration seien. Selbst die Preisanstiege dieses Herbstes werden nicht so dramatisch interpretiert, wie dies eine andere Gruppe von Fachleuten tut, nämlich als klares Zeichen, dass Ölförderung schon recht bald zurückgehen werde. Diese Gruppe verweist zusätzlich auf die steigenden Bedürfnisse insbesondere in Ostasien, die den Ölmarkt weiter anspannen und die Preise ansteigen lassen müssten. Beim Thema Wasserstoff geht es allerdings nicht um den Ersatz der Primärenergiequelle Erdöl, sondern um den Ersatz der Sekundärenergieträger Benzin, Diesel und Kerosin, von denen der Verkehr abhängt (Abb. 2).

Abbildung 2
Primärenergiequellen für Fahrzeugkraftstoffe: links die konventionellen Wege vom Rohöl zu Benzin und Diesel, halbrechts die erneuerbaren Energien als Stromlieferanten für Elektrolyse-Wasserstoff und ganz rechts Fischer-Tropsch-Diesel (FTD) aus Kohle.



Forschungsstrategie des FVS

Zwei Fragen sind also entscheidend für die Beurteilung des Wasserstoffthemas und seiner Dringlichkeit:

- Wie ökologisch, wirtschaftlich und zeitlich drängend ist die Situation der Erdölversorgung?
- Welche Kraftstoffe stehen bei Rückgang und Verteuerung der Ölversorgung zur Verfügung?

Der ForschungsVerbund Sonnenenergie nimmt beide Fragen sehr ernst und möchte mit seinen wissenschaftlichen Möglichkeiten an Lösungen mitarbeiten, die die Risiken mindern und insbesondere die erneuerbaren Energien als kostengünstige Energiequelle erschließen. Er hat die Wasserstofffrage aufgenommen und sich forschungsstrategisch mit den folgenden sechs Thesen positioniert:

1. Der ForschungsVerbund Sonnenenergie konzentriert seine Forschungsarbeiten auf die volle Erschließung erneuerbarer Energiequellen. Da aus heutiger Sicht eine sehr umfangreiche Nutzung erneuerbarer Energien ihre Speicherung auch in Wasserstoff erforderlich macht, ist die Wasserstofftechnik ein Teil seiner Arbeiten.
2. Die Gewinnung von Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien stellt anspruchsvollere Anforderungen an kostensenkende Entwicklungen, als ihr Vordringen in den Strom- und Wärmemarkt. Auch der ForschungsVerbund Sonnenenergie entwickelt regenerative Kraftstoffe, wobei Wasserstoff hierbei eine Option ist, sowohl für die direkte Nutzung als auch als Einsatzstoff für synthetische Kraftstoffe.
3. Brennstoffzellen als besonders vielversprechende Konversionstechnologie benötigen für die elektrochemischen Umwandlungsprozesse Wasserstoff. Hochtemperaturbrennstoffzellen können wegen ihres internen Reformings unmittelbar auf Erdgasversorgungssysteme zugreifen. Für Niedertemperatur-Brennstoffzellensysteme ist eine Wasserstoffversorgung erforderlich.
4. Der ForschungsVerbund Sonnenenergie erforscht mit besonderer Priorität die Systemzusammenhänge von Wasserstofftechniken auf der Basis erneuerbarer Energien. Dabei wird in den Arbeitsergebnissen immer wieder deutlich, dass regenerativer Wasserstoff erst dann zu vertretbaren Kosten bereitgestellt werden kann, wenn die direkte Nutzung der erneuerbaren Energien durch konzentrierte strategische Forschung deutlich verbilligt worden ist; dies wird am Beispiel von Elektrolysewasserstoff aus regenerativem Strom unmittelbar sichtbar.
5. Der ForschungsVerbund Sonnenenergie befürwortet und betreibt verfahrenstechnische Forschung zur Erzeugung regenerativer Kraftstoffe und Wasserstoff aus Biomasse. Er weist allerdings aufgrund seiner systemanalytischen Forschungsergebnisse darauf hin, dass die Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse technisch, wirtschaftlich und ökologisch vorteilhafter ist als die Erzeugung von Biokraftstoffen. Insofern können Forschungsergebnisse im Bereich regenerativer Kraftstoffe nur dann umgesetzt werden, wenn politische Rahmenbedingungen den Biomasseeinsatz auf den weniger wirtschaftlichen Kraftstoffmarkt kanalisieren, wie dies gegenwärtig mit der obligatorischen EU-Quote für Alternativkraftstoffe geschieht.
6. Zusammengefasst begrüßt der ForschungsVerbund Sonnenenergie das gestiegene Interesse von Öffentlichkeit und Politik an erneuerbaren Energien und Brennstoffzellen. Forschungspolitisch sollte die notwendige Kostensenkung bei der Nutzung erneuerbarer Energien allerdings höchste Priorität haben. Der FVS rät, den Weg in eine regenerativ-orientierte Energiewirtschaft konsequent zu verfolgen, wobei Strom und Wasserstoff eine wesentliche Rolle als Endenergieträger spielen – in Verbindung mit effektiven Energiewandlern, insbesondere Brennstoffzellen. Er unterstreicht den großen Forschungs- und Entwicklungsbedarf, der auch Wasserstoffsysteme umfasst.

Mit dieser Positionierung weist der Forschungs-Verbund Sonnenenergie klar auf die Bedeutung der erneuerbaren Energien als Energiequellen und auf die Bedeutung von Brennstoffzellen als effiziente Wandler hin.

Internationale Perspektiven

Niemand sollte bei der Nachahmung von Politiken anderer Länder übersehen, dass nicht überall ein klarer Beitrag zum Klimaschutz im Vordergrund steht und dass andere wirtschaftsstarke Staaten der Erde den Wasserstoff eher als Produkt von Kernreaktoren sehen als von Sonnenenergie.

Insbesondere die USA setzen auch langfristig auf ihre heimischen Kohlevorräte und haben jedenfalls im Moment keine besonderen Akzeptanzprobleme mit der Kernenergie. Die USA streben nicht in erster Linie Klimaschutz an, sondern wollen kontinentale Versorgungsunabhängigkeit. Fossil und nuklear erzeugter Wasserstoff soll diese Versorgungssicherheit insbesondere für den Verkehrssektor garantieren und die Kraftstoffpreise niedrig halten. Für Präsident Bush ist Wasserstoff kein Mittel zum Klimaschutz, sondern ein Mittel zur Autarkie, verbunden mit dem industriepolitischen Ziel, die von der Brennstoffzelle erwarteten Innovationen als Marktführer zu beherrschen.

Japan verfügt über keine nennenswerten fossilen Energiequellen. Daher zieht es alle Versorgungsoptionen in Betracht, wobei die Diversifikation der Bezugsquellen als Element der Absicherung gesehen wird. Da Akzeptanzprobleme der Kernenergie nicht als entscheidend betrachtet werden, könnte Wasserstoff aus Kernkraftwerken gewonnen werden. Zudem braucht Japans Fahrzeug-Industrie den US-Markt, muss also die dort verlangten Lösungen wettbewerbsfähig anbieten können. Wie den USA dürfte es auch Japan um die Führung bei Brennstoffzellen als innovatives Schlüsselprodukt der Zukunft gehen.

In Europa gibt es nicht genug Kohle, um den Strom und den Kraftstoffmarkt zu bedienen. Außerdem ist man über Kernenergie sehr kontroverser Auffassung. Klimaschutz ist auf EU-Ebene

und erst recht in Deutschland ein prioritäres Anliegen, das man anders als in den USA mittels Einsparungen, erneuerbaren Energien und Kyoto-Instrumenten verfolgt, die die Volkswirtschaften aktuell finanziell belasten, auch wenn später Klimafolgekosten global vermindert werden. Allerdings gilt für die europäische Fahrzeug-Industrie dasselbe wie für die japanische: auch europäische Hersteller müssen sich auf dem US-Markt durchsetzen, also Fahrzeuge mit Elektro- oder Wasserstoff-Antrieb anbieten.

Vor diesem Hintergrund ist es richtig, dass Europa der Entwicklung der Brennstoffzellentechnik hohe Priorität einräumt und auch die Schlüsselfragen der Wasserstofftechnik in Forschungs- und Entwicklungsprogrammen aufgreift. Dabei kommt der Speicherfrage besondere Bedeutung bei, denn klar und provokativ formuliert:

Mit elektrischem Strom kann man fast alles auch direkt machen, sauber und rückstandsfrei. Wasserstoff wird nur benötigt, soweit er trotz der Umwandlungsverluste bessere Speicherung bietet, wie sie insbesondere im Verkehr, aber auch bei Kleingeräten sehr wünschenswert wäre. Der Verbraucher möchte in einer erdölfreien Zukunft sicher nicht den Beschränkungen in Reichweite eines Fahrzeugs oder Nutzungsdauer eines elektronischen Kleingerätes ausgesetzt sein, die wir von den elektrischen Batterien kennen. Allerdings: wird er die Vorteile von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Lösungen mit den Mehrkosten abwägen. Auch die neuen Lösungen müssen also preiswert sein.

Das Wasserstoffsystem und seine Forschungs- und Entwicklungsthemen

Im Folgenden seien einige wesentliche Zusammenhänge anhand von Systembildern erläutert.

Wer Wasserstoff einsetzen will, muss ihn zunächst erzeugen. Wer dies in so großem Maßstab tun will, dass der Verkehrssektor versorgt werden kann, muss letztlich Wasser spalten, denn die Alternative Erdgas ist ebenso wenig nachhaltig wie das schwindende Öl und die

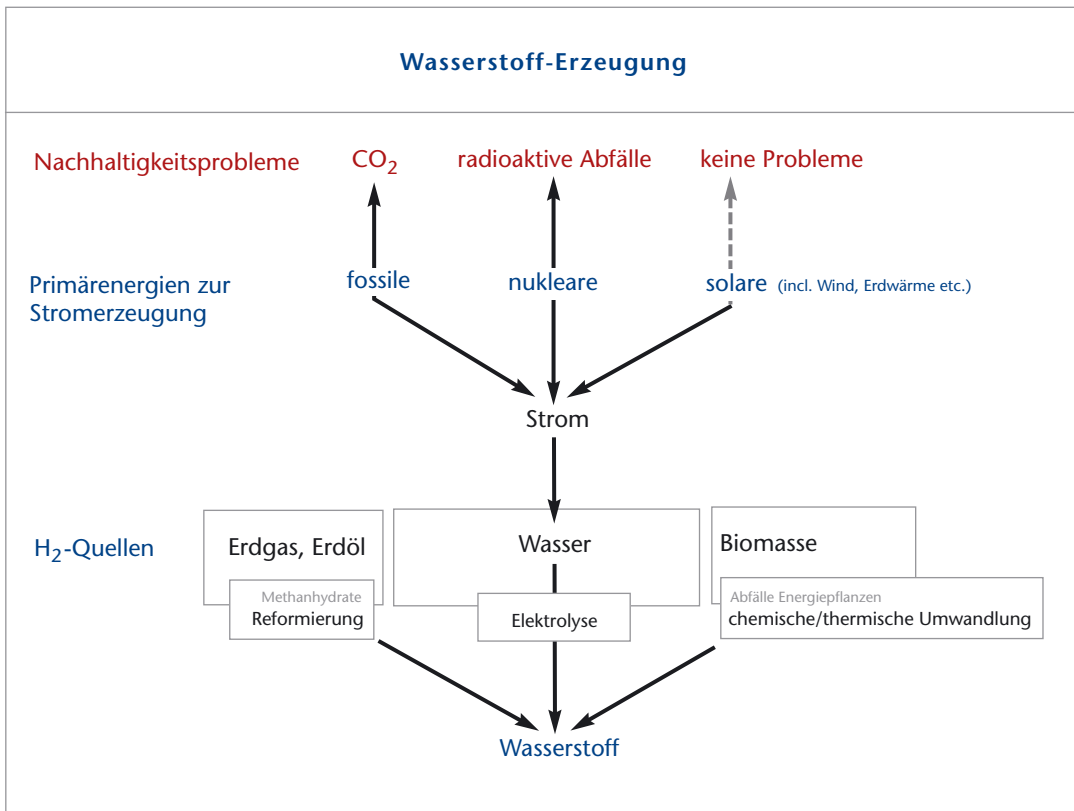


Abbildung 3 zeigt, wie Wasserstoff durch Einsatz verschiedener Primärenergiequellen aus seinen natürlichen Verbindungen gewonnen werden kann. Dabei sind die fossilen H₂-Quellen wie Erdgas und Erdöl (links) und Biomasse (rechts) nur beschränkt verfügbar. In der obersten Zeile ist vermerkt, welche ökologischen Nachhaltigkeitsprobleme diese Energiequelle haben.

Alternative energetische Biomasse bietet quantitativ nicht genug Potenzial (Abb. 3).

Mittelfristig ist es sinnvoller, Biomasse im Strom- und Wärmemarkt zur Verdrängung der dort eingesetzten Kohlenwasserstoffe zu nutzen. Insofern ist kritisch zu bewerten, wenn die EU bis 2010 eine Beimischung von 5,75% Biokraftstoff in Benzin und Diesel verordnet. Aber auch diese Strategie zur Entlastung des Kraftstoffmarktes ist ökonomisch und ökologisch noch günstiger als eine Biomasse-Konversion zu Wasserstoff.

Aus heutiger Sicht ist die Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse die Referenztechnologie, mit der wahrscheinlich besten Wirtschaftlichkeit. Ob diese Einschätzung gerechtfertigt ist, muss allerdings in Forschung und Entwicklung noch geklärt werden. Die Alternativen sind thermochemische Verfahren der Wasserspaltung bei hohen Temperaturen, aber auch biologische oder photochemische Verfahren, deren Erforschung noch bei weitem nicht abgeschlossen ist.

In der Wasserstoff-Anwendung sollten nach unseren Erwartungen im Forschungsverbund Sonnenenergie Brennstoffzellen eine überragende Bedeutung erlangen, sowohl in Kleinanwendungen als Batterieersatz wie auch im Verkehr zunächst als Ersatz der Lichtmaschine und dann auch im Antrieb. Allerdings sind weder Wasserstoff noch Brennstoffzellen in diesen Anwendungen konkurrenzlos. Bei Kleinanwendungen kann auch Methanol als Energieträger und eine Direkt-Methanol-Brennstoffzelle eingesetzt werden und die herkömmliche Batterie mag auch noch ein gewisses Verbesserungspotenzial haben. Es ist aber zu erwarten, dass die Brennstoffzellen in diesem Kleingerätebereich erste Märkte finden werden, die für das industrielle Lernen große Bedeutung haben. Hilfsstromquellen auf Brennstoffzellenbasis (APUs)¹ werden eine zweite frühe Marktchance bieten, zumal bei beiden Frühwendungen die energiewirtschaftliche Verfügbarkeit von kostengünstigem Wasserstoff noch keine Rolle spielt.

¹ APU = Auxillary Power Unit

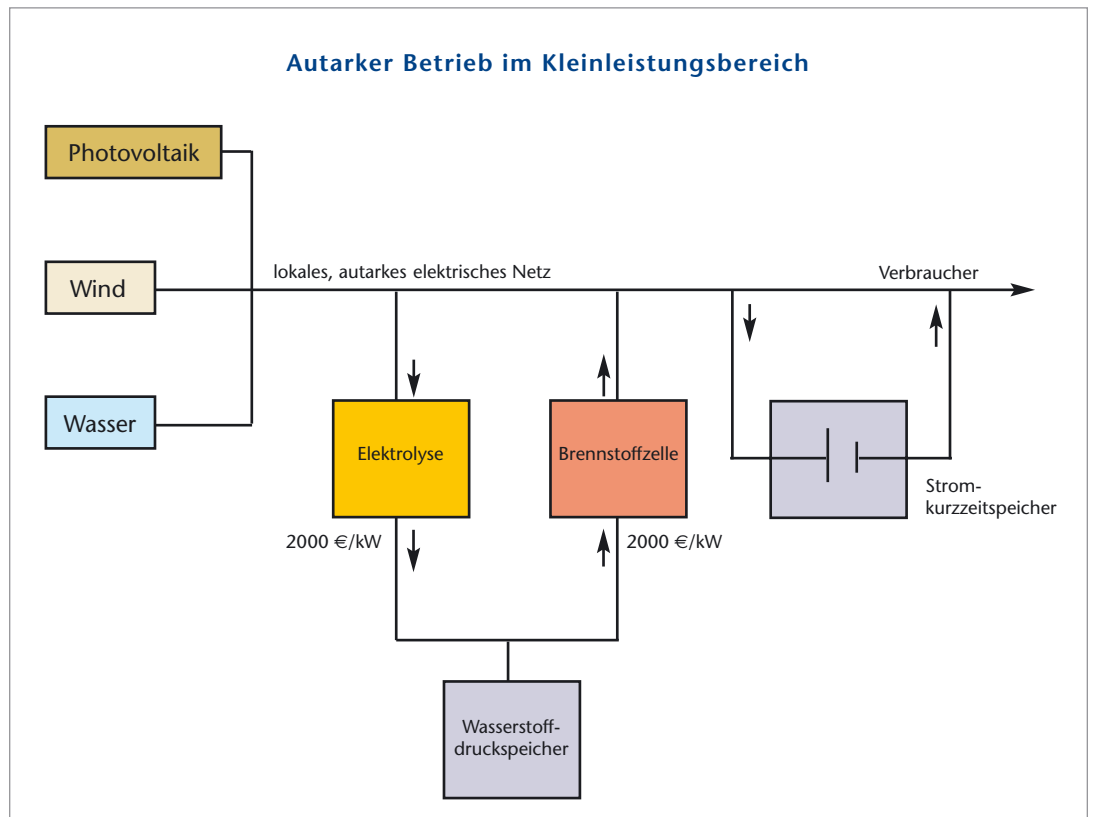


Abbildung 4 zeigt, wie erneuerbar erzeugter Strom im Bedarfsfall über einen Elektrolyseur als Wasserstoff gespeichert und über eine Brennstoffzelle ins Netz zurückgespeist werden kann.

Diskutiert wird auch die Vorstellung von Elektrolyse-Brennstoffzellen-Systemen im Netzmanagement. Ein solches Wasserstoffsystem muss aber mit anderen Lösungen, z. B. Pumpspeichern oder Druckluftspeichern (CAES) konkurrieren, wobei Kosten und Wirkungsgrade entscheiden werden. Andererseits muss darauf hingewiesen werden, dass solche Zwischenspeicher vorteilhafterweise beide Produktgase der Elektrolyse, also Wasserstoff und Sauerstoff, am selben Ort speichern. Über Brennstoffzellen (oder Gasturbinen und Motoren) werden sie dann wieder in Strom zurück verwandelt. Solche Systeme bieten aber quantitativ nichts Wesentliches für weitergehende Verwendungen, wie etwa im Verkehr, an. Sollte man allerdings für die Kraftstoffversorgung des Verkehrs in ganz anderen Dimensionen Wasserstoff über Elektrolyse herstellen müssen, wäre die Netzstabilisierungsfunktion ein eleganter Nebeneffekt für einen entsprechend geregelten Elektrolyseurbetrieb (Abb. 4).

Auch die Vorstellung von wasserstoffversorgten Brennstoffzellen in unseren Kellern zur Heizung der Wohnräume zur Warmwasserversorgung muss kritisch diskutiert werden, wenn wir an-

nehmen müssen, dass der Wasserstoff mittels erneuerbaren Stroms gewonnen wird. Dann nämlich wird man auf jeden Fall mit direktem Stromeinsatz besser fahren (Abb. 5).

Brennstoffzellen müssen allerdings nicht auf eine energiewirtschaftliche Wasserstoffversorgung warten; sie sind insbesondere in den Hochtemperaturversionen SOFC und MCFC auch mit Erdgas zu betreiben, ohne externe Reformer vorzuschalten. Deshalb entwickeln wir im Forschungsverbund Sonnenenergie Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit großem Aufwand. Sie versprechen gute Wirkungsgrade auf Erdgasbasis und werden noch effizienter, wenn sie eines Tages mit Wasserstoff betrieben werden.

Membran-Brennstoffzellen niedriger Betriebstemperatur müssen in der Erdgaswelt zunächst Reformer vorschalten, um dann den so erzeugten Wasserstoff nutzen zu können. Für den Klimaschutz kann dies gleichwohl ein Vorteil sein, wenn ein hoher Brennstoffzellen-Wirkungsgrad die vorausgehenden Umwandlungsverluste überkompensiert.

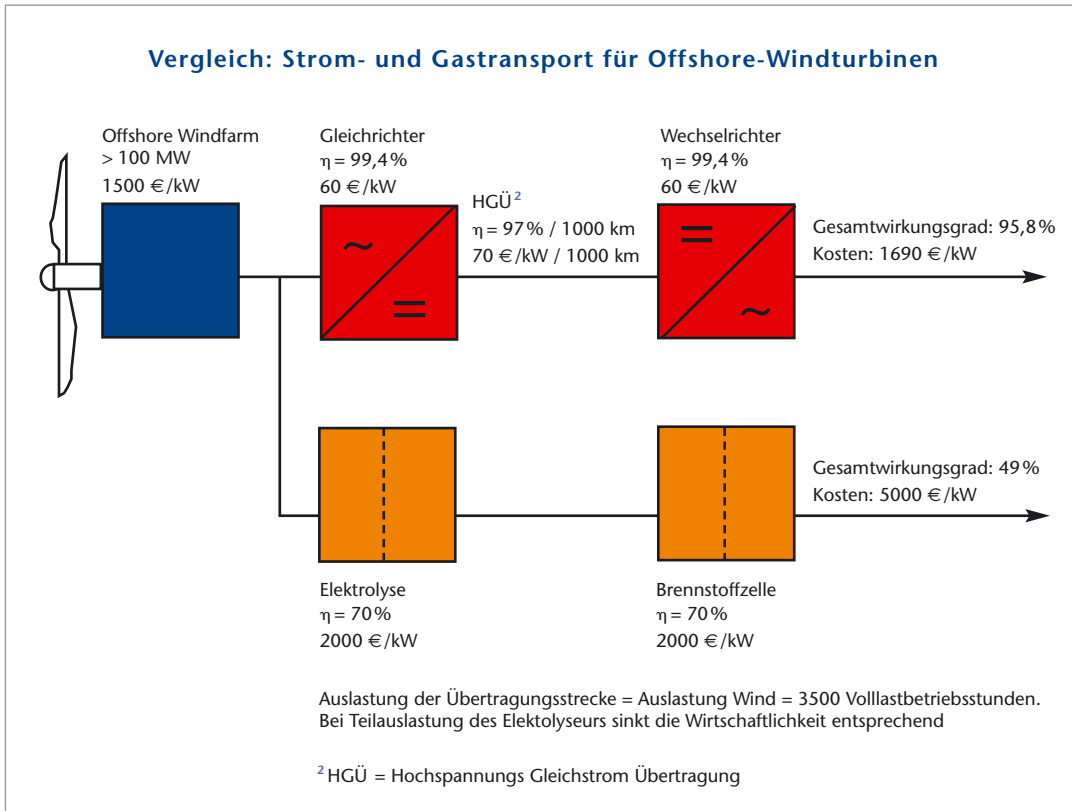


Abbildung 5 zeigt am Beispiel einer Offshore Windstromerzeugung, dass direkter Stromeinsatz günstiger ist als ein Umweg über Wasserstoff, falls nicht die Notwendigkeit zu speichern besteht.

Und in Kleingeräten dürften sich die schon erwähnten ersten Märkte aus dem großen Nutzungsvorteil solcher Systeme ergeben. Deshalb entwickeln wir im Forschungsverbund Sonnenenergie auch diese Brennstoffzellentypen mit Nachdruck und kümmern uns um die Technologien einer entsprechenden Wasserstoffbereitstellung.

Wenn die so skizzierte Entwicklungs- und Markteinführungsstrategie zunächst auf Erdgasbasis gelingt, ist nicht nur eine Brücke in die Zukunft geschlagen, in der Wasserstoff dann eine größere infrastrukturelle Rolle spielen könnte; vielmehr wäre dies ein Innovationsschritt von größter Tragweite für den Fahrzeug- und Motorenbau.

Netzmanagement und Integration von Brennstoffzellen

Prof. Dr.
Jürgen Schmid
ISET
jschmid@iset.uni-kassel.de

Dr. Tim Meyer
Fraunhofer ISE
tim.meyer@ise.fraunhofer.de

Dr. Ludwig Jörissen
ZSW
ludwig.joerissen@zsw-
bw.de

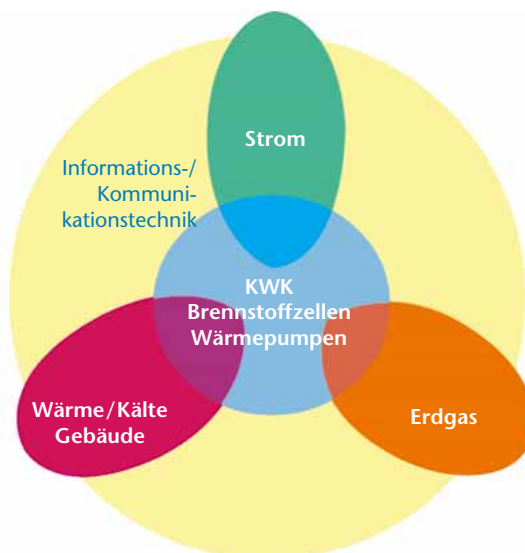
Auf dem Weg zu einer nachhaltigen also auch ökonomischen Energiewirtschaft steht neben dem effizienten Umgang mit Energie die Entwicklung und der zunehmende Einsatz regenerativer Energietechnologien im Mittelpunkt, wie beispielsweise Photovoltaik, Windenergie, Wasserkraft, Solar- und Geothermie oder auch die Nutzung von Biomasse. Es besteht die begründete Aussicht, dass sich mittel- bis langfristig ein Umbau unserer jetzigen Energiewirtschaft, die überwiegend auf fossilen Kohlenwasserstoffen basiert, hin zu einer solaren Stromwirtschaft vollzieht. Dabei kann sich in zunehmendem Maße die Brennstoffzellentechnologie insbesondere im Verkehr sowie in der dezentralen stationären Strom- und Wärmeerzeugung (auf Basis von Erdgas) entwickeln. Parallel dazu gewinnen Brennstoffzellensysteme im niedrigen Leistungsbereich für netzferne und portable Anwendungen an Bedeutung. Letztere auch als Wegbereiter von Systemen in höheren Leistungsklassen.

Stationäre dezentrale Energiewandlung

Mit Brennstoffzellen können hohe Wirkungsgrade bei der Wandlung chemischer Energieträger wie Erdgas oder Wasserstoff in elektrischen Strom und Wärme erreicht werden. Dabei fallen bei Wasserstoff praktisch keine Schadstoff-Emissionen an. Aus einzelnen Zellen lassen sich leistungsangepasst Stapel zusammensetzen, mit denen kleinste Versorgungseinheiten für Geräte bis hin zu Systemen für die Hausversorgung oder für mobile Anwendungen aufgebaut werden können. Brennstoffzellensysteme bieten daher den großen Vorteil, dass sie sich der Versorgungsaufgabe anpassen und dezentral einsetzen lassen.

Für den stationären Einsatz zur kombinierten Stromerzeugung und Wärmebereitstellung in Gebäuden wird der Erfolg der Brennstoffzellentechnik insbesondere davon abhängen, wie gut und vor allem zuverlässig sich die neuen Versorgungsaggregate in bestehende Netz- und Gebäudeinfrastrukturen integrieren lassen. Dabei gilt es die spezifischen Randbedingungen für Gebäude, Gasversorgung und Stromnetz zu berücksichtigen und alle Schnittstellen über kostengünstige Informations- und Kommunikationstechniken für übergeordnete Handlungsstrukturen des zukünftigen Energiehandels verfügbar zu machen (Abb. 1).

Abbildung 1
Vernetzung der
Infrastrukturen zur
Integration von Brennstoffzellensystemen
in Gebäude
(Quelle: Fraunhofer ISE)



Integration in die Gebäude

Etwa ein Drittel der CO₂-Emissionen in Deutschland werden durch die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme verursacht. Über 80% davon ist dem Raumwärmebedarf im Wohngebäudebestand zuzuordnen. Durch verschiedene Entwicklungen der rationellen Energienutzung lässt sich dieser deutlich senken (Abb. 2).

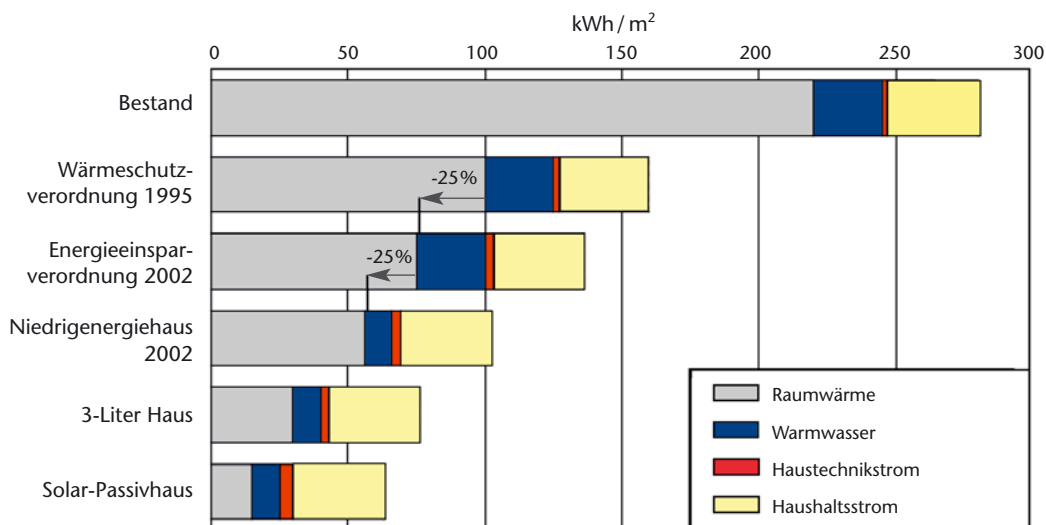


Abbildung 2
Energiebedarf von Wohngebäuden: Endenergie in kWh/m²
(Quelle: Fraunhofer ISE)

Während Niedrigenergiehäuser im Neubau mittlerweile zum Standard zählen, setzen sich auch weitreichende Maßnahmen wie 3-Liter- oder Passiv-Häuser hier und da durch. Eine besondere Herausforderung bei der rationellen Energienutzung sind Renovierungen im Gebäudebestand.

Der mittlere elektrische Leistungsbedarf eines durchschnittlichen Haushalts beträgt zwischen 500 und 1000 Watt. Ein darauf ausgelegtes Aggregat führt für Niedrigenergiehäuser ungefähr zu einer ausgeglichenen Energiebilanz. Höhere Leistungsanforderungen werden sich wirtschaftlich am günstigsten über das Stromnetz bereitstellen lassen. Für eine zusätzliche Wärmeversorgung müssen dann beispielsweise zusätzliche Spitzenlastkessel installiert werden.

Systemstrukturen und Schnittstellen

Verfügbare Brennstoffzellenarten lassen sich grundsätzlich durch unterschiedliche Betriebstemperaturen von 80 bis 1000°C unterscheiden, wobei der elektrische Wirkungsgrad mit der Temperatur steigt (Abb. 3). Der Betrieb mit Erdgas erfordert eine vorgelagerte Reformierung die bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen teilweise in der Brennstoffzelle selbst abläuft. Die Komplexität des Gasprozesses zur Gewinnung von Wasserstoff aus Erd- oder Biogas und Beseitigung von systemschädigenden Bestandteilen wie beispielsweise Schwefel nimmt mit fallenden Betriebstemperaturen der Brennstoffzelle zu.

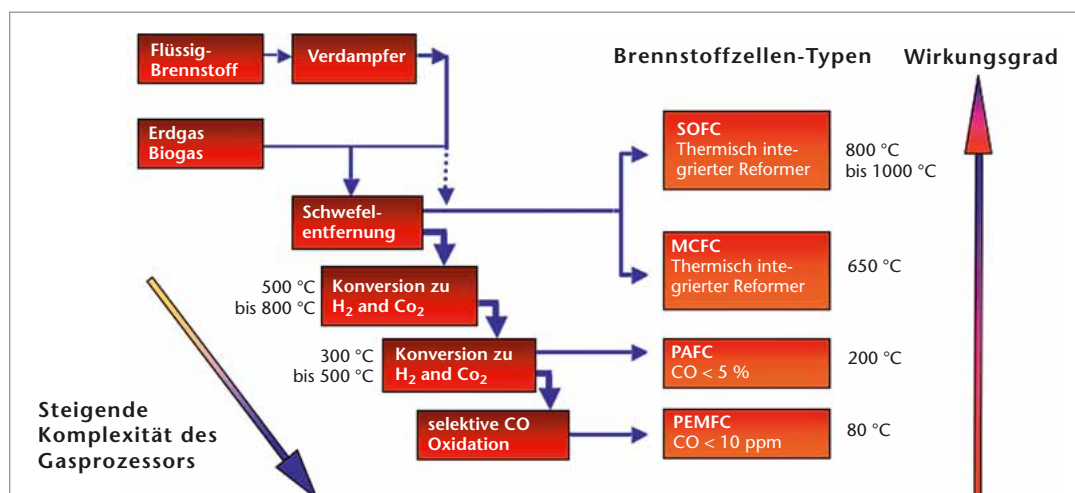


Abbildung 3
Grundlegende Zusammenhänge verschiedener Brennstoffzellentypen und der erforderlichen Gasprozessortechnik
(Quelle: ZSW) [1]

In einem kompletten Niedertemperatursystem sind einer PEM-Brennstoffzelle ein Verdichter, ein Reformer, ein zum Teil zweistufiger Shiftreaktor sowie eine Feinreinigung zur CO-Entfernung vorgelagert (Abb. 4). Über einen oder mehrere Wärmetauscher wird die Nutzwärme ausgekoppelt und das thermische Management realisiert.

Der Anschluss an das Stromnetz erfolgt über Wechselrichter, die die Gleichspannung und den Gleichstrom in die üblichen Wechselgrößen des Versorgungsnetzes umwandeln.

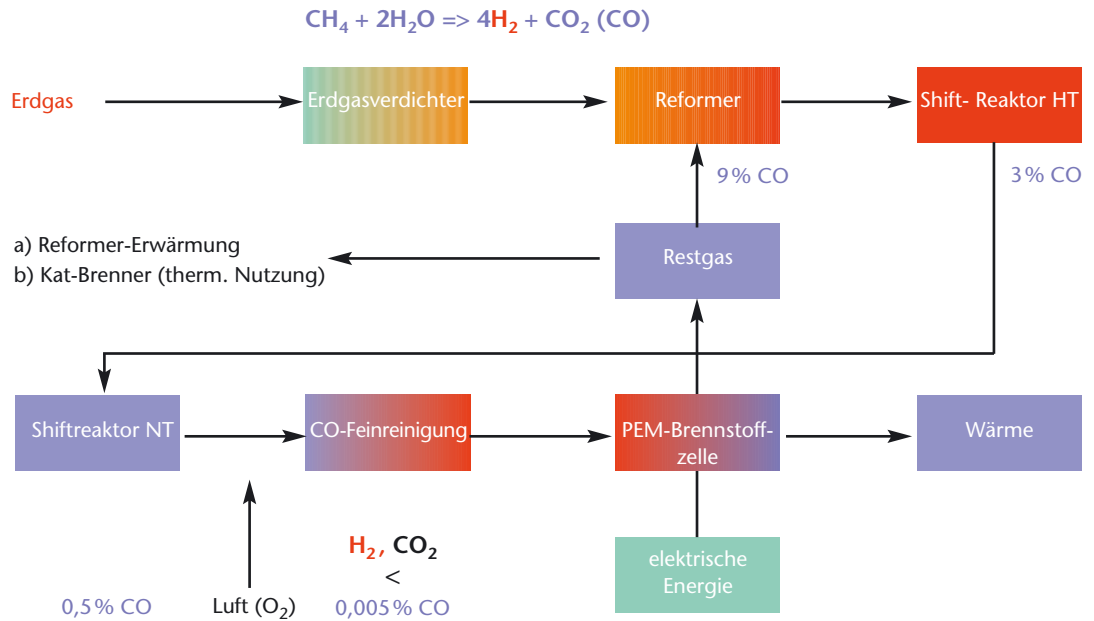


Abbildung 4 Systemstruktur und Schnittstellen eines Niedertemperatur-Brennstoffzellensystems einschließlich Gasprozessor (Quelle: ZSW)

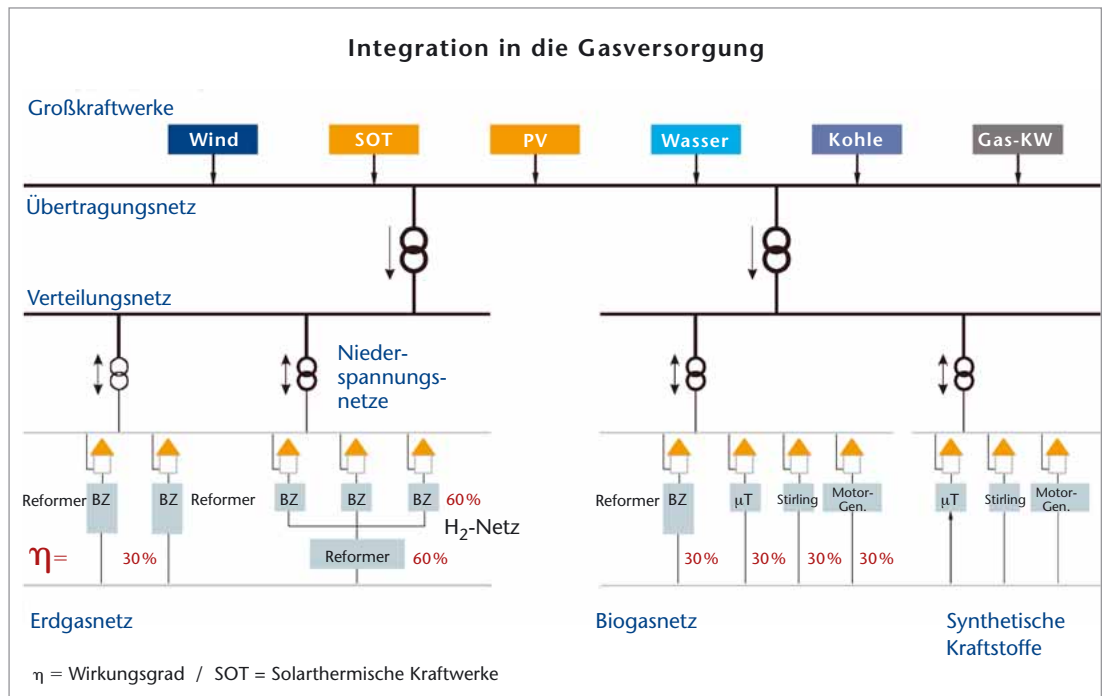


Abbildung 5 Vernetzungsoptionen auf Strom- und Gas ebene mit zentralen Kraftwerken und dezentralen Einheiten wie Brennstoffzellen (BZ) und anderen Kraft-Wärme-Kopplungsaggregaten (Motor-Generatoren, Mikrogasturbinen (μT), Stirlingmotoren) (Quelle: ISET)

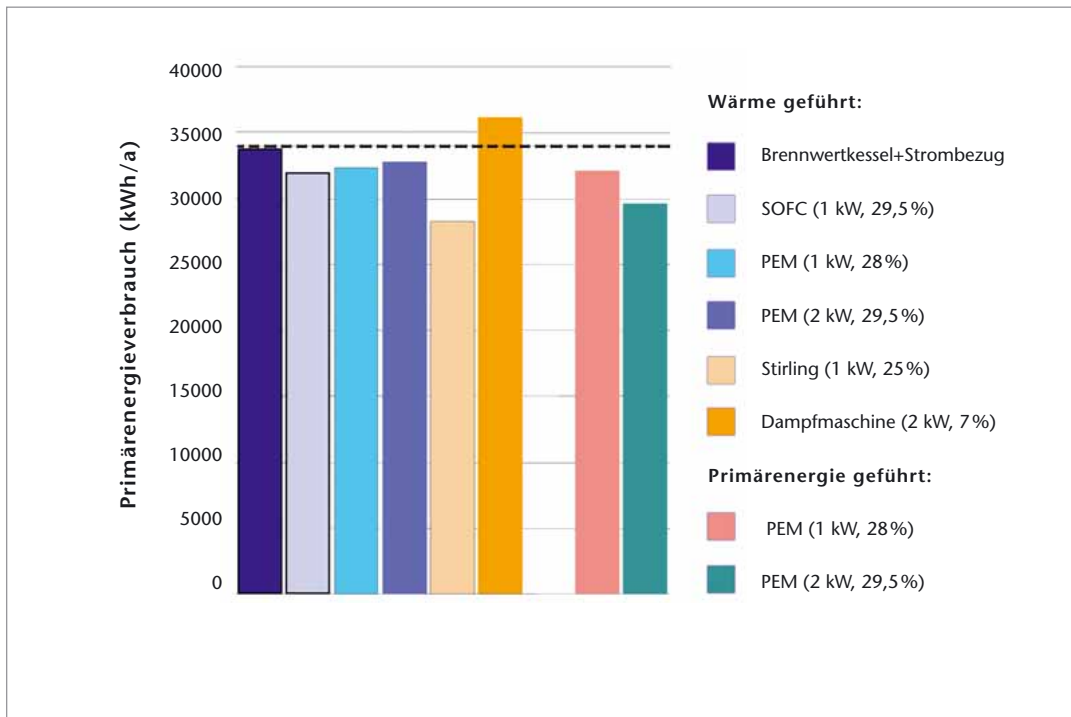


Abbildung 6
Exemplarischer
Systemvergleich
verschiedener KWK-
Aggregate am
Beispiel eines
Einfamilienhauses
(Quelle: Fraunhofer ISE)

Integration in die Gasversorgung

Brennstoffzellen benötigen ein wasserstoffhaltiges Gas, das in der heutigen Infrastruktur zur Gebäudeversorgung nicht direkt verfügbar ist. Während für Hochtemperatur-Brennstoffzellen Methan und CO zulässig und nutzbar ist, wirkt in Niedertemperatur-Brennstoffzellenzellen CO als Katalysatorgift und Methan lässt sich darin nicht direkt nutzen.

Aus Erdgas kann Wasserstoff durch die bereits angesprochene Reformierung von Kohlenwasserstoffen gewonnen werden. Dezentrale Reformer, die sich direkt am Brennstoffzellenaggregat befinden, müssen auch thermisch in das Gesamtsystem eingekoppelt sein. Jedoch senkt der Energiebedarf für solche integrierte Kleinstreformer den elektrischen Wirkungsgrad des Gesamtsystems auf etwa 30% (Abb. 5). Damit müssen sich Brennstoffzellensysteme gegen andere teilweise bereits etablierte Kraft-Wärme-Kopplungstechniken durchsetzen, die ähnliche Stromeffizienzen aufweisen [2].

Eine interessante Option sind große Reformer mit höheren Wandlungsgraden (geringere Wärmeverluste), denen ein sogenanntes Mikro-Wasserstoffnetz nachgelagert ist. Darin werden dann mehrere Aggregate betrieben. Der bessere Gesamtwirkungsgrad ist aber nur gewährleistet, wenn die Abwärme des Reformers weitgehend genutzt wird, z. B. als Prozesswärme oder über Absorptions-Kältemaschinen.

Ohne Ankopplung an Leitungsnetze lässt sich Wasserstoff vor Ort in Druckspeichern oder Flüssigwasserstofftanks bereit halten.

Systemvergleich

Ein Vergleich verschiedener Kraft-Wärme-Kopplungs-Aggregate für Einfamilienhäuser (Abb. 6) belegt, dass der Primärenergieeinsatz gegenüber dem klassischen Strombezug aus dem Netz und die Wärmebereitstellung über einen modernen Brennwertkessel nicht unbedingt geringer ausfällt. Bei zu geringen elektrischen Wirkungsgraden kann er sogar darüber liegen. Neben einer grundlegenden Verbesserung der Technik können hier neue primärenergiegeführte Regelungskonzepte Vorteile bringen.

Integration in die Stromverteilungsnetze

Brennstoffzellensysteme werden über den Hausanschluss in das öffentliche Wechselspannungsnetz (400V/230V, 50Hz) eingebunden. Moderne Wechselrichter formen aus Gleichstrom durch hochfrequentes modulierte Ein- und Ausschalten von Leistungstransistoren sinusförmige Ausgangsspannungen und Ströme. Zur Anpassung der geringen Eingangsspannungen sind zusätzlich Transformatoren erforderlich. Die Qualität der Netzgrößen bleibt dabei erhalten. Mit entsprechenden Regelverfahren lässt sich sogar eine Steigerung der Netzqualität erreichen.

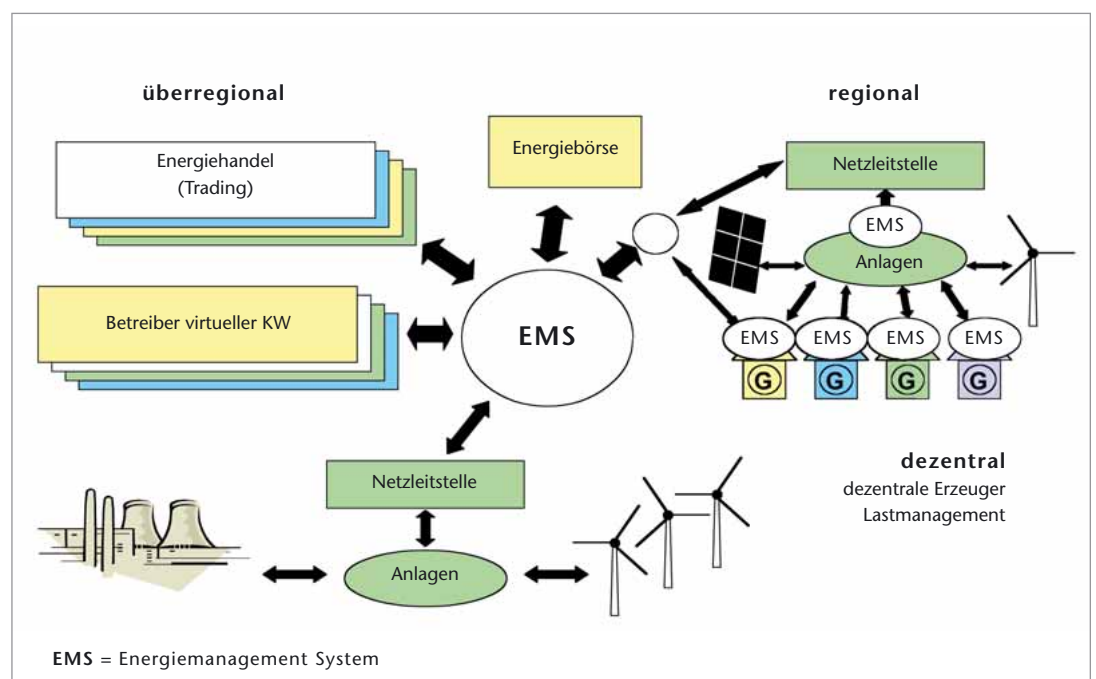
Eine interessante Option ist, einen kleinen elektrochemischen Speicher in das Wechselrichtersystem zu integrieren. Zusätzliche Steuerungs- und Regelungsfunktionen würden damit den Inselbetrieb und so die zusätzliche Dienstleistung eines Ersatzbetriebes bei Netzausfällen für die wichtigsten Verbraucher ermöglichen.

In der historisch gewachsenen Infrastruktur der Stromversorgung wird die in großen zentralen Kraftwerken erzeugte Energie über Hochspannungstrassen in die Verbrauchsregionen über-

tragen. Über Mittel- und Niederspannungsnetze gelangt der Strom schließlich in die Niederspannungsverteilungsnetze der Verbraucherebene. Der Strom wird in diesem Netz im Prinzip von oben nach unten verteilt [3].

Dezentrale Mikrokraftwerke, die es in Form der Windenergieanlagen, Blockheizkraftwerken und Photovoltaikanlagen seit einigen Jahren immer häufiger gibt, ersetzen mehr und mehr Anteile der Energieerzeugung konventioneller Kraftwerke. Messtechnisch werden sie daher als „negative Last“ registriert. Viele Energieversorgungsunternehmen (EVU) sehen daher in der Stromspeisung eine zusätzliche Erzeugung, die das bestehende ausgeklügelte System der Bereitstellung von Energie stören könnte. Sie argumentieren mit der fluktuierenden Einspeiseleistung. Da nicht einplanbar sei, wann die Sonne scheint oder der Wind weht, müssten von den Netzbetreibern teure Regelleistungen bereitgestellt werden. Doch mit den heute verfügbaren leistungsfähigen Wetter-Prognosesystemen, die das ISET entwickelt hat, lassen sich derartige Probleme lösen oder zumindest stark minimieren. Hinzu kommt, dass elektrische Stromnetze heute mit Hilfe von Informationstechnologien so gemanagt werden können, dass ihre Stabilität absolut gewährleistet bleibt. Dies wird im Folgenden beschrieben:

Abbildung 7
Mögliche zukünftige Kommunikations- und Handelsstrukturen im Bereich elektrischer Energie
(Quelle: RWEnet, EUS)

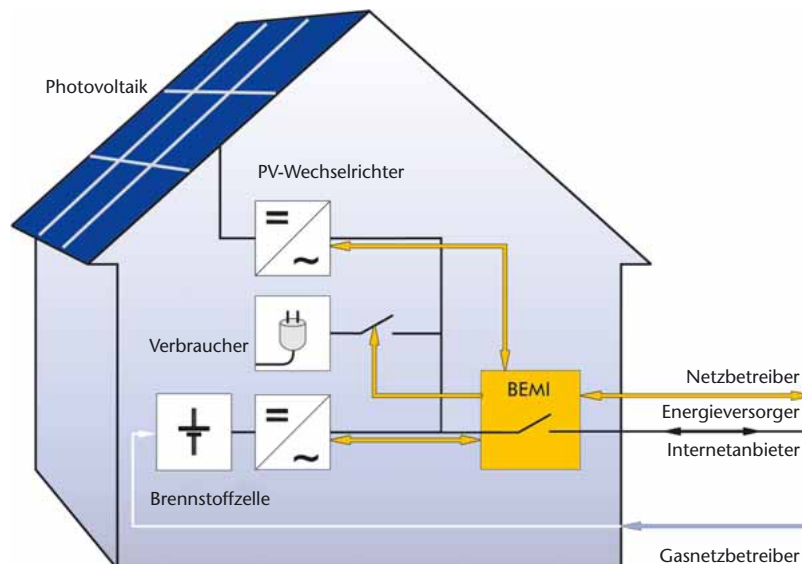


Netzmanagement und Energiehandel

Hausbesitzer werden künftig verstärkt auch Erzeuger von Strom sein und EVUs werden Strom von ihnen kaufen. Die Rollen, von Erzeuger und Abnehmer von Strom, Kunden und Produzenten werden zukünftig flexibler. Denn immer mehr Kleinstkraftwerke, wie z. B. KWK-Aggregate mit Brennstoffzellen, speisen Energie ins Netz ein. Deshalb ist es erforderlich, alle Beteiligten mit einem Kommunikationssystem zu verknüpfen, damit Anbieter und Nachfrager in ein Handelsgeschäft eintreten können und Energiebörsen neue Freiheitsgrade gewinnen (Abb. 7).

Der Strompreis wird sich auch in Zukunft an Angebot und Nachfrage orientieren. In der Grundlast kostet der Strom heute 1,5 bis 3 Cent je Kilowattstunde (ohne Kosten für Verteilung und Handel), während er in Kalifornien während der Energiekrise in Zeiten der Spitzenbelastung auf bis zu 12 Dollar je Kilowattstunde hochschnellte. Die Preisunterschiede können Verbraucher für sich nutzen. Beispielsweise können Kühlgeräte mit guter Wärmedämmung längere Zeiten zwischen den Einschaltprozessen des Kompressors überbrücken. Über ein neues bidirektionales Energie-Management-Interface (Abb. 8) kann ein Kühlschrank dann via Internet (zum Beispiel aus der Steckdose über eine Powerline-Kommunikation) oder andere Kommunikationswege den aktuellen Strompreis abfragen und mit seiner Kältereserve abgleichen, um im richtigen Moment zu einem attraktiven Preis Energie einzukaufen, in Kälte zu verwandeln und zu speichern. Das Potenzial allein für solche Maßnahmen des Demand-Side-Managements bei Kühlsystem im Lebensmittelhandel sowie bei Heizungspumpen wird in Deutschland insgesamt auf 10 bis 15% des Verbrauchs geschätzt.

Wenn der Strombedarf steigt, ist es denkbar, dass Stromanbieter nicht ein Spitzenlastkraftwerk wie eine Gasturbine oder ein Pumpspeicherkraftwerk anfahren, sondern dass sie beispielsweise aus Blockheizkraftwerken in Wohnhäusern Strom kaufen [4]. Die dabei anfallende Wärme kann wesentlich einfacher und kostengünstiger als Strom gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar gemacht werden.



Zusammenfassung und Ausblick

Für den wirtschaftlichen Betrieb von stationären Brennstoffzellensystemen ist neben einem hohen elektrischen Wirkungsgrad ein hoher Wärmenutzungsgrad von entscheidender Bedeutung. Auch andere innovative Wandlungsaggregate auf der Basis von Mikrogasturbinen, Dampfmaschinen oder Stirlingmotoren haben gute Marktchancen.

Mittelfristig werden stationäre Brennstoffzellen nicht direkt mit Wasserstoff, sondern über Erdgas versorgt. Erst wenn der Strom zu über zwei Dritteln aus erneuerbaren Energien kommt, alle Potenziale der Anlagen- und Lastbetriebsführung ausgeschöpft und andere dezentrale Speichertechnologien ausgeschöpft sind, wird die Speicherung von Strom in Wasserstoff in Betracht kommen. Denn bei diesen Umwandlungsprozessen gehen mit heutigen Technologien fast noch 2/3 der Energie verloren.

Welche Anteile Brennstoffzellen im Bereich der stationären dezentralen Strom- und Wärmeversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern, Büros, Handwerksbetrieben und der Industrie erreichen werden, hängt neben den Faktoren Wirtschaftlichkeit, Qualität und Zuverlässigkeit insbesondere von der sorgfältigen und verlässlichen Integration in die Gebäudesystemtechnik ab.

Abbildung 8
Bidirektionales Energie-Management-Interface (BEMI) als zukünftiger Ersatz für den heutigen Hausanschlusskasten
(Quelle: ISET)

Eine weitere Optimierung komplexer Teilsysteme der Gas-, Strom- und Wärmeversorgung kann die Entwicklung deutlich beschleunigen.

Mit Hilfe neuer, digitaler Informationstechnik und aufgrund eines liberalisierten Marktes mit eigenständig agierenden Anbietern und Abnehmern werden die neuen Energieerzeuger zukünftig in das Stromnetz integriert. Das Stromnetz, welches bisher einer Einbahnstraße glich, wird zu einem Energiemarkt, auf dem bisherige Abnehmer auch zu Anbietern und bisherige Produzenten auch zu Nachfragenden werden können.

Literatur

- [1] B.C.H. Steel, Natur 1999
- [2] Vetter, M.; Wittwer, C.; Dynamic modeling and investigation of residential fuel cell cogeneration systems, 16. Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und der Mathematik in Architektur und Bauwesen, Bauhaus Universität Weimar, 2003
- [3] Degner, T.; Engler, A.; Schmid, J.; Strauß, P.; Viotto, M.; Meyer, T.; Erge, T.; Integration Erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen - Inhalte Europäischer Forschungsprojekte, 18. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 2003
- [4] Bendel, C.; Die Rolle der Photovoltaik im Strommanagement, Die Zukunft der Photovoltaik, Dornbirn, Juni 2004

Internationale Entwicklungen der Wasserstofftechnologie

Warum Wasserstoff ?

Warum beschäftigen wir uns mit den Wasserstofftechnologien? Sie versprechen uns sichere Energieversorgung, Mobilität und andere Dienstleistungen, ökonomische Vorteile wie Technologieführerschaft, Wirtschaftswachstum, Arbeitsplätze sowie einen kräftigen Beitrag zum lokalen und globalen Umweltschutz. All das wird oft unter dem Begriff der Nachhaltigkeit zusammengefasst.

Deutschland hat sich schon früh mit Wasserstoff als Energieträger und Speichermedium beschäftigt. Die elegante Option, Wasserstoff CO₂-frei herzustellen, diesen zu speichern und zu verwenden, wo und wann der Verbraucher ihn benötigt, war und bleibt verführerisch. Wasserstoff eröffnet also räumliche und zeitliche Freiheitsgrade, die die Elektrizität nicht so leicht bietet.

Ein weiterer Grund ist die umweltfreundliche Verwendung des Wasserstoffs, dort wo er in

Motoren, Turbinen, Brennern und nicht zuletzt Brennstoffzellen in Dienstleistungen wie Mobilität, Strom, Wärme umgewandelt wird. Wenn dazu noch der Wasserstoff umweltfreundlich hergestellt wird – was das bedeutet, wird noch zu prüfen sein – haben wir Grund zur Freude: Die gesamte Kette von der Herstellung des Wasserstoffs über die Speicherung und den Transport bis zum Endverbraucher ist aus globaler und lokaler Sicht eine ideale Option.

Hinzu kommt, dass wir im Verkehrssektor stark von importiertem Öl abhängig sind. Das ist bei 50 \$ pro Barrel (im Oktober 2004) nicht nur eine Frage der Kosten des Ölimports, sondern noch mehr eine Frage der Versorgungssicherheit. Alle Länder, die langfristig nicht über eigenes Öl verfügen, streben danach, den Verkehrssektor unabhängig vom Öl zu machen. Das kann durch den Einsatz von Wasserstoff erreicht werden. Die sichere Energieversorgung ist wohl die Hauptmotivation für die USA, sich intensiv mit der Wasserstoffoption zu beschäftigen.

Dr. Hanns-Joachim Neef
 Projektträger Jülich
 h.j.neef@fz-juelich.de

Dr. Neef ist Co Chair des IPHE (Implementation and Liason Committee of the International Partnership for the Hydrogen Economy)

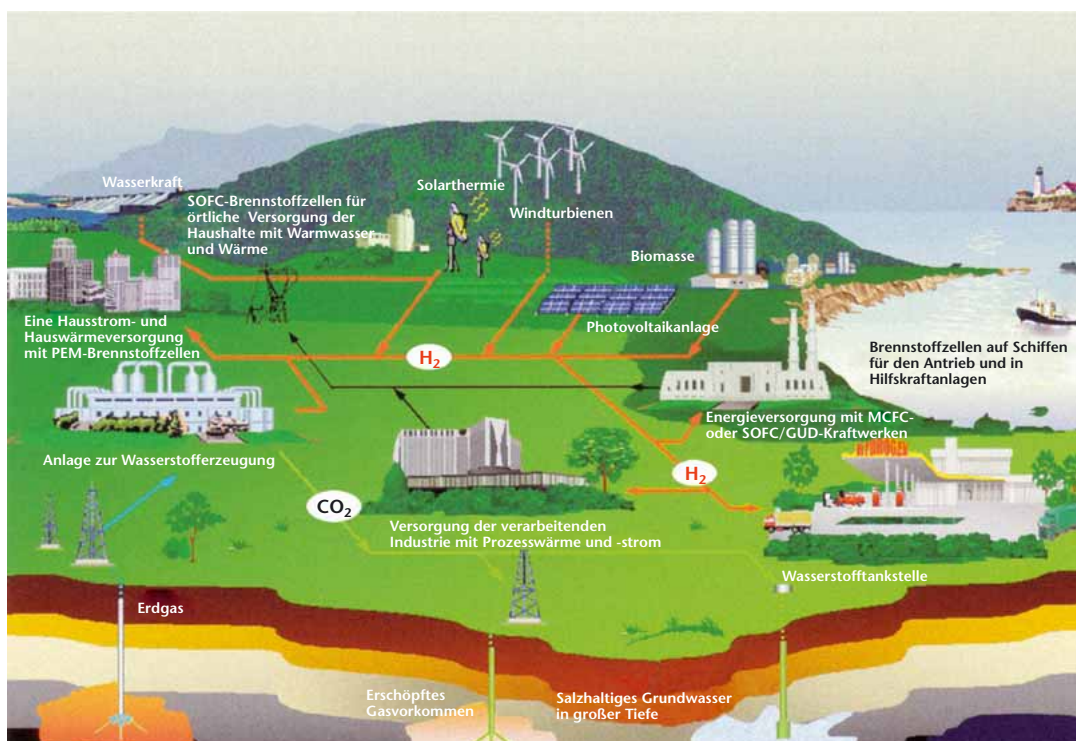


Abbildung 1
 Darstellung einer „Wasserstoffwelt“ als Energiemix aus Erdgas und erneuerbaren Energien

Ob diese Beschäftigung zu einer Wasserstoffwirtschaft führen wird, hängt aber noch von vielen Entscheidungen ab.

Wasserstoffwirtschaft

Es gibt also eine Menge guter Gründe, sich mit Wasserstoff zu beschäftigen. Warum also gibt es die Wasserstoffwirtschaft noch nicht? Die Barrieren sind die hohen Kosten der Komponenten einer Wasserstoffwirtschaft (zum Beispiel der Brennstoffzellen), die hohen Kosten für eine Wasserstoffinfrastruktur, die von der Internationalen Energieagentur auf 1 bis 5 Billionen \$ geschätzt wurden. Auch Kundenorientierung und Betriebszuverlässigkeit der Endprodukte wie zum Beispiel von Brennstoffzellen-BHKWs, Hausversorgungsanlagen, Wasserstoffbussen und Personenkraftwagen müssen gewährleistet sein.

Die Ziele des magischen Dreiecks der Nachhaltigkeit – Energieversorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Umweltschutz – sind nicht zu erreichen, wenn wir so weitermachen wie bisher.

Abbildung 3 → Politische Anreize und Technologieentwicklungen für eine nachhaltige Entwicklung

Abbildung 2 „Das magische Dreieck der Nachhaltigkeit“: Der Kreis versinnbildlicht die Verbindung der einzelnen Nachhaltigkeitskriterien.



Wir müssen alle Möglichkeiten in Betracht ziehen, um optimale Lösungen zu erreichen. Wir müssen ein umfangreiches Portfolio an Technologien betrachten, da keine einzelne Technologie uns den Königsweg aus dem business-as-usual Szenario verspricht.

Nachhaltige Entwicklung

Was ist nötig, um noch über geplante, fortschrittliche Politikszenerien hinaus zu gehen?

- Politische Anreize für eine weitergehende Reduktion von CO₂-Emissionen
- Ein Portfolio an Technologien, um Giga-Tonnen an CO₂ zu vermeiden:
 - Energieeinsparung, effiziente Umwandlungs- und Endverbrauchstechniken
 - Erneuerbare Energien
 - CO₂ Abtrennung und -Speicherung
 - Wasserstofftechnologien
 - Fortschrittliche Übertragungs- und Verteilungstechnologien für alle Energieträger
 - ... neue Ideen und Grundlagenforschung

Die Wasserstofftechnologie steht dabei allerdings nicht an allererster Stelle. Stattdessen müssen wir bei der Energieeffizienz anfangen. Dann kommen die erneuerbaren Energien, die CO₂ -Abtrennung und -Speicherung, die Wasserstofftechnologien, die fortschrittliche Übertragungs- und Verteilungstechnologien für alle Energieträger, die fortschrittlichen Kernreaktoren (eine Option, die für Deutschland zurzeit nicht in Frage kommt) sowie die Fusion. Last but not least brauchen wir neue Ideen und Grundlagenforschung, die die Energietechnologie beflügeln soll. Hier kommt unter anderen der Helmholtzgemeinschaft und den Mitgliedern des FVS eine Schlüsselfunktion zu.

Versorgung und Bedarf

Wasserstoff lässt sich leider nicht wie Erdöl oder Erdgas gewinnen, er muss hergestellt werden. Heute wird der Wasserstoff vorwiegend aus Erdgas hergestellt. Das dabei entstehende CO₂ wird in die Atmosphäre abgegeben. Es gibt aber drei Wege, den Wasserstoff CO₂-frei herzustellen:

1. erneuerbare Energien (und hier sowohl direkt als auch über die Elektrolyse)
2. Kernenergie
3. fossile Energieträger mit Abscheidung und Lagerung des entstehenden CO₂

Natürlich würden wir alle gerne sehen, dass Wasserstoff mit Hilfe der erneuerbaren Energien in großen Mengen zu wettbewerbsfähigen Preisen in den Markt kommen würde. Aber es ist zu beachten, dass aus den erneuerbaren Energien zuerst einmal Strom hergestellt wird. Diesen Strom zu nutzen, muss die erste Aufgabe sein. Ihn in Wasserstoff umzuwandeln heißt, Investitionen für die Elektrolyse zu tätigen und Energieverluste in Kauf zu nehmen. Das wird man erst dann tun, wenn billiger Strom aus Erneuerbaren zur Verfügung steht. Es wird also in allen seriösen Szenarien angenommen, dass dies erst in einigen Jahrzehnten der Fall sein wird.

Ähnlich sieht es aus mit der Technik der CO₂-Abtrennung und seiner Speicherung in geologischen Schichten. Auch hier wird es noch Jahrzehnte dauern, bis die Technik so weit entwickelt ist und öffentliche Akzeptanz findet, dass sie in großem Maßstab eingesetzt werden kann und in den weltweiten Statistiken der CO₂-Emissionen und deren Vermeidung zu sehen ist.

Aus Szenarien des US-Department of Energy, des britischen Department of Trade and Industry, des dänischen Forschungszentrums RISØ und vielen anderen Untersuchungen sieht man, dass die internationale Einschätzung über die Möglichkeiten der CO₂-freien Wasserstoffherstellung ziemlich einheitlich gesehen werden. Vom technischen Standpunkt aus gesehen ist natürlich die CO₂-freie Herstellung von Wasserstoff aus Kernenergie mit Hilfe der Elektrolyse heute schon möglich. Ob das wirtschaftlich Sinn macht sei dahingestellt, da wir die Option Kernenergie nicht im deutschen Portfolio haben.

Also wird der Option der Wasserstoffwirtschaft am besten geholfen, wenn die Erneuerbaren ausreichend gefördert werden.

Die Speicherung von Wasserstoff ist ein weiteres Feld der Forschung. Wasserstoff ist bei Raumtemperatur gasförmig und beansprucht ein großes Volumen:

Pro 100 km verbraucht ein Auto etwa 1 kg Wasserstoff, dies entspricht etwa 10.000 Litern gasförmigen Wasserstoffs. Deshalb stellt seine Speicherung in kleinen, insbesondere mobilen Tanks ein Problem dar.

Da auch die energetische Betrachtung eine Rolle spielt, also die Frage, wie viel Energie wird gebraucht, um Wasserstoff zu komprimieren oder zu verflüssigen, sind neue Verfahren der chemischen oder physikalischen Speicherung in Metallhydriden oder Nano-Strukturen die Hoffnungsträger für die Zukunft. Ein echter Durchbruch zu kommerziellen Produkten ist hier aber noch nicht gelungen, hier soll und kann die Grundlagenforschung, auch in internationaler Zusammenarbeit, hilfreiche Beiträge leisten.

Brennstoffzellen

Die heute meist beachtete Technologie zur Nutzung des Wasserstoffs ist die Brennstoffzelle.

Es gibt verschiedene Typen von Brennstoffzellen. Allen Typen gemeinsam ist, dass sie elektrochemisch aus Wasserstoff und Sauerstoff Strom und Wärme produzieren. Dabei muss nicht allen Typen der Brennstoffzelle Wasserstoff in reiner Form zugeführt werden. Die auf hohem Temperaturniveau arbeitenden Zellen können den Wasserstoff quasi „in-situ“ aus wasserstoffhaltigen Energieträgern wie Erdgas, Methanol, Biogas, Kohlegas etc. herstellen. Die *Abb. 4* zeigt, wie die einzelnen Brennstoffzellentypen sich hinsichtlich einiger Komponenten und Betriebsdaten unterscheiden. Eigentlich sollte man unter dem Thema dieses Vortrags nur über die Brennstoffzellentypen sprechen, die nur mit reinem Wasserstoff betrieben werden können, denn nur sie sind ein integraler Teil der Wasserstoffwirtschaft. Oder anders ausgedrückt: Wasserstoff und Brennstoffzellen erschließen unabhängig voneinander energiewirtschaftliche und ökologische Vorteile. Sie lassen sich zu besonders energieeffizienten Lösungen kombinieren.

Weiterhin werden für die Wasserstoffanwendung Verbrennungsmotoren, Brenner und Turbinen sowohl für den Verkehr zu Land, Wasser und Luft, als für stationäre Strom- und Wärmeerzeugung entwickelt.

Abbildung 4
 Brennstoffzellen

	Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen			Hochtemperatur-Brennstoffzellen		
Brennstoffzellentyp	DMFC Direct Methanol Fuel Cell	PEMFC Polymer Electrolyte Membran Fuel Cell	AFC Alkaline Fuel Cell	PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell	MCFC Molten Carbonate Fuel Cell	SOFC Solid Oxide Fuel Cell
Electrolyte	Protonenleitende Membran	Protonenleitende Membran	Kalilauge	Konzentrierte Phosphorsäure	Schmelzkarbonat	Keramisch
Temperaturbereich	< 100 °C	< 100 °C	< 100 °C	ca. 200 °C	ca. 650 °C	800–1.000 °C
Brennstoff	Methanol	Wasserstoff	Wasserstoff	Wasserstoff	Erd-, Kohlegas	Erd-, Kohlegas
Leistungsbereiche	Watt / Kilowatt	Watt / Kilowatt	Watt / Kilowatt	Kilowatt	Kilo- /Megawatt	Kilo- /Megawatt
Anwendungsbeispiele	Fahrzeuge, Kleingeräte	Fahrzeuge, Kleingeneratoren, Hausversorgung, Blockheizkraftwerke	Raumfahrt	Blockheizkraftwerke	Kraftwerke, Heizkraftwerke	Kraftwerke, Heizkraftwerke

Die europäische Ebene

In einer Publikation der Internationalen Energieagentur zu den Wasserstoffprogrammen der IEA-Mitgliedsländer steht der für uns ehrenvolle Satz: „Germany is at the forefront of hydrogen and fuel cell technology development and implementation worldwide.“

Aber auch in den USA, in Japan und bei der Europäischen Kommission werden ehrgeizige Programme geplant, finanziert und realisiert. Daneben stehen die nationalen Programme Kanadas, Italiens und einiger anderer entwickelten Länder wie Norwegen, Dänemark, die Niederlande und Österreich, die Forschung und Entwicklung auf speziellen Gebieten der Wasserstofftechnik betreiben, ohne Anspruch auf ein alle Themen umfassendes Programm.

Im 5. und 6. Forschungsrahmenprogramm sind viele Wasserstofftechnologie-Projekte gefördert worden, fast alle haben deutsche Beteiligung, viele haben deutsche Koordinatoren. Besonders zu erwähnen sind zwei Projekte, die im Rahmen der so genannten Quick Start Programme im Zeitraum von 2005 bis 2015 realisiert werden sollen. Von den abgeschätzten Kosten von 2,8 Mrd. € soll die Industrie den Hauptanteil tragen, die Mitgliedsländer und die Kommission sollen den Rest aufbringen. Geplant ist eine Großanlage zur Wasserstoff- (und Strom-) Erzeugung mit CO₂-Abscheidung und Speicherung sowie „Wasserstoff-Gemeinden“, in denen

stationäre und mobile Wasserstoffanwendungen demonstriert werden sollen.

CUTE

Eines der bekanntesten europäischen Projekte ist das CUTE-Projekt¹, in dem an die 30 Wasserstoffbusse in mehreren europäischen Städten praktisch erprobt werden. Hier in Berlin können Sie am Funkturm schon eine Wasserstofftankstelle sehen, die im Rahmen des CEP (Clean Energy Partnership) von den Bundesministerien gefördert werden. Ein wichtiges Ziel solcher Demonstrationsprojekte ist es, die Zuverlässigkeit aller Komponenten zu testen und das Zusammenspiel im System zu erproben. Die gesamte Systemverfügbarkeit ist natürlich in den Anfangsmonaten noch nicht ausreichend, aber die Tendenz geht in die richtige Richtung (Abb. 5).

ECTOS

Eng verbunden mit dem CUTE-Projekt ist das ECTOS-Projekt in Island. Es ist der Wasserstoff-Bus-Teil des isländischen Gesamtkonzepts. Iceland New Energy Ltd sucht noch nach Partnern, um Brennstoffzellenfahrzeuge oder auch Wasserstofffahrzeuge mit Verbrennungsmotoren in Auto-Flotten einzusetzen, um die hohen Kosten zu bewältigen.

¹CUTE = Clean Urban Transport for Europe

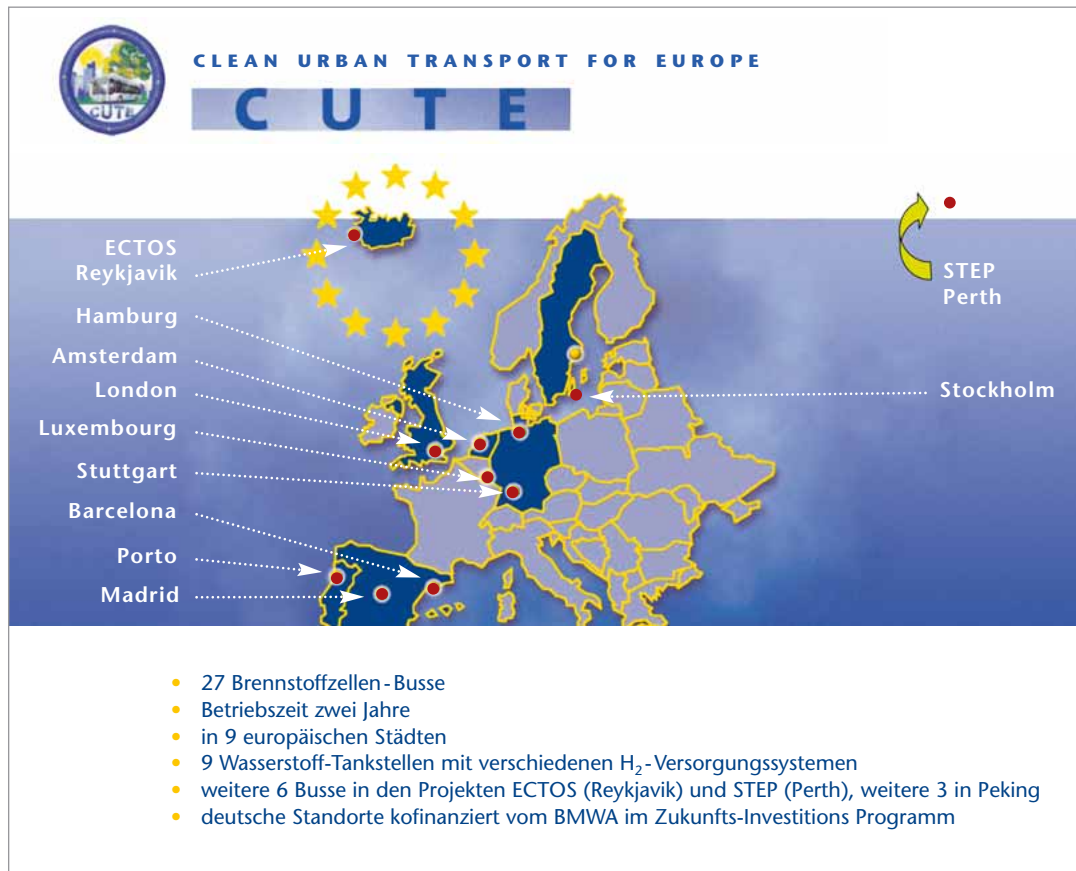


Abbildung 5
Das CUTE-Projekt

Und das ist nicht nur eine Frage für Island, sondern diese Frage stellt sich generell. Auch für die Schiffsflotte Islands soll Wasserstoff verwendet werden.

Island plant, seine gesamte Energieversorgung auf erneuerbare Energieträger umzustellen und Wasserstoff als Energieträger neben der Elektrizität einzuführen. Wasserstoff soll mit Hilfe der Wasserkraft und der geothermischen Energie über Elektrolyse hergestellt und für Fahrzeuge und die Flotte verwendet werden. Island hat deshalb Verträge mit anderen Regierungen und mit der Industrie abgeschlossen, um dieses Ziel zu erreichen.

HTP

Auf der Basis der europäischen Projekte aus den laufenden und früheren Forschungsrahmenprogrammen hat die Kommission im Januar 2004 die „Europäische Technologie-Plattform für Wasserstoff und Brennstoffzellen (HTP)“ ins Leben gerufen. In der Plattform sind sowohl die Industrie und die Wissenschaft als auch die

Regierungen vertreten. Deutschland ist im Advisory Council mit 10 Vertretern bei 36 Mitgliedern gut repräsentiert und leitet auch die beiden wichtigsten Lenkungsgruppen. Es wurde eine Roadmap erstellt, wie man von einer Wirtschaft auf Grundlage fossiler Brennstoffe in den nächsten 50 Jahren zu einer wasserstofforientierten Wirtschaft gelangt. Was wir hier erkennen, ist der Übergang von der Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsphase zum Markt (siehe Abb. 6 u. 7).

In Abb. 7 werden die Kernpunkte der Roadmap herausgehoben. Die Entwicklung der Brennstoffzelle und der Wasserstoffherstellung wird zunächst getrennt betrachtet. Wasserstoff und Brennstoffzellen machen je für sich Sinn, zusammen sind sie jedoch eine starke Option für eine wasserstofforientierte Wirtschaft.

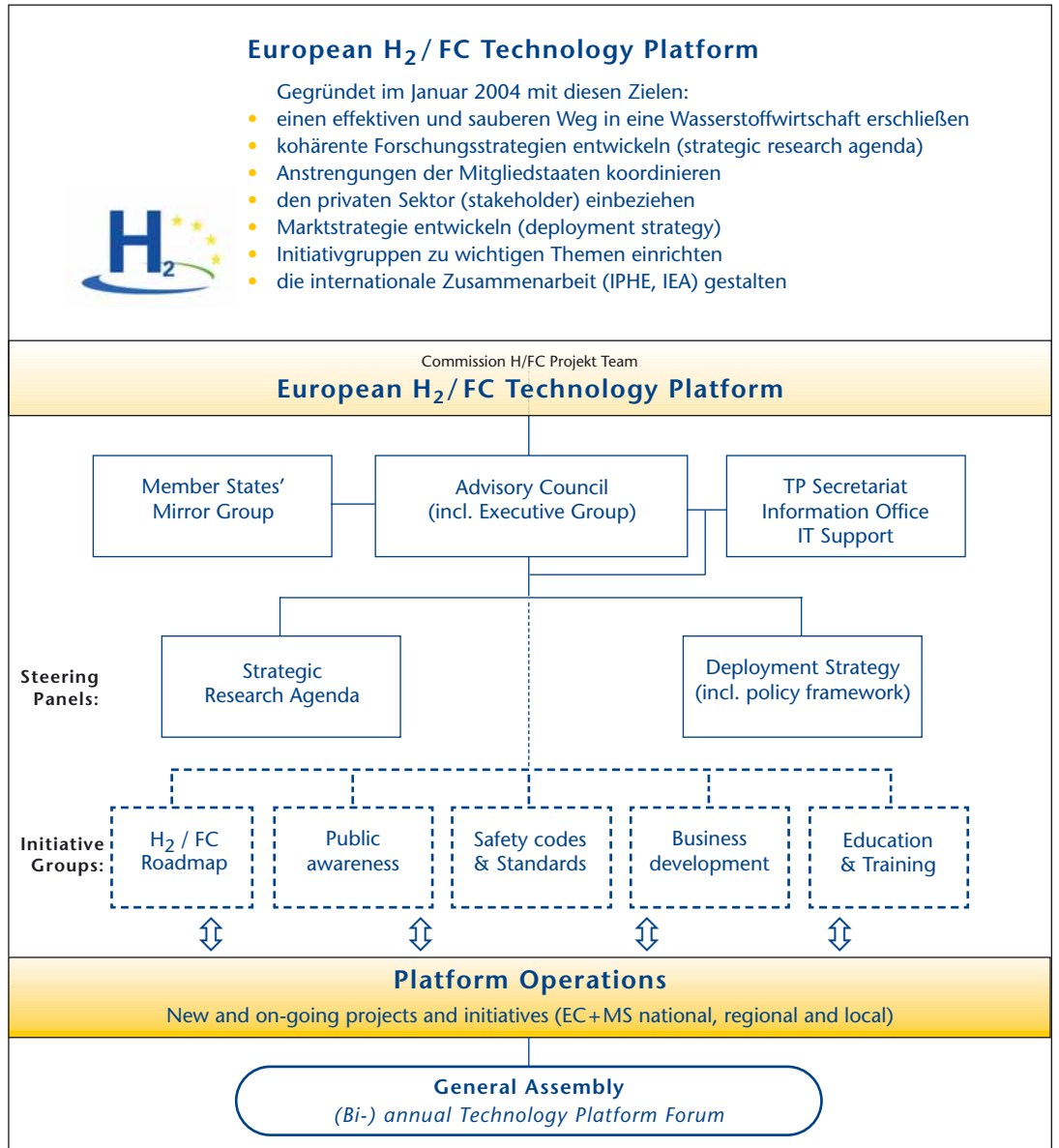


Abbildung 6
Europäische H₂/BZ
Technologieplattform

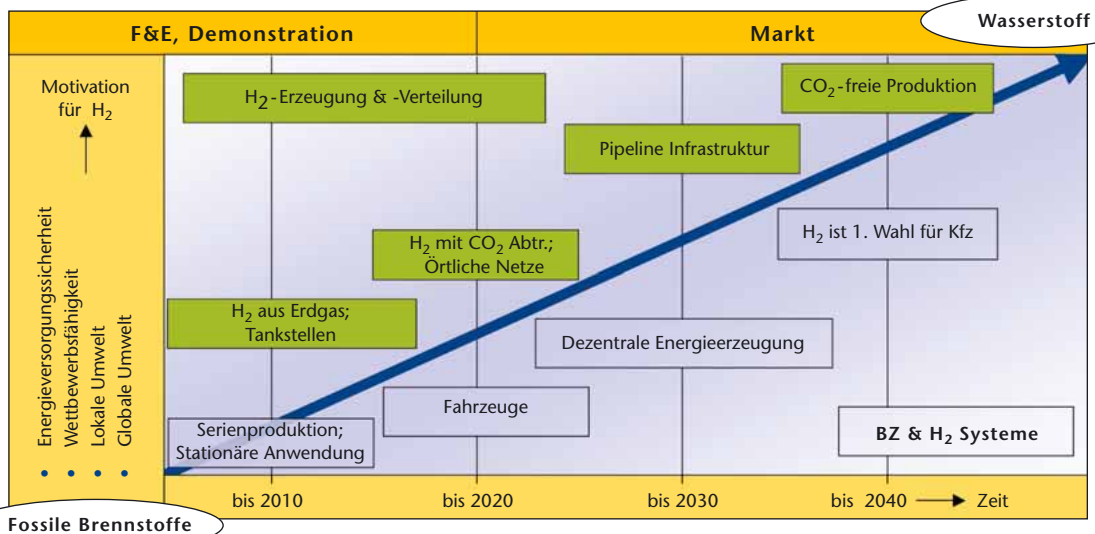


Abbildung 7
Die herausfordernde europäische H₂-Vision (nach EUR 2719DE, Abschlussbericht der Hochrangigen Gruppe für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie)

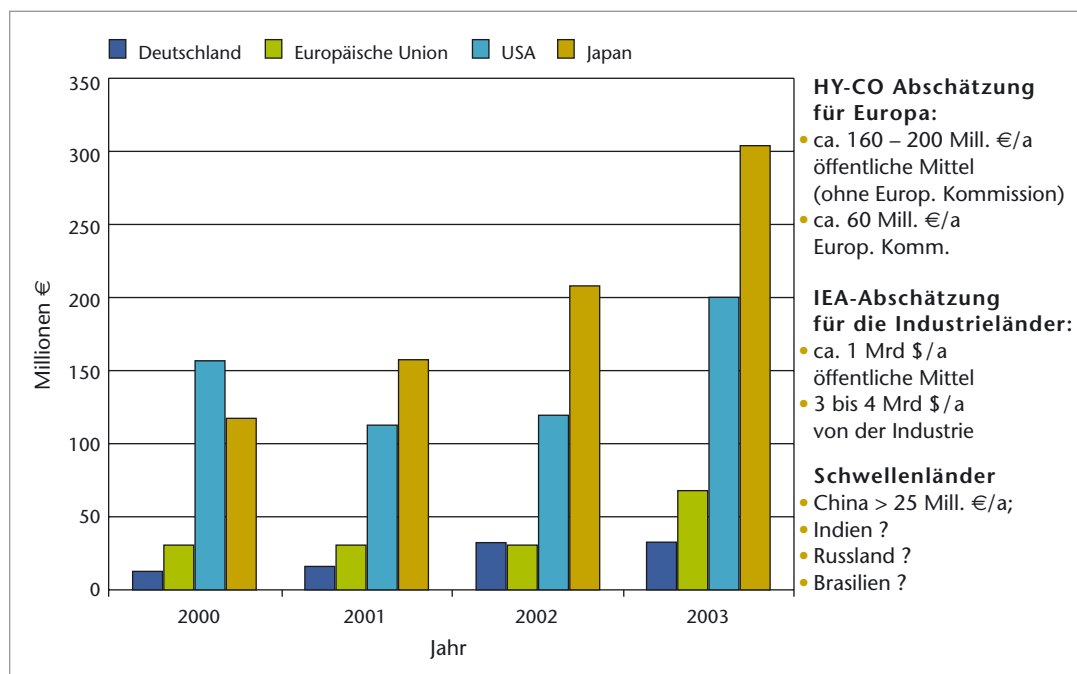


Abbildung 8
Internationale
Förderung

HY-CO-Projekt

HY-CO ist ein so genanntes ERA-Net-Projekt. Dieses Konzept („European Research Area, abgekürzt ERA“) wird in Europa auf alle Forschungsthemen angewendet, um die zersplitterte europäische Forschungslandschaft zusammen zu führen. Das ERA-Net zu Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Forschung und -Entwicklung heißt **HY-CO (Hydrogen and Fuel Cell Co-ordination)** und wird vom Projektträger Jülich koordiniert. HY-CO hat 21 Partner aus 16 Ländern. Wir sind sicher, dass es während seiner vierjährigen Laufzeit einen entscheidenden Einfluss auf die europäische Forschungslandschaft haben wird.

Internationale Budgets

Die Darstellung zeigt, dass Europa hinter den USA und Japan zurückliegt. Allerdings ist anzumerken, dass die europäischen Gelder noch sehr unkoordiniert vergeben werden. Hier soll das HY-CO-Projekt der EU Abhilfe schaffen. Im Rahmen der ERA-Nets HY-CO wurde zusammengezählt, welches Budget sich ergibt, wenn alle EU-Länder bei HY-CO mitmachen würden, so kommt man auf ca. 160 bis 200 Millionen pro Jahr. Das verdoppelt in etwa die europäische Säule in der Grafik.

Die IEA hat versucht, eine Abschätzung für ihre Mitgliedsländer, die Industrieländer, zu machen und beziffert die öffentlichen Aufwendungen mit einer Milliarde US-Dollar pro Jahr. Öffentliche Mittel bilden nicht den Löwenanteil. Die IEA führt jedoch aus, dass eine Abschätzung der Mittel aus dem Industriebereich noch viel schwieriger ist. An diese Daten ist kaum heranzukommen. Die IEA schätzt diese Mittel mutig mit 3 bis 4 Milliarden pro Jahr. Noch schwieriger wird die Abschätzung, wenn wir uns die Schwellen- und Entwicklungsländer und Russland ansehen. Durch die IPHE (International Partnership for the Hydrogen Economy) konnten wir wertvolle Kontakte knüpfen und Einsichten gewinnen.

Japan

Japan strebt, wie andere Länder auch, die frühe Kommerzialisierung von Brennstoffzellen an. Dabei bilden Regierung und Industrie eine enge Partnerschaft. Ähnlich wie in Deutschland hat Japan ein umfangreiches Wasserstoff-Forschungs- und Entwicklungsprogramm über 10 Jahre mit einem Budget von ca. 130 Mio. durchgeführt. Im Nachfolge-Programm "New Hydrogen Project" sollen Wasserstoff und Brennstoffzellen bis 2020 kommerzialisiert werden. Darüber hinaus werden im Demonstrationsprojekt JHFC (Japan Hydrogen Fuel Cell) Fahrzeuge und Tankstellen getestet. Die angegebenen Zielwerte für die Markteinführung sind: 50.000 Brennstoffzellen-Fahrzeuge und 2 Gigawatt (das sind z. B. 10.000 Anlagen mit 200 kW) im Jahr 2010. Andererseits hat Nissan darauf hingewiesen, dass große Flotten an Brennstoffzellen-Fahrzeugen in den nächsten Jahren nicht zu erwarten seien. Die Darstellung des japanischen Industrieministeriums aus dem Jahr 2003 zu den Entwicklungszielen stimmt dagegen mit unseren Zielvorstellungen gut überein. Unsere Ziele im nationalen Programm liegen für mobile Anwendungen auch bei ca. 50 pro kW und bei etwa 1.200 pro kW für die stationären Anwendungen. Dazu kommen Betriebszeiten der Zellen von 5.000 h im Auto und 40.000 h im stationären Betrieb.

USA

Das US Department of Energy (USDOE) betreibt ein weltweit führendes, das ganze Spektrum der Wasserstofftechnologie umfassendes Programm, mit spezifischen Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationszielen und einer definitiven Marktstrategie. Dies ist in dem auf der US National Hydrogen Energy Roadmap (November 2002) aufbauenden Hydrogen Posture Plan (Februar 2004) klar dargelegt.

In der FreedomCAR Partnerschaft zwischen USDOE, General Motors, Ford und Daimler Chrysler werden PEM-BZ für Fahrzeuge entwickelt. Hier wird allerdings nach den Betriebserfahrungen mit der letzten Generation der Fahrzeuge auch wieder verstärkt in Richtung Forschung geschaut, ähnlich wie bei Nissan in Japan.

Das USDOE – Budget

Über die nächsten fünf Jahre beträgt die Zuwendung: ca. 1,7 Mrd \$. Davon sind 1,2 Mrd \$ für Wasserstoff und für BZ, einschließlich Infrastrukturentwicklung mit FreedomCAR 0,5 Mrd. \$.

USDOE – Budget für 2005 insgesamt 227 Mio \$:

• Brennstoffzellen-Komponenten und -Systeme	25,2%
• H ₂ -Produktion und -Verteilung	22,1%
• Demonstration	15,3%
• H ₂ -Speicher	13,2%
• Grundlagenforschung	12,8%
• Sicherheit, Codes und Standards	8,3%
• Ausbildung	3,1%

Der Posture Plan

Der Hydrogen Posture Plan fasst die Wasserstoff-Aktivitäten der einzelnen Abteilungen des USDOE, die Koordinierung mit anderer Ministerien und die internationale Zusammenarbeit zusammen. Das amerikanische Programm ist in Phasen eingeteilt, an deren jeweiligem Ende Entscheidungspunkte vorgesehen sind.

Die Entwicklung befindet sich noch in der ersten Phase, in der Forschung, Entwicklung und Demonstration von so genannten „critical path“-Technologien im Vordergrund stehen. Erst wenn diese Phase erfolgreich abgeschlossen sein wird, einschließlich von Arbeiten zu Richtlinien und Standards sowie zur Sicherheit von Wasserstoffsystemen, wird entschieden, ob die großen Investitionen in eine Infrastruktur in Folgephasen getätigt werden sollen.

Zitat: „Der Erfolg der Forschung ist nicht garantiert. Bessere Optionen könnten sich abzeichnen, um die Öl-Importabhängigkeit und die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu reduzieren. Deshalb wird vor dem Investment in die Infrastruktur eine Entscheidung zur Kommerzialisierung getroffen werden.“

Der Entscheidungspunkt liegt aus heutiger Sicht im Jahr 2015, frühere Zeitpunkte für Nischenmärkte werden genauso genannt wie spätere für den Verkehrssektor. In der letzten Phase, ab etwa 2025, soll ein voll entwickelter Wasserstoffmarkt mit funktionierender Infrastruktur beginnen.



Abbildung 9
IPHE-Partner und Komitees

China

Chinas Ministerium für Wissenschaft und Technologie (MOST) ist die treibende Kraft hinter der Entwicklung und Markteinführung neuer Energietechnologien. Hier wird die Wasserstofftechnologie auch als eine mögliche Option betrachtet. Die Forschung wurde seit etwa 1990 auf Elektrofahrzeuge und in der Folge auf Brennstoffzellen ausgeweitet. Das Budget, das in China für Forschung, Entwicklung und Demonstration für Wasserstoff und Brennstoffzellen zur Verfügung steht wird auf mehr als 25 Millionen € pro Jahr geschätzt. Auch in China werden Pläne für die Kommerzialisierung der Brennstoffzellen und der Wasserstofftechnologien formuliert. So werden zum Beispiel Brennstoffzellen-Busse entwickelt.

Internationale Kooperationen

Für Europa ist das Engagement für eine Wasserstofftechnologie in der Energiewirtschaft ein Beitrag zur Lissabon-Strategie, der Strategie für Wettbewerbsfähigkeit, sozialen Zusammenhalt und Umwelt.

IPHE

Die International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE) ist eine Initiative, die 2003 von den Vereinigten Staaten gestartet wurde. Die Vision, die hinter der IPHE steht, ist dass bis 2020 Wasserstoff-Autos und die dazugehörige Infrastruktur Realität geworden sind. Dafür müssen die Kosten für die Wasserstoffherstellung und noch mehr für die Brennstoffzellenfertigung dramatisch sinken. Neue Konzepte für die Wasserstoffspeicherung müssen gefunden und die Hemmnisse in der Infrastruktur überwunden werden. An der IPHE beteiligen sich 15 Länder (darunter Deutschland) und die Europäische Union.

Fünf Themenkomplexe dienen der Definition gemeinsamer Aktivitäten. Dazu sollen im Jahr 2005 IPHE Workshops und Konferenzen stattfinden, um gemeinsame Forschungsprojekte zu definieren:

- H₂-Produktion
- Brennstoffzellen
- H₂-Speicher
- Standards, Normen, Regeln
- sozio-ökonomische Arbeiten

IEA

Die IEA hat Mitte 2003 eine Hydrogen Co-ordination Group (HCG) ins Leben gerufen, um die IEA-spezifischen Wasserstoff-Aktivitäten zu ordnen. Eine Veröffentlichung über die Wasserstoff- und Brennstoffzellenprogramme der IEA-Mitgliedsländer wird für Dezember 2004 erwartet.

Fazit

Internationale Zusammenarbeit ist für Deutschland wichtig, vor allem bei Technologien, die weltweit eingeführt werden sollen. Dabei müssen wir uns selbst strategisch orientieren. Europäisch geschieht das für Wasserstoff und Brennstoffzellen durch die Technologieplattform und das ERA-Net-Projekt, international durch die IPHE und die IEA.

Diese internationalen Zusammenarbeiten erfordern gemeinsames Engagement der öffentlichen Hand, der Industrie und der Forschung. Hierzu müssen wir uns in Deutschland aber auch selbst organisieren und die interne Kommunikation und Koordination auf eine bessere Basis stellen.

In den letzten 15 Monaten hat ein vom Wirtschaftsministerium einberufener Strategiekreis „Wasserstoff“ eine Forschungs- und Entwicklungsstrategie für Deutschland formuliert, die Anfang 2005 publiziert wird. Es ist geplant, diesen Strategiekreis um das Thema Brennstoffzellen zu erweitern.

Die europäischen und internationalen Kooperationen zu Wasserstoff und Brennstoffzellen haben erst in 2003 und 2004 angefangen oder neuen Schwung bekommen. Geduld, Ausdauer und Engagement werden zu konkreten internationalen Projekten und Aktivitäten führen.

Alle Szenarios und Visionen der Phasen der Entwicklung und der Markteinführung stimmen weitgehend überein im internationalen Vergleich. Wo und wann in die Wasserstoff-Infrastruktur investiert wird, ist aber eine noch offene Frage. Erfolgreiche Forschung und Entwicklung, Engagement der Industrie und politischer Wille sind hierfür Voraussetzungen.

Regenerativer Wasserstoff – Erzeugung, Nutzung und Syntheserohstoff

Einleitung und Problemstellung

Für eine zukünftige Energiewirtschaft, die zu einem hohen Anteil auf Wasserstoff als Energieträger basiert, stellt sich die Frage nach dessen regenerativer Bereitstellung.

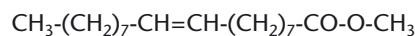
Es bestehen aber Zweifel am Sinn einer Wasserstoff-Energiewirtschaft. Gründe hierfür sind v.a. die Verluste bei Verwendung von Elektrizität zur elektrolytischen Erzeugung des Wasserstoffs und bei dessen „Zurückverstromung“. Ein weiteres Argument gegen die Wasserstoff-Energiewirtschaft sind die enormen Investitionen für den Aufbau einer Infrastruktur zur Wasserstoff-Verteilung. Diese Bedenken sind nicht von der Hand zu weisen. Die resultierende Frage ist, ob dies einen Verzicht auf Wasserstoff als zukünftigen Energieträger bedeutet oder ob es Bereiche gibt, in denen die Einführung von Wasserstoff ihre Berechtigung hat. Bereits heute besteht eine „real existierende Wasserstoffwelt“ mit einem Wasserstoffbedarf, der ca. 2% des Weltprimärenergieverbrauchs bzw. ca. 10% des weltweiten Kraftstoffverbrauchs für den Verkehr entspricht. Dieser Wasserstoff wird jedoch zum überwiegenden Teil aus fossilen Primärressourcen erzeugt und sowohl energetisch als auch stofflich genutzt.

Im Verlauf des vorliegenden Beitrags sollen Bereiche identifiziert werden, in denen regenerativ erzeugter Wasserstoff bzw. mögliche Folgeprodukte in der heute bestehenden Infrastruktur genutzt werden können. Wenn es gelingt, diese Potenziale auszuschöpfen, ist ein kurzfristiger Einsatz möglich, der im Laufe von Jahrzehnten kontinuierlich ausgebaut werden kann, ohne auf eine flächendeckende Infrastruktur für Wasserstoff angewiesen zu sein.

Regenerativer Wasserstoff

Ziel einer zukünftigen Energiewirtschaft ist der rationelle Umgang mit Energie und ein Versorgungssystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energie und nicht der Wasserstoff per se. Wasserstoff ist also ein Mittel zum Zweck. Für die Verwendung von Wasserstoff spricht die Möglichkeit zur Energiespeicherung und die Nutzung als Sekundärenergieträger. Ein weiterer Grund ist die effiziente Energiewandlung in Prozessen, die über Wasserstoff als Zwischenenergieträger ablaufen.

Neben gasförmigem bzw. flüssigem Wasserstoff gibt es eine Vielzahl von chemischen Verbindungen, in denen Wasserstoff chemisch gebunden vorliegt und die als Energieträger verwendet werden können. Dies gilt für viele regenerative Energieträger, die sich bereits im Markt etabliert haben. Genannt seien hier beispielsweise das Bio-Ethanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), Methan (CH_4) aus Biogas und Pflanzenöle bzw. Pflanzenölmethylester mit dem Hauptbestandteil Ölsäuremethylester mit der Formel:



aber auch Holz mit der angenäherten Zusammensetzung $\text{CH}_{1,52}\text{O}_{0,65}$. In all diesen Verbindungen ist regenerativer Wasserstoff zu einem hohen Anteil enthalten. Die Bezeichnung regenerativer Wasserstoff sollte folglich erweitert werden, um die verschiedenen wasserstoffhaltigen Energieträger mit einzubeziehen, auch wenn das in der öffentlichen Wahrnehmung und selbst in Fachkreisen bisher nicht üblich ist.

Regenerative Ressourcen

Zur nachhaltigen Erzeugung von Wasserstoff bzw. wasserstoffreichen Verbindungen gehört neben der Verwendung von Strom aus erneuerbaren Ressourcen also auch die Biomasse.

Dr. Michael Specht

ZSW

michael.specht@zsw-bw.de

Dr. Ulrich Zuberbühler

ZSW

ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de

zsw-bw.de

Ursula Wittstadt

Fraunhofer ISE

ursula.wittstadt@ise.fraunhofer.de

ise.fraunhofer.de

Im Jahre 2001 trug die Biomasse immerhin ca. 11 % (ca. 45 EJ) zum Weltprimärenergieverbrauch (ca. 420 EJ) bei [1]. Dieser Anteil ist zwar noch steigerbar, dürfte aber kaum auf mehr als das 2-3-fache des heutigen Wertes ansteigen. Die maximalen Substitutionspotenziale belaufen sich bezogen auf den heutigen Primärenergieverbrauch auf ca. 8 % für Deutschland und ca. 25 % weltweit. Werden Umwandlungsverluste berücksichtigt (maximal 60 % energetischer Wirkungsgrad für Wasserstoff aus Biomasse), sinken diese Werte entsprechend.

Damit wird die Biomasse zukünftig zwar einen erheblichen Anteil am Weltprimärenergiebedarf decken können, diese Ressourcen sind aber limitiert. Hierbei stellt sich zusätzlich die Frage des ökoeffizienten Einsatzes biogener Ressourcen, was das folgende Beispiel verdeutlichen möge: Aus 6 t Holz lassen sich ca. 1 t Dieselkraftstoff (bzw. Wasserstoff als Dieselkraftstoffäquivalent) über eine thermochemische Gaserzeugung herstellen. Würden diese 6 t Holz stationär im Wärmemarkt eingesetzt, so ließen sich ca. 2 t Heizöl substituieren. In welchem Umfang die Biomasse also zukünftig zur Wärme- und Stromerzeugung oder zur Erzeugung von Sekundärenergieträgern wie Wasserstoff bzw. wasserstoffhaltigen Verbindungen verwendet wird, hängt von Weichenstellungen ab, die sich neben der Vermeidung von Treibhausgasemissionen auch an der Diversifizierung in den verschiedenen Verbrauchssektoren (Wärme, Strom, Kraftstoff) orientieren müssen.

Da landwirtschaftliche Anbauflächen nur begrenzt zur Verfügung stehen, ist der pro Fläche erzielbare Ertrag für die Herstellung von Sekundärenergieträgern von besonderer Bedeutung. Die höchsten Nettoerträge sind mit Herstellungsverfahren zu erzielen, die über eine primäre Gaserzeugung ablaufen (Synthesegas- bzw. Biogaserzeugung). Bei Verfahren, die nur bestimmte Pflanzenteile wie Öl, Zucker und Stärke nutzen (Biodiesel, Ethanol), sind die Flächenerträge kleiner. Die Bandbreite reicht unter mitteleuropäischen Klimabedingungen hierbei von ca. 11 MWh/(ha x a) für Biodiesel aus Raps bis zu ca. 40 MWh/(ha x a) für die Erzeugung von Wasserstoff aus dem Gras *Miscanthus* über die thermochemische Gaserzeugung [2].

Um aufzuzeigen, in welcher Bandbreite die Anzahl von Fahrzeugen liegt, die pro Flächeneinheit (erforderliche Fläche für den landwirtschaftlichen Anbau oder für die solare Stromerzeugung) versorgt werden können, seien verschiedene Beispiele mit hohen und niedrigen Flächenerträgen bei unterschiedlichem Energiebedarf für den Fahrtrieb dargestellt. Für die nachhaltige Versorgung mit Kraftstoff sind im Fall von Biodiesel beim heutigen Durchschnittsverbrauch von 8 l Diesel pro 100 km und durchschnittlicher Jahresfahrleistung von 12000 km/a fast 10.000 m² pro Fahrzeug notwendig. Bei optimierten Flächenerträgen, einer Gaserzeugung der Biomasse zur Erzeugung von Wasserstoff und dessen Verwendung in hocheffizienten „3-Liter-Fahrzeugen“ kann der Flächenbedarf auf unter 1000 m² pro Fahrzeug sinken. Bezieht man zukünftige Möglichkeiten der photovoltaischen Stromerzeugung im Sonnengürtel der Erde mit anschließender elektrolytischer Wasserstoffherzeugung (z. B. als flüssig-H₂) in die energetischen Vergleichsbetrachtungen mit ein, so ergäbe sich für ein „3-Liter-Fahrzeug“ ein Photovoltaik-Flächenbedarf von nur ca. 30 m².

Ohne sich bereits jetzt auf einen konkreten Pfad festzulegen, soll dieses Zahlenbeispiel die langfristig angelegten Vorteile der „solaren“ Kraftstoffherzeugung bzgl. des Flächenbedarfs gegenüber der „biogenen“ Kraftstoffherzeugung verdeutlichen. Weiterhin muss die Einführung „flächeneffizienter“ Kraftstoffe von „energieeffizienten“ Fahrzeugantrieben begleitet werden.

Erzeugungswege für Wasserstoff aus regenerativen Ressourcen

Elektrolyse

Wasserstoff hat den großen Vorteil, über verschiedene Herstellungswege zugänglich zu sein. Weit verbreitet ist das Verfahren der alkalischen Elektrolyse. In zunehmendem Maße werden auch saure Elektrolysen auf dem Markt angeboten. In beiden Verfahren wird Wasser durch Anlegen einer elektrischen Spannung in einer elektrochemischen Zelle in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Während die alkalische Elektrolyse mit flüssigem Elektrolyten arbeitet

(meist KOH), werden in der sauren Elektrolyse protonenleitende Polymer-Membranen eingesetzt (PEM-Elektrolyse). Die alkalische Elektrolyse wird bevorzugt zur Produktion großer Wassermengen eingesetzt, während die PEM-Elektrolyse ihre Anwendung im kleinen Leistungsbe- reich ($< 30 \text{ m}_N^3/\text{h}$) findet. Im Zusammenhang mit regenerativen Energien ist hier der Vorteil des besseren Teillastverhaltens zu nennen.

Wasserstoff aus Biomasse

Bei der Wasserstoffherzeugung aus Biomasse ist zwischen den thermochemischen und den biologischen Konversionsverfahren zu unterscheiden. Bei den thermochemischen Umwandlungsverfahren wird die Biomasse unter Luftabschluss erhitzt (Pyrolyse) bzw. in Gegenwart von einem Gas / Dampfgemisch (z. B. Luft, Sauerstoff, Wasserdampf) in die Gasphase überführt. In einem Folgeschritt wird das entstandene Gas konditioniert und gereinigt. Aus dem erzeugten Produktgas kann z. B. durch eine Druckwechseladsorptionsanlage Wasserstoff abgetrennt werden. Ein Sonderfall ist die hydrothermale Gaserzeugung, bei der unter hohem Druck (bis über 300 bar unter superkritischen Bedingungen) Biomasse mit Wasser umgesetzt wird.

Im Gegensatz zu den thermochemischen Konversionsverfahren laufen die biologischen Verfahren in einem Temperaturbereich deutlich unterhalb von 100°C ab. Bei der anaeroben Vergärung wird zunächst ein methanhaltiges Biogas erzeugt, das in einer nachfolgenden Wasserdampf-Reformierung zu Wasserstoff umgesetzt werden kann. Durch fermentative Verfahren ist aus zucker- bzw. stärkehaltigen Pflanzen Ethanol zugänglich, das sich analog durch Reformierung zu Wasserstoff konvertieren lässt.

Forschungs- und Entwicklungsprojekte im FVS zur Herstellung von regenerativem Wasserstoff

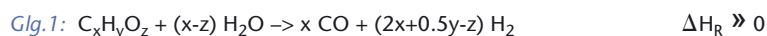
Schwerpunkt der Aktivitäten beim ZSW ist die Herstellung von Wasserstoff/Synthesegas aus Biomasse über den Weg der thermochemischen Gaserzeugung mit dem Ziel, ein Synthesegas

mit einer genau eingestellten Zusammensetzung herzustellen für kohlenstoffhaltige Kraftstoffe bzw. für die Herstellung reinen Wasserstoffs. Die Arbeiten am Fraunhofer ISE konzentrieren sich auf die Speicherung von Energie über Wasserstoff als saisonales Speichermedium zur Versorgung von autarken Inseln wie sie z. B. in der Telekommunikation erforderlich sind.

Der AER-Prozess zur Gaserzeugung aus Biomasse

Der AER-Prozess (Absorption Enhanced Reforming) wurde zur in situ-Konditionierung bei der Gaserzeugung aus Biomasse entwickelt. Das bei der thermochemischen Umwandlung von Biomasse entstehende gasförmige CO_2 wird z. B. durch CaO absorbiert und als Feststoff (CaCO_3) gebunden, womit das chemische Gleichgewicht in Richtung H_2 verschoben wird. Der AER-Prozess kann durch die Kombination der Wasserdampf-reformierung/-gaserzeugung in Gleichung 1 (Glg. 1) mit der homogenen Wassergas-Shift-Reaktion (Glg. 2) und der Hochtemperatur CO_2 -Absorption (Glg. 3) zur Summenformel (Glg. 4) zusammengefasst werden. Die bei der exothermen Absorption freigesetzte Energie steht direkt der endothermen Gaserzeugung / Reformierung zur Verfügung.

AER-Wasserdampfgaserzeugung aus Biomasse:



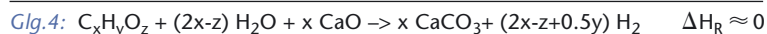
+ Shift-Reaktion:



+ Hochtemperatur CO_2 Absorption:



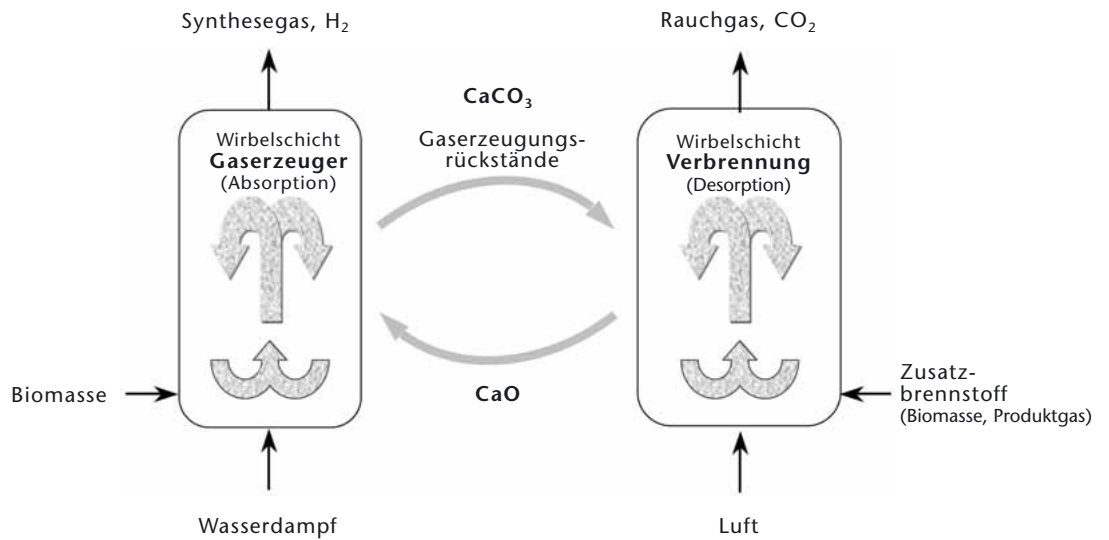
= AER-Prozess:



ΔH_R = Reaktionsenthalpie

Die Reaktionen finden parallel in einem Reaktor bei $600 - 700^\circ\text{C}$ statt. Das zur CO_2 -Absorption eingesetzte Calciumoxid wird als Calciumcarbonat zusammen mit nicht vollständig umgesetztem Kohlenstoff in einem separaten Prozessschritt regeneriert und kann erneut zur CO_2 -Absorption eingesetzt werden.

Abbildung 1
Verfahrensschema zur kontinuierlichen, absorptionsunterstützten Gaserzeugung aus Biomasse in zwei gekoppelten Wirbelschichten



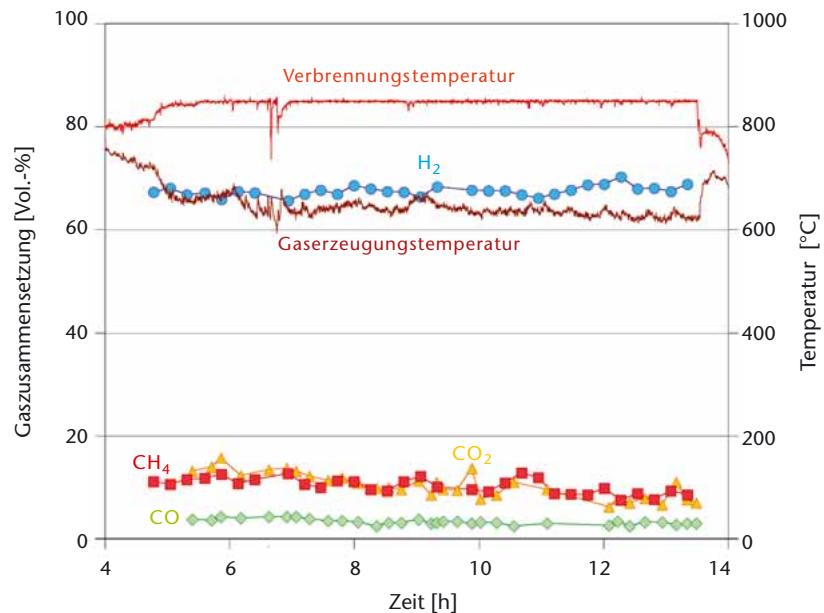
H₂-reiches Synthesegas und CO₂ (je nach Verfahrenstechnik in aufkonzentrierter Form bzw. zusammen mit dem Abgas der Regenerierung) fallen als separate Gasströme in getrennten Reaktoren an, was einen erheblichen Vorteil gegenüber konventionellen Verfahren darstellt.

Biomasse kann dies auf einem relativ niedrigen Temperaturniveau von 600-700°C erfolgen. Dies ermöglicht auch den Einsatz von halmgutartigen Biomassen, welche wegen des hohen Mineralgehalts einen niedrigen Ascheschmelzpunkt aufweisen.

Eine technische Realisierung des kontinuierlichen Prozesses kann in zwei gekoppelten Wirbelschichtreaktoren erfolgen, wie es in Abb. 1 skizziert ist. Im linken Reaktor wird die Biomasse unter Zugabe von Dampf und Absorptionsmittel thermochemisch umgesetzt. Im Vergleich zu konventionellen Gaserzeugungsverfahren aus

Mit diesem Verfahren wurden Wasserstoffkonzentrationen von über 70 Vol.% im trockenen Produktgas erzeugt (Abb. 2) [3]. Dagegen liegen die bisher bei der thermochemischen Gaserzeugung aus Biomasse erreichten H₂-Konzentrationen bei allen bisher bekannten Prozessen bei deutlich unter 50 Vol.%.

Abbildung 2
Produktgaszusammensetzung bei der AER-Gaserzeugung aus Holz in zwei gekoppelten Wirbelschichten



In den letzten Jahren wurden verstärkt Technologien zur Nutzung fossiler Ressourcen diskutiert, bei denen sich CO₂ abtrennen und anschließend – z. B. in Aquiferen – deponieren lässt. Die Nutzung fossiler Primärenergieträger wäre hierbei nicht durch klimaschädliche Emissionen belastet. Insbesondere haben diejenigen Verfahren das höchste Entwicklungspotenzial, die zunächst ein wasserstoffreiches Gas durch Gas-erzeugung bzw. Reformierung herstellen, aus dem vor der Verbrennung CO₂ abgetrennt wird. Durch die Weiterentwicklung dieser Technologien, zu denen auch der AER-Prozess zählt, könnte die Wasserstoffherstellung aus fossilen Ressourcen in einem neuen Licht erscheinen.

Autonome Stromversorgungssysteme mit saisonaler Energiespeicherung

Ziel des in Abb. 3 dargestellten autonomen Energieversorgungssystems ist, die netzferne Stromversorgung (z. B. von Komponenten der Telekommunikations-Infrastruktur) ohne Nachlieferung von Brennstoff sicherzustellen. Die tageszeitliche Speicherung erfolgt hierbei über eine Batterie, die saisonale Speicherung über die elektrolytische Wasserstofferzeugung.

Im normalen Betrieb wird der Verbraucher – zum Beispiel eine Telekommunikationseinrichtung (TE) – mit einer Dauerverbrauchsleistung 100 - 300 W durch die Batterie (BAT) (48 V, 19 kWh Speicherkapazität) mit Energie versorgt. Tagsüber erfolgt eine Nachladung der Batterie durch ein photovoltaisches Modul (PVM mit 1.5 kW) mit nachgeschaltetem Laderegler (LR). In Zeiten andauernder geringer Einstrahlung (Winter oder lang andauernde Schlechtwetterperioden) wird die Batterie nicht genug nachgeladen, so dass als zweite Energiequelle die Brennstoffzelle (BZ mit 300 W) zugeschaltet wird. Diese wird mit Wasserstoff aus dem Wasserstoffspeichersystem (HSS; Metallhydrid, 30 bar, Kapazität 70 m_N³) versorgt. Die Brennstoffzelle ist über einen Gleichspannungswandler (GW) an die Batterie und über den Gleichstromkreis mit allen übrigen Komponenten verbunden.

Um vollständige Autonomie zu erreichen, wird der in den Sommermonaten anfallende Überschuss in der Stromproduktion durch die Solarzellen im Elektrolyseur (ELY, 1 kW_e, 30 bar) in Wasserstoff umgesetzt. Dieser wird im Wasserstoffjahresspeicher saisonal gespeichert.

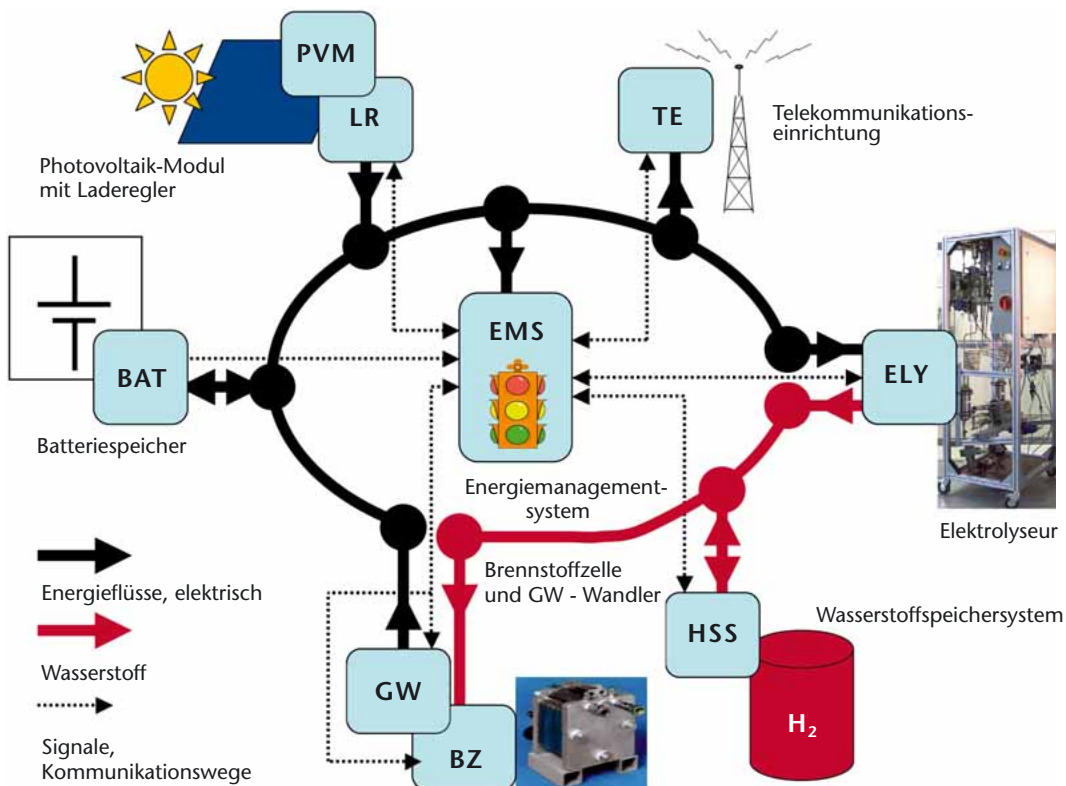
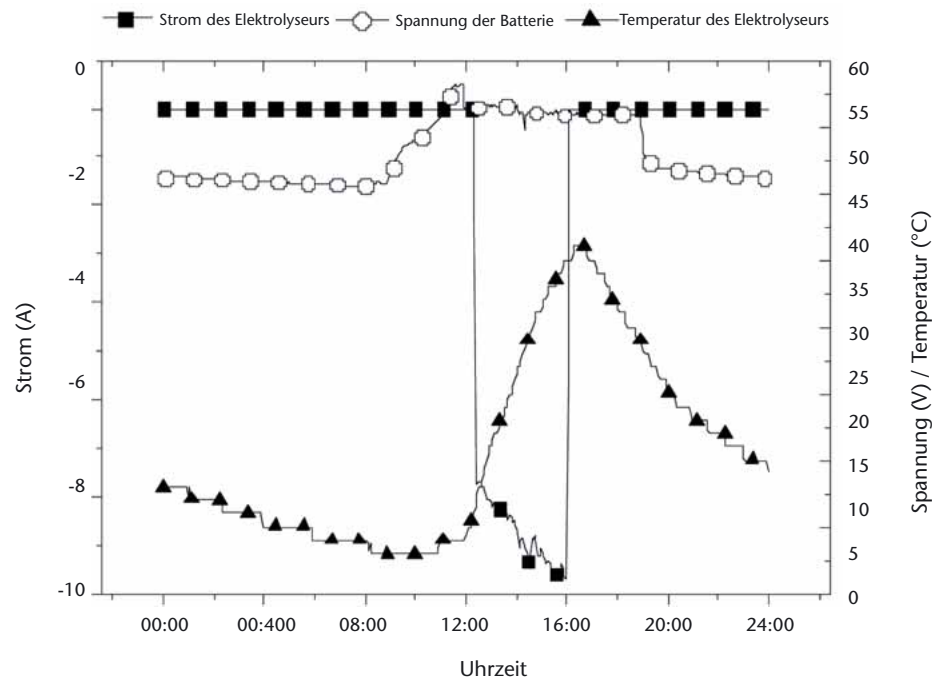


Abbildung 3
Autonomes Energieversorgungssystem mit saisonalem Energiespeicher

Abbildung 4
Betrieb des autonomen
Energieversorgungssystems an einem
typischen Sommertag



Die Batterie dient als Kurzzeit- bzw. Tagesspeicher. Das Energiemanagementsystem (EMS) koordiniert Erzeuger und Verbraucher, überwacht bzw. berechnet den Füllstand der Speicher und sorgt für eine verlässliche Stromversorgung. Die Stromversorgung ist für alle Wetteranomalien durch eine entsprechende Dimensionierung der Komponenten gesichert.

Das System konnte seine Eignung für den Einsatz in einem autonomen Energieversorgungssystem unter Beweis stellen. Beispielhaft für den Betrieb sind in Abb. 4 Daten eines typischen Sommertags mit Wasserstoffproduktion dargestellt. Mit Sonnenaufgang wird die Batterie aus den PV-Modulen geladen. Nachdem die Batterieladung einen Wert von 85 % überschritten hat, startet das Energiemanagementsystem den Elektrolyseur. Um 16 Uhr wird die Wasserstoffproduktion gemäß der aus den Optimierungsrechnungen bestimmten Regeln für den Sommerbetrieb gestoppt, weil die Lichteinstrahlung allein nicht mehr ausreicht, den Verbraucherbetrieb und den Elektrolyseur zu versorgen. Die Batterie würde bis zum Sonnenuntergang in Anspruch genommen und teilweise entladen. Ihre Ladekapazität wird aber für die nächtliche Stromversorgung des Verbrauchers benötigt, bzw. für den Betrieb in einer Periode mit niedriger Sonneneinstrahlung [4].

Das entwickelte System ist unabhängig von der Systemgröße und kann auch für größere Anlagen – z. B. für die Dorfstromversorgung – adaptiert werden. Das Ausführungsbeispiel zur Anwendung von solar erzeugtem Wasserstoff zeigt, dass Wasserstoff auch ohne eine Wasserstoff-Infrastruktur sinnvoll im Zusammenhang mit regenerativer Energie genutzt werden kann.

Wasserstoff-Nutzung zur Herstellung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe

Aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid/Kohlendioxid (Synthesegas) ist eine Reihe kohlenstoffbasierter Kraftstoffe zur Speicherung und zum Vertrieb des Wasserstoffs herstellbar. Das Synthesegas muss frei von Teer, Partikeln und Katalysatorgiften sein sowie neben einem geringen Inertgasanteil einen hohen Wasserstoffgehalt aufweisen. Weiterhin muss für einen hohen Umsatz zu Alkoholen bzw. Kohlenwasserstoffen das $H_2/CO/CO_2$ -Verhältnis optimal eingestellt werden.

Die Herstellung von Methanol erfolgt über die so genannte Niederdruck-Synthese bei einem Druck von bis zu 100 bar und Temperaturen

von 250 bis 280 °C unter Verwendung von Katalysatoren auf Cu/ZnO-Basis. Aus thermodynamischen Gründen kann nur ein Teil des eintretenden Synthesegases zu Methanol konvertiert werden. Das Syntheserestgas wird recycelt, um eine möglichst hohe Kohlenstoff-Konversion zu erzielen. Voraussetzung hierfür ist eine genaue Einstellung der Zusammensetzung des Synthesegases. Alternativ kann eine Auslegung mit niedrigeren energetischen Wirkungsgraden (bezogen auf Methanol) gewählt werden, bei der das Syntheserestgas zur Co-Generation von Strom verwendet wird.

Synthetische Benzin- und Dieselkraftstoffe können mittels Fischer-Tropsch-Synthese hergestellt werden. Die Reaktion findet bei Temperaturen von 200 - 300 °C bei einem Druck bis 25 bar unter Verwendung von Eisen- und Cobalt-basierten Katalysatoren statt. Die Primärprodukte sind nicht nur die gewünschten Kohlenwasserstoff-Fractionen, sondern auch langkettige Kohlenwasserstoffe (wachsreiches „Syn crude“), die in einem weiteren Verfahrensschritt durch Zugabe von Wasserstoff in Kohlenwasserstoffe der gewünschten Kettenlänge umgewandelt werden müssen. Auch methanreiche Gase (SNG; Substitute Natural Gas) können aus Synthesegas durch eine so genannte Methanisierung hergestellt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Kohlenwasserstoffen ist der MTG-Prozess (Methanol-to-Gasoline), bei dem Methanol an Zeolith-Katalysatoren umgesetzt wird. Methanol wird bei Temperaturen von 350 - 450 °C und geringem Überdruck von einigen Bar zunächst zu Dimethylether konvertiert, der über die Stufe der leichten Olefine schließlich zu Benzin-Fractionen reagiert.

Auch Wasserstoff selbst wird im Wesentlichen aus Synthesegas hergestellt. Über die Wassergas-Shift-Reaktion wird der CO-Anteil im Synthesegas mit Wasserdampf in Wasserstoff und CO₂ umgewandelt und anschließend Wasserstoff vom Restgas (CO₂, Rest-CO, Wasserdampf, evtl. N₂, nicht umgesetzte Ausgangsstoffe) über eine Druckwechseladsorption (PSA) abgetrennt.

Neben biomassestämmigen, CO-haltigen Synthesegasen können für die Methanol-, Methan- und die Fischer-Tropsch-Synthese auch CO-freie Synthesegase verwendet werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, kohlenstoffbasierte Kraftstoffe auch aus CO₂ und H₂ zu erzeugen. Alle heute verwendeten, auf fossiler Basis hergestellten Kraftstoffe sind prinzipiell auch auf regenerativem Wege aus Biomasse, aus erneuerbarer Elektrizität bzw. deren Kombination zugänglich.

Schlussfolgerungen

Für eine zukünftig mögliche Energiewirtschaft, die auf regenerativem Wasserstoff basiert, lassen sich folgenden Thesen formulieren:

Was ist regenerativer Wasserstoff ?

Regenerativer Wasserstoff ist ein aus erneuerbarer Primärenergie erzeugter Sekundärenergie-träger – und keine „Energiequelle“. Wasserstoff ist nur dann als Energieträger sinnvoll, wenn seine Erzeugung und Nutzung langfristig mit einer Einsparung klimarelevanter Emissionen einhergeht. Wasserstoff ist ein Sekundärenergie-träger unter verschiedenen weiteren Optionen (z. B. Alkohole, Kohlenwasserstoffe), die regenerativen Wasserstoff in chemisch gebundener Form enthalten und bereits heute marktverfügbar sind.

Woher kommt der regenerative Wasserstoff ?

Biomasse ist zwar – verglichen mit anderen regenerativen Quellen – relativ kostengünstig, die Ressourcen sind aber limitiert und müssen sich der Konkurrenz der Wärme- und Stromerzeugung stellen. Dieser Nutzungsweg kann mittelfristig (> 20 Jahre) für die Wasserstoffherzeugung erschlossen werden. Die Ressourcen über „solare“ Wege sind im Gegensatz zur Nutzung von Biomasse „theoretisch unbegrenzt“ verfügbar.

Was ist „CO₂-freier“ Wasserstoff ?

Neben regenerativem Wasserstoff lässt sich „CO₂-freier“ Wasserstoff im Prinzip auch aus fossilen Energieträgern herstellen, wenn bei seiner Erzeugung das entstehende CO₂ abgetrennt und deponiert wird.

Wie wird erneuerbare Energie am besten transportiert und in bestehende Energieverteilungsstrukturen integriert ?

Oberstes Ziel ist, die bestehende Infrastruktur auch für erneuerbare Energien zu nutzen. Dies gilt vor allem für die Energieverteilungsstrukturen über das Stromnetz, Verteilungswege für flüssige Kraftstoffe und das Erdgasnetz.

Steht regenerativ erzeugte Elektrizität zur Verfügung, so ist sowohl deren Transport wie auch deren direkte Nutzung einer Wasserstoffnutzung vorzuziehen.

Die kohlenstoffbasierten, flüssigen Kraftstoffe verfügen über etablierte Vertriebswege, die indirekt auch für den Wasserstoff erschlossen werden können („Erneuerbare Petrochemie“). Auch Methan ist ein exzellenter „Energie- und Wasserstoffträger“. Wasserstoff kann als Zusatzgas (einige Vol. % H₂ in Erdgas) oder als Austauschgas (z. B. synthetisches Methan aus H₂/CO) über bestehende Gaspipelines vertrieben werden.

Wann kommt die Wasserstoffwirtschaft ?

Das Ziel einer zukünftigen Versorgung mit Wärme, Strom und Kraftstoff ist nicht in erster Linie die Wasserstoffwirtschaft, sondern ein rationaler Umgang mit den Ressourcen und ein hoher Anteil erneuerbarer Energie. Erst wenn diese Voraussetzungen geschaffen sind, wird regenerativem Wasserstoff eine tragende Rolle zukommen. Denn die Nutzung erneuerbarer Elektrizität für die Wasserstoffherstellung ist teuer und erst dann sinnvoll, wenn 30 - 50% der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen stammt (Zeithorizont > 50 Jahre).

Der Einstieg in eine Energieversorgung mit regenerativem Wasserstoff als Energieträger und -speicher ist aber in bestimmten Anwendungsfeldern bereits heute angezeigt. Beispiele hierfür sind die thermochemische Gaserzeugung aus Biomasse zu einem wasserstoffreichen Produktgas, das effizient verstromt aber auch zu Kraftstoffen umgewandelt werden kann. Auch eine saisonale Energiespeicherung über Wasserstoff zur Stromversorgung von Inseln in abgelegenen Gebieten ist bereits heute wirtschaftlich. Viele Anwendungen von regenerativ erzeugtem Wasserstoff können durch eine

optimale „Verzahnung“ mit dem heutigen Energiesystem erschlossen werden, ohne auf eine großflächige Wasserstoff-Infrastruktur angewiesen zu sein.

Literatur

- [1] International Energy Agency: „Key World Energy Statistics“, Paris (2004)
- [2] M. Specht, U. Zuberbühler, A. Bandi, „Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen - Potentiale, Herstellung, Perspektiven“, Nova Acta Leopoldina NF 91, Nr. 339, S. 239 (2004)
- [3] T. Marquard-Möllenstedt, P. Sichler, M. Specht, M. Michel, R. Berger, K.R.G. Hein, E. Höftberger, R. Rauch, H. Hofbauer, „New Approach for Biomass Gasification to Hydrogen“ Proceedings of the „2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection“, 10.-14.06.2004, Rom, p. 764 (2004)
- [4] J. Benz, U. Wittstadt, B.Hacker, F. Isorna, A.M. Chaparro, L. Daza, „Autonomous PV-hybrid system with electrolyser and fuel cell: Operating experience“, Proceedings des 14. Intern. Sonnenforum EUROSUN 2004, 20.-23.06.2004, Freiburg (2004)

Wasserstoffnutzung – Ökobilanzen, Kosten und Endenergiestrukturen

Energetische Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff

Als chemischer Energieträger kann Wasserstoff prinzipiell überall dort energetisch genutzt werden, wo heute Erdgas, Mineralölprodukte und Kohle für diesen Zweck zum Einsatz kommen. Dies ist derzeit fast ausschließlich die Flammenverbrennung bei hohen Temperaturen für Raumheizung, Warmwasserbereitung, Prozesswärme, thermische Kraftwerke sowie Antriebe. Für diesen bedeutenden Bereich müssen „lediglich“ bewährte und ausgereifte Wasserstoff-Technologien so modifiziert werden, dass sie den Anforderungen an eine möglichst effiziente, schadstoffarme und sichere Energieumsetzung genügen. Dies ist in praktisch allen Fällen schon mehrfach demonstriert worden (*Abb. 1*).

Gegenüber der Verwendung von Kohlenwasserstoffen kann der Einsatz von Wasserstoff zur Wärmebereitstellung durch zusätzliche Technologien erweitert werden. Dies ist z. B. die katalytische Verbrennung. Wasserstoff oxidiert an geeigneten Katalysatoroberflächen (z. B. Nickel) bereits bei Umgebungstemperaturen, die eigentliche Umsetzung verläuft bei Temperaturen unter 500 °C und weist deshalb praktisch keine Stickstoffoxid-Emissionen auf. Prinzipiell ist auch die reine H_2/O_2 -Verbrennung von Interesse, bei der direkt (d. h. ohne Wärmeübertrager) Heißdampf entsteht, der unter Zumischung von weiterem Wasser konditioniert werden kann. Auch diese Technologie wurde bereits demonstriert und ist für die Bereitstellung von Prozessdampf und zur Spitzenlaststromerzeugung geeignet. Die Kohlenstofffreiheit von Wasserstoff erleichtert also im Bereich der etablierten direkten Wärmebereitstellung (und damit auch prinzipiell für daraus hergestellten Strom, z. B. in Gasturbinen und BHKW) generell eine Nutzung mit hoher Effizienz, hoher Flexibilität und geringem bis vernachlässigbarem Schadstoffausstoß.

Die Bedeutung einer zukünftigen energetischen Anwendung von Wasserstoff kann durch die elektrochemische Umwandlung von Wasserstoff (und Luft bzw. Sauerstoff) noch erheblich gesteigert werden. Die Brennstoffzelle ist deshalb geradezu zum Synonym für die „Wasserstoffwirtschaft“ geworden. Prinzipiell ist sie – als Umkehrung der Elektrolysetechnologie – eine ideal geeignete Wandlungstechnologie in einer Wasserstoff-Energiewirtschaft. Brennstoffzellen sind im Leistungsbereich von wenigen Watt (portable Systeme) über Anlagen im kW-Bereich (kleine und mittelgroße Blockheizkraftwerke) bis mehreren MW (Heizkraftwerke) als Pilot- und Demonstrationsanlagen und teilweise in (noch nicht wirtschaftlichen) Kleinserien verfügbar. Intensive Entwicklungen laufen insbesondere in der Automobilindustrie, um Brennstoffzellen als emissionsfreie Antriebsaggregate in Verbindung mit Elektromotoren für Fahrzeuge serienreif zu machen.

Mit der Nutzung der Brennstoffzelle kann die Energiebereitstellung in Bereichen, die bisher mit konventionellen Brenn- und Kraftstoffen eher aufwändig bzw. wenig effizient erschlossen werden mussten, mit größerer Flexibilität und im allgemeinen höherem Nutzungsgrad erfolgen. Dies sind:

- Die dezentrale Strom- (und Wärme-) Bereitstellung in Leistungseinheiten von einigen kW bis in den MW-Bereich hinein. Damit kann sowohl Ersatz von zentralen Kraftwerken einhergehen, wie auch eine bedeutende Ausweitung der effizienten Kraft-Wärme-Kopplung erfolgen.
- Die Einführung des Elektromotors im mobilen Bereich in Verbindung mit der Brennstoffzelle. Diese Kombination ermöglicht sehr günstige Nutzungsgrade des Antriebs und mittels getrennter Stromerzeugung eine größere Flexibilität hinsichtlich der wachsenden Anzahl stromverbrauchender Funktionen in Fahrzeugen.

Dr. Joachim Nitsch
DLR
joachim.nitsch@dlr.de

Dr. Peter Viebahn
DLR
peter.viebahn@dlr.de

Prof. Dr. Bernd Höhle
FZ Jülich
b.hoehle@fz-juelich.de

Dr. Christopher Hebling
Fraunhofer ISE
christopher.hebling@ise.fraunhofer.de

- Die Herstellung kleiner bis sehr kleiner Energiewandler als Hilfsenergieaggregate und für portable Zwecke, die – zusammen mit einer Brennstoffversorgung – das Potenzial besitzen, leistungsfähiger als herkömmliche Batterien oder herkömmliche Hilfsenergieaggregate zu sein.

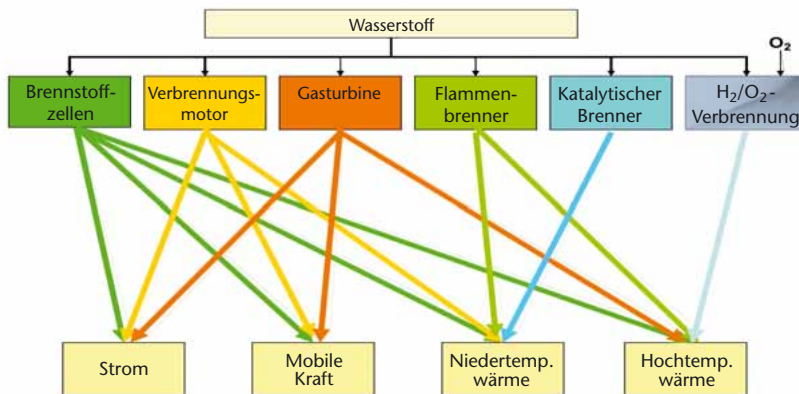


Abbildung 1
Mit Wasserstoff einsetzbare Energiewandler zur Bereitstellung von End- bzw. Nutzenergie

Wasserstoffinfrastruktur

Neben dem Nutzungsaspekten sind für eine breite Einführung eines Energieträgers auch die Verteilungs- und Infrastrukturgesichtspunkte von großer Bedeutung. Ausgangspunkt für alle Überlegungen zum Ausbau einer „Wasserstoffinfrastruktur“ müssen die heute bestehenden Infrastrukturen für Energie sein, also die Erdgasverteilung, die Stromverteilung und die Tankstelleninfrastruktur. Daraus lassen sich drei Strategieansätze für den Einstieg in eine Wasserstoffinfrastruktur ableiten:

- Längerfristige Nutzung der Erdgasinfrastruktur durch Zumischung von Wasserstoff
- Nutzung der Stromverteilung zur dezentralen (elektrolytischen) Erzeugung von Wasserstoff
- Aufbau einer Wasserstoffgrobverteilung (nur Transportebene) bei eher zentraler Erzeugung und Bildung von „Wasserstoffinseln“ in ausgewählten Regionen

Alle drei Stränge können dann längerfristig – mit unterschiedlicher Gewichtung – zu einer flächendeckenden Wasserstoffinfrastruktur beitragen. Für die stationäre Nutzung ist zunächst insbesondere der erste Strategieansatz von Bedeutung. Die Nutzungstechniken sind

darauf in unterschiedlichem Maße eingestellt. Die herkömmlichen Nutzungstechniken Flammenbrenner, Motor und Gasturbine können in weiten Mischungsbereichen an Erdgas-Wasserstoffgemische mit relativ geringen Modifikationen angepasst werden. Erst bei sehr hohen Anteilen von Wasserstoff sind Neuauslegungen erforderlich, die bei Flammenbrennern und Motoren bereits demonstriert und einsatzbereit sind, bei Gasturbinen aber noch einen gewissen Entwicklungsaufwand erfordern. Auch die MCFC und SOFC könnten bei Bedarf in weiten Bereichen mit Methan-Wasserstoffgemischen betrieben werden, wobei im Wesentlichen nur die Vorreformierung angepasst werden muss. Der Einsatz der PEMFC (Polymer Electrolyte Membran Fuel Cell) erfordert dagegen an Erdgas angepasste Reformer oder die Verwendung reinen Wasserstoffs. Katalytische Brenner und H₂/O₂-Brenner benötigen ebenfalls reinen Wasserstoff. Für einen frühen Ausbau „reiner“ Wasserstoffinfrastrukturen in größerem Umfang besteht daher aus der Sicht der Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff kein Bedarf.

Wasserstoffherstellung und Kosten

Eine wesentliche Rolle bei der Ermittlung der günstigsten Einführungsstrategie für Wasserstoff spielen Kostengesichtspunkte und damit indirekt seine Herstellungsart. Da – abgesehen von Übergangs- und Einführungsüberlegungen – letztlich nur CO₂-freier bzw. CO₂-armer Wasserstoff für eine breite energetische Nutzung in Frage kommt, sind die Aufwendungen seiner Bereitstellung aus erneuerbaren Energien von Interesse. Die ermittelten Kosten für seine elektrolytische Herstellung aus Windstrom und Strom aus solarthermischen Kraftwerken sowie aus der Gaserzeugung von Biomasse zeigt Abb. 2 nach unterschiedlicher Herkunft im Laufe der nächsten Jahrzehnte.

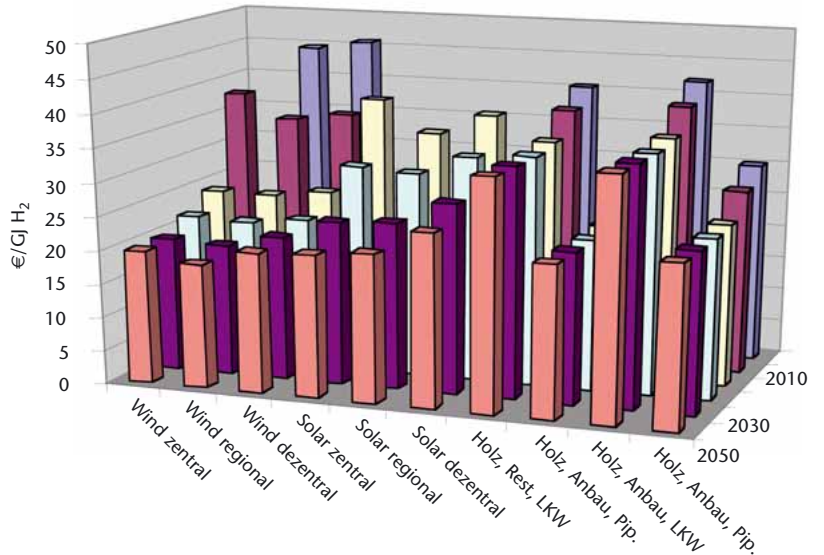
Die heutigen Kosten regenerativen Wasserstoffs (hinterste Balken) mittels Windstrom liegen bei Werten von 40 bis 45 €/GJ¹ (bezogen auf Hu²),

¹ GJ = Gigajoule

² Hu = unterer Heizwert

aus Restholz erzeugter Wasserstoff dagegen bei etwa 25 €/GJ. Die Kosten schließen die Bereitstellung bei dezentralen Großverbrauchern (z. B. Tankstellen, BHKW) ein. Wegen beträchtlicher Kostensenkungsmöglichkeiten bei der regenerativen Stromerzeugung können diese Werte im Zeitraum 2030 bis 2050 ebenfalls auf rund 20 bis 25 €/GJ sinken. Je nach Größe der Erzeugungsanlage und der Transportentfernung liegen die Bereitstellungsverluste von elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff zwischen 40 bis 45% (heutige Werte) und 25 bis 30% (zukünftige Werte). Die Treibhausgasemissionen sind selbst bei heutigen Infrastrukturen mit Werten um 5 bis 10 g/MJ äußerst gering, diejenigen der Gaserzeugung aus Biomasse bewegen sich bei Werten um 15 bis 20 g/MJ (obere Werte für Energiepflanzenanbau), liegen also deutlich unter denjenigen fossiler Kraftstoffe.

Erste Abschätzungen einer Wasserstoffbereitstellung aus Kohle und Erdgas mit paralleler Rückhaltung des Kohlendioxids führen zu Wasserstoffkosten frei Großverbraucher um 15 €/GJ (mit heutigen Rohstoffkosten). Berücksichtigt man zukünftige Preissteigerungen der Einsatzstoffe, so ist längerfristig etwa dasselbe Kostenniveau wie für Wasserstoff aus regenerativen Quellen erwartbar. Damit liegen zukünftige Kosten einer klimaverträglichen Bereitstellung von Wasserstoff beim 2 bis 3-fachen heutigen (emissionsbehafteten) Wasserstoffs und beim 4 bis 5-fachen des heutigen Erdgaspreises. Strategien der Effizienzsteigerung und der



Nutzung erneuerbarer Primärenergien in Form von Strom und Wärme sind also auf absehbare Zeit deutlich kostengünstiger als eine forcierte Wasserstoff-Einführungsstrategie.

Abbildung 2 Wasserstoffkosten für Großverbraucher in Deutschland (€/GJ, Hu) für unterschiedliche erneuerbare Primärenergien, Transportwege und -arten [1].

Berücksichtigt man zusätzlich noch die Bereitstellungskosten von Wasserstoff an Tankstellen („Well to tank“) so lassen sich die Optionen zukünftiger Kraftstoffe vergleichend gegenüberstellen (Abb. 3). Neben Öl kann in nächster Zeit Erdgas zur Verbreiterung der Rohstoffbasis beitragen. Im Gegensatz zu Erdgas selbst haben aber alle aus Erdgas hergestellten Kraftstoffe wie Wasserstoff; Methanol, Fischer-Tropsch-Diesel (FTD) höhere Treibhausgasemissionen als Benzin und Diesel; bessere Antriebsaggregate müssen also diesen Malus wieder kompensieren.

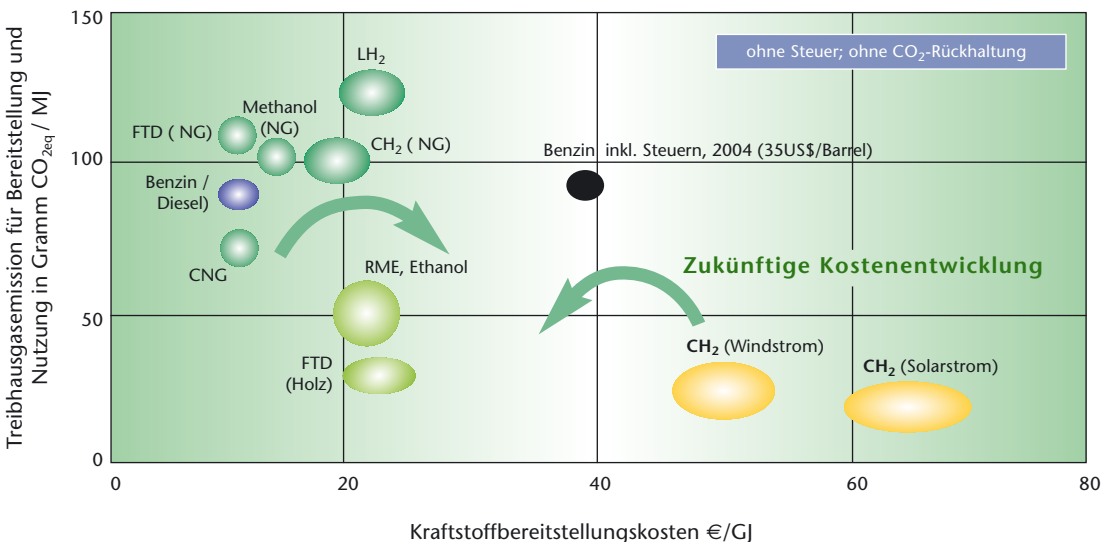


Abbildung 3 Treibhausgasemissionen und Bereitstellungskosten heutiger Kraftstoffoptionen (bis zum Tank). Die Pfeile deuten die Richtung der zukünftigen Kostenentwicklung an. CNG = Druckerddgas NG = Erdgas RME = Raps Methyl Ester

Auch ihre Bereitstellungskosten, insbesondere die von Wasserstoff aus Erdgas, sind höher. Mit entsprechenden Steueranpassungen wie zur Zeit bei Biokraftstoffen könnten sie aber in den Markt eingeführt werden, aus klimapolitischer Sicht ist dies jedoch nur schwer begründbar.

Deutliche Treibhausgasminderungen erbringen erst regenerative Kraftstoffe. Obwohl Kraftstoffe auf Biomassebasis mit 20 - 25 €/GJ in ihrer Bereitstellung gut doppelt so teuer sind wie Benzin, erlaubt eine entsprechende Steuerbefreiung ebenfalls derzeit ihre Markteinführung. Bei größerer Marktausweitung machen sich allerdings die resultierenden Steuerausfälle im Staatshaushalt bemerkbar. Aus Solarstrom bereitgestellter „Kraftstoff“ Wasserstoff wäre dagegen in seiner Bereitstellung heute noch teurer als versteuertes Benzin. Mittelfristig wird sich generell die Bereitstellung fossiler Kraftstoffe verteuern und die Kostenschere zwischen regenerativen und fossilen Kraftstoffen kann sich schließen (Pfeile in *Abb. 3*). Wie bereits in *Abb. 2* gezeigt, dürfte längerfristig regenerativer Kraftstoff „frei Tank“ um 25 - 30 €/GJ bereitstellbar sein. Die dadurch bedingten Mehrkosten beim Kraftstoffverbrauch – unter Beibehaltung einer entsprechenden Kraftstoffbesteuerung – können durch sparsamere Fahrzeuge ausgeglichen werden.

Schlussfolgerungen für die Einführung von Wasserstoff und Brennstoffzellen

In den meisten Analysen der zukünftigen Energieversorgung und einschlägiger Strategieüberlegungen werden Wasserstoff und Brennstoffzellen in einer sehr engen Verknüpfung zueinander betrachtet werden. Die Argumentationsstränge hinsichtlich der Rahmenbedingungen und Handlungsnotwendigkeiten zur Einführung der Nutzungstechnologie Brennstoffzelle und des Energieträgers Wasserstoff werden dabei stark vermischt sein. Es empfiehlt sich jedoch, die Perspektiven und Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff und von Brennstoffzellen voneinander getrennt zu betrachten, da sowohl die Herausforderungen als auch die zeitlichen Abläufe unterschiedlich sind.

Wasserstoff als Energieträger

Zentraler Ausgangspunkt für die Überlegungen, Wasserstoff als Energieträger in die Energiewirtschaft einzuführen, sind die ressourcenseitigen und ökologischen (insbesondere klimaseitigen) Begrenzungen der gegenwärtigen Energiewirtschaft. Diese können gemildert oder vollständig aufgehoben werden, wenn ein zusätzlicher chemischer Sekundär-Energieträger es prinzipiell ermöglicht, Primärenergien einen günstigeren und umfassenderen Zugang zu allen Nutzungsbereichen zu ermöglichen, als es durch die direkte und alleinige Bereitstellung von Strom und Nutzwärme – die prinzipiell alle Energiedienstleistungen erfüllen können – möglich ist. Wie nützlich Wasserstoff ist, hängt demnach wesentlich von der Primärenergieart ab, mit der er hergestellt wird [2, 3]

Für eine umfassende Nutzung erneuerbarer Energien kann Wasserstoff in zweifacher Hinsicht nützlich sein:

- Er ist in der Lage die primärenergetisch bedingten „Schwachstellen“ erneuerbarer Energien (Ortsgebundenheit, Fluktuationen etc.) auszugleichen, sobald diese Schwachstellen sich bei einer sehr weitgehenden Erschließung deutlich bemerkbar machen.
- Er ermöglicht erneuerbaren Energien den Zugang zum mobilen Bereich der Energieversorgung, wo Strom nur begrenzt und Wärme überhaupt nicht nutzbar sind. Auch die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme wird möglich.

Für die Einführung von Wasserstoff ist entscheidend, dass die zusätzlichen Aufwendungen für seine Bereitstellung durch den Zuwachs an Nutzungsqualität mindestens aufgewogen, besser noch deutlich überkompensiert werden. Wachsen erneuerbare Energien sehr rasch, so lässt sich aus diversen Analysen [2, 4] ableiten, dass auf mittlere Sicht (ab etwa 2030) auch Wasserstoff benötigt wird, wenn das Wachstum der erneuerbaren Energien nicht ins Stocken geraten soll. Sollte dagegen entschieden werden, Öl und Gas in starkem Ausmaß durch Kohle und Kernenergie zu ersetzen, ist ein Einsatz von Wasserstoff erst dann erforderlich, wenn auch der mobile Verbrauchssektor diesen Primärenergien zugänglich gemacht werden soll.

Entsprechend ist es auch nicht zweckmäßig, energetischen Wasserstoff in größerem Ausmaß aus Kohlenwasserstoffen bereitzustellen, da letztere die notwendigen Nutzungsbedingungen direkt erfüllen können.

Selbstverständlich ändert Wasserstoff – ebenso wie Strom und Nutzwärme – nicht die Eigenschaften der Primärenergien. Erneuerbare Energien haben auch ohne Wasserstoff keine Ressourcenprobleme und keine schwerwiegenden ökologischen Auswirkungen; für Kohle und Kernenergie müssen Ressourcengrenzen, Klimabeeinträchtigung, Risiko- und Akzeptanzprobleme mit und ohne Wasserstoff überwunden werden, wenn sie in größerem Umfang genutzt werden sollen. Mit den (positiven) Eigenschaften von Wasserstoff kann also nicht pro oder contra einer Primärenergiequelle argumentiert werden.

Brennstoffzellen als Energiewandler

Unabhängig von den Überlegungen zur Einführung von Wasserstoff leitet sich das Bestreben, den Energiewandler Brennstoffzelle einzuführen, von ihrer potenziell sehr hohen Effizienz der Strom- und damit auch Krafterzeugung, ihrer lokalen Emissionsfreiheit und ihrer Modularität ab. Sie zeigen hohe Wirkungsgrade in einem sehr weiten Leistungsbereich und machen so auch kleine Leistungseinheiten möglich. Weitere nützliche Eigenschaften, wie Geräuscharmut und kaum bewegte Teile unterstützen dieses Bestreben. Die Einführung von Brennstoffzellen steht nicht unmittelbar in Verbindung mit der Art der genutzten Primärenergien und ist auch nicht unbedingt an das allgemeine Vorhandensein von Wasserstoff angewiesen. Brennstoffzellen können auch aufbereitete Energieträger aus allen fossilen Primärenergien und aus Biomasse nutzen. Die für PEMFC und AFC erforderliche Reformierung und Aufbereitung der Brennstoffe verringert allerdings ihre Effizienzvorteile gegenüber Nutzungstechnologien, die diese Brennstoffe (Kohlenwasserstoffe, Kohle) direkt verarbeiten können. Eine nützliche Verknüpfung von Brennstoffzellen mit erneuerbaren Energien entsteht erst dann, wenn nicht direkt nutzbarer Strom aus erneuerbaren Energien in Wasserstoff gewandelt wird. Dieser sollte dann mit möglichst hohem Gesamtwirkungsgrad genutzt werden, wofür sich zwar Brenn-

stoffzellen sehr gut eignen, aber auch andere Energiewandler eingesetzt werden können.

Wann kommt der Wasserstoff?

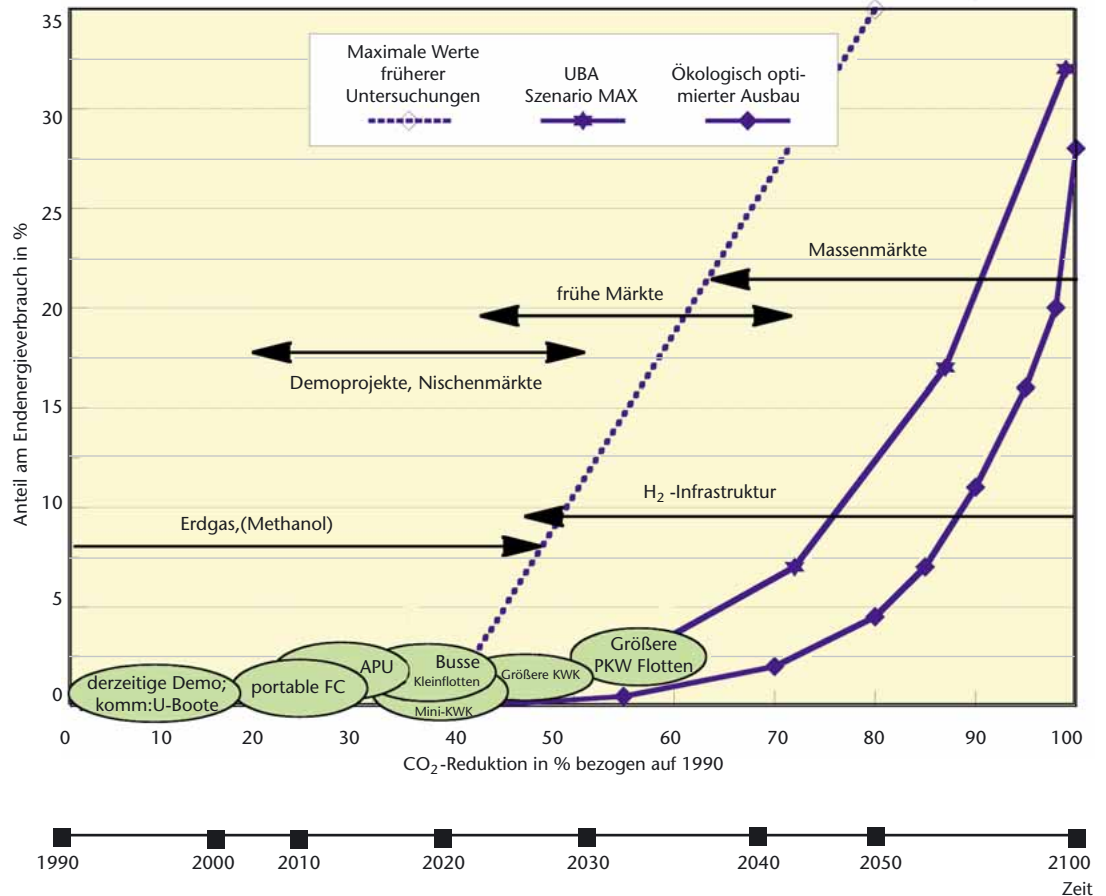
Wie sich dies auf aktuelle Szenarioentwicklungen [2, 5, 6] hinsichtlich einer deutlichen Verminderung der CO₂-Emissionen in der Energieversorgung Deutschlands auswirkt, zeigt *Abb. 4*. Obige Überlegungen führen zu einer Verknüpfung von (frühen) Brennstoffzellenmärkten und einem nachfolgenden Eindringen von Wasserstoff in die Energieversorgung (*Abb. 4*).

Eine optimierte Verknüpfung verschiedener Strategien zur CO₂-Minderung erfordert:

- verstärkte Nutzungseffizienz in allen Sektoren
- dezentrale KWK
- effizientere Kraftwerke
- Ausbau aller Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien

Ein dabei erforderlicher Beitrag des Wasserstoffs wird frühestens ab einer (gegenüber 1990) um 40% verringerten CO₂-Emission benötigt. Er taucht deshalb erst nach 2020 in nennenswerten Umfang in der Energieversorgung auf. Nach 2050 wenn eine CO₂-Emissionsminderung um 80% erreicht ist und die meisten der o. g. Optionen einer CO₂-Minderung ausgeschöpft sind, steigt der H₂-Anteil deutlich und erreicht im Extremfall einer 100%igen CO₂-Minderung (basierend ausschließlich auf erneuerbaren Energien) einen Anteil um 30% am Endenergieverbrauch. Frühere Szenarioüberlegungen zur zukünftigen Energieversorgung Deutschlands [6] hatten in ihren Maximalvarianten vielfach noch einen steileren Anstieg des Wasserstoffanteils nach Überschreiten der „40%-Reduktionshürde“ angenommen (gestrichelte Linie in *Abb. 4*). Die Darstellung macht deutlich, dass der Bedarf an Wasserstoff in erster Linie von der angestrebten CO₂-Minderung in einem Energiesystem abhängt. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass mit dem Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur in größerem, vernetztem Umfang erst zwischen 2020 und 2030 begonnen werden muss, unter der Voraussetzung, dass bis dahin die CO₂-Minderung mittels anderer Optionen zügig vorangebracht wird. „Wasserstoffmärkte“ in energetisch relevantem Umfang müssen daher nicht kurzfristig entwickelt werden.

Abbildung 4
Bedarf an Wasserstoff als Funktion der CO₂-Minderung im Gesamtenergiesystem nach verschiedenen Szenarien für Deutschland und zeitliche Zuordnung von Nischen- und frühen Einstiegsmärkten für Brennstoffzellen (Szenarien nach [2, 5]).



Brennstoffzellenmärkte heute mobilisieren

Märkte für Brennstoffzellen sollten und müssen dagegen wesentlich früher mobilisiert werden. Die Aktivitäten in einer „Brennstoffzelleneinführungsstrategie“ müssen sich darauf konzentrieren, den jetzigen Einstieg in aussichtsreiche (Nischen-) Märkte, bei denen die Kostenfragen hinter den Nutzungsvorteilen von Brennstoffzellen zurücktreten, möglichst wirksam zu unterstützen und abzusichern. Dabei werden Brennstoffzellen energiewirtschaftlich noch keine Rolle spielen. Parallel zu einer beginnenden Erschließung „früher Märkte oder Einstiegsmärkten“ (ab ca. 2020) sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten von entscheidender Bedeutung, da aus heutiger Sicht konventionelle Energiewandler immer noch sehr viel kostengünstiger sind und ebenfalls noch beträchtliche Entwicklungspotenziale besitzen. Forschungs- und Entwicklungserfolge müssen deshalb dazu beitragen, die erforderlichen öffentlichen und industriellen Vorleistungen in dieser Phase in vertretbaren Grenzen zu halten.

Erst wenn dieser zweite Strategieschritt zu Erfolgen führt, ist die Schaffung von echten Massenmärkten, vergleichbar denjenigen von Verbrennungsmotoren oder Heizungsanlagen, möglich und sinnvoll. Dies dürfte frühestens in 30 Jahren zu erwarten sein.

In Abb. 4 sind in ungefährender zeitlicher Abfolge die aus heutiger Sicht möglichen Markteinstiege verschiedener Brennstoffzellenanwendungen in Nischenmärkten und in frühe Einstiegsmärkte markiert. Danach können die Segmente „Portable FC“³ und „FC als APU“ nennenswerte Märkte bis etwa 2015 aufbauen. Überlappend dürften Brennstoffzellen-Busse und Kleinflotten von PKW sowie kleinere BHKW auf FC-Basis folgen und sich bis ca. 2020 etablieren. Bis etwa 2020 - 2025 benötigen diese Nischenmärkte (und die parallel dazu etablierten Demoprojekte) noch keine Wasserstoffinfrastruktur; sie wird erst mit dem Einstieg in die „frühen Märkte“

³ FC = Fuell Cells = Brennstoffzellen

(stationäre KWK in größerem Umfang, größere PKW-Flotten) erforderlich. Alle Annahmen sind als optimistisch anzusehen, da sie von einer relativ wirksamen und gut abgestimmten Wechselwirkung von engagierter und zielstrebigere Energiepolitik und einer investitions- und vorleistungsfreudigen Industrie ausgehen.

Kann sich die Brennstoffzelle in dieser „Bewährungsphase“ erfolgreich etablieren, so sind die Aussichten auf „Massenmärkte“ günstig. Randbedingungen dafür sind einerseits ein generell dynamisch wachsender Markt für die dezentrale Stromerzeugung (KWK, „virtuelle“ Kraftwerke [7] und im Verkehrsbereich eine Gestaltung von Steuern und Preisen von Kraftstoffen, die sowohl geringen Energieverbrauch als auch minimale Treibhausgasemissionen begünstigen. Damit dann zeitgleich eine ausgedehnte Wasserstoffinfrastruktur entstehen kann, ist zuvor auf eine weitreichende und kostengünstige Bereitstellung erneuerbarer Energien zu achten.

Hinsichtlich der Dringlichkeit einer „Wasserstoffinfrastruktur“ ist zu beachten, dass ihr Stellenwert für die beiden Einsatzbereiche „stationär“ und „mobil“ von unterschiedlicher Bedeutung ist. Für die stationäre Nutzung von Wasserstoff kann in einer längeren Übergangszeit das Prinzip der Zumischung zu Erdgas genutzt werden. Die konventionellen Nutzungstechnologien Flammenbrenner und Gasturbine können in weiten Bereichen mit einem Erdgas-Wasserstoff-Gemisch betrieben werden. Stationäre Brennstoffzellen können auf die Reformierung zurückgreifen. Der Übergang zu einer größeren „reinen“ Wasserstoffinfrastruktur kann sich also aus stationärer Nutzungssicht bis in die Mitte des Jahrhunderts erstrecken. Im mobilen Bereich muss dagegen der Aufbau eines entsprechenden Tankstellennetzes früher erfolgen. Allerdings kann im Falle der Nutzung elektrolytischen Wasserstoffs zunächst auf eine eigentliche Wasserstoffverteilungsstruktur verzichtet werden. Die Etablierung größerer Teile einer Wasserstoffinfrastruktur stellt sich daher nicht vor 2030 bis 2040.

Literatur

- [1] P. Viebahn: Prozesskettenanalyse für Wasserstoff im Rahmen des UBA-Projekts „Einführung alternativer Kraftstoffe.“ Beitrag zum 3. Zwischenbericht, September 2004.
- [2] J. Nitsch, W. Krewitt, M. Pehnt, M. Fishedick u.a.: „Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. DLR, IFEU, Wuppertal-Institut, Untersuchung im Auftrag des BMU, Berlin 2004.
- [3] G. Eisenbeiß: Germany's Hydrogen Vision. Vortrag IEA-Seminar, Paris, 3. März 2003.
- [4] „Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit.“ Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung globale Umweltveränderungen (WBGU). Springer-Verlag Berlin, 2003.
- [5] M. Fishedick, J. Nitsch, u.a.: Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland. Forschungsbericht 200 97 104 (UBA-FB 000314), Umweltbundesamt Berlin, Juni 2002.
- [6] J. Nitsch: Potenziale einer Wasserstoffwirtschaft. Gutachten im Auftrag des WBGU, Stuttgart, Berlin 2003.
- [7] W. Krewitt, M. Pehnt, M. Fishedick, H. Temming: Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung. Erich Schmidt Verlag, Berlin 2004.

Weiterführende Literatur

„Wasserstoff als Energieträger - Ergebnisse der Forschung der letzten 20 Jahre und Ausblick auf die Zukunft“. Bericht zum Statusseminar. Hrsg. Projektträger Jülich (PTJ) des BMBF, Okt. 1995.

„Wasserstoffenergie und Brennstoffzellen - Eine Zukunftsvision.“ Abschlussbericht der High Level Group. EUR 20719 DE; EU Brüssel 2003.

C. Hebling, U. Groos: Brennstoffzellen im kleinsten Leistungsbereich. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Vortrag f-cell Stuttgart, Sep. 2001.

B. Höhle: „Chancen und Grenzen neuer Kraftstoffe – Potenziale und Einsatzbereiche.“ 2. Klimaschutzkonferenz „Nachhaltige Mobilität“, 4. Nov. 2004, Düsseldorf.

M. Pehnt: „Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik“. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 6: Energietechnik, Nr. 476, VDI-Verlag, Düsseldorf 2002.

Strategiekreis Wasserstoff des BMWA, Abschlußbericht Oktober 2004.