

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.

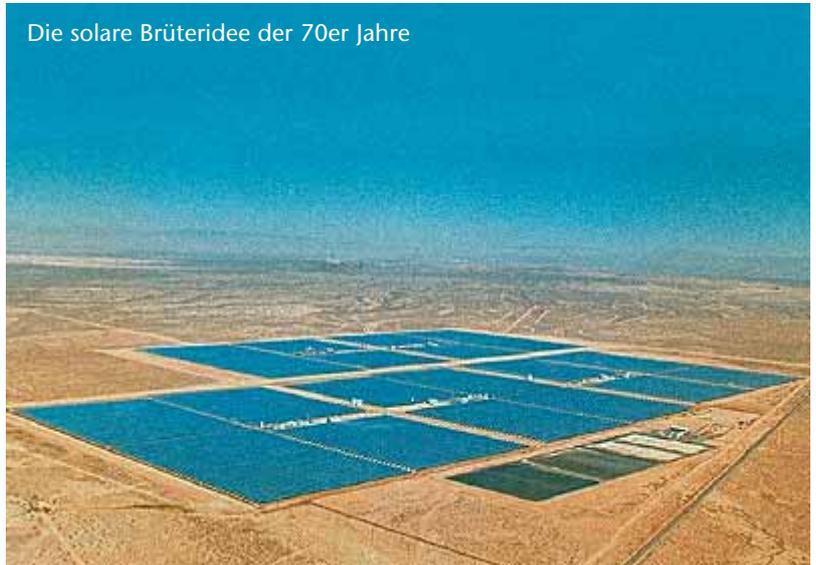
Hauptzweck des Projektes war es, heraus zu finden, ob das Zusammenschalten von photovoltaischen Generatoren und Elektrolyse auf einfache Weise technisch beherrscht werden kann. Dazu musste ein Elektrolyseur entwickelt werden, der auch bei den allnächtlichen Unterbrechungen Wasserstoff mit gutem Wirkungsgrad 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

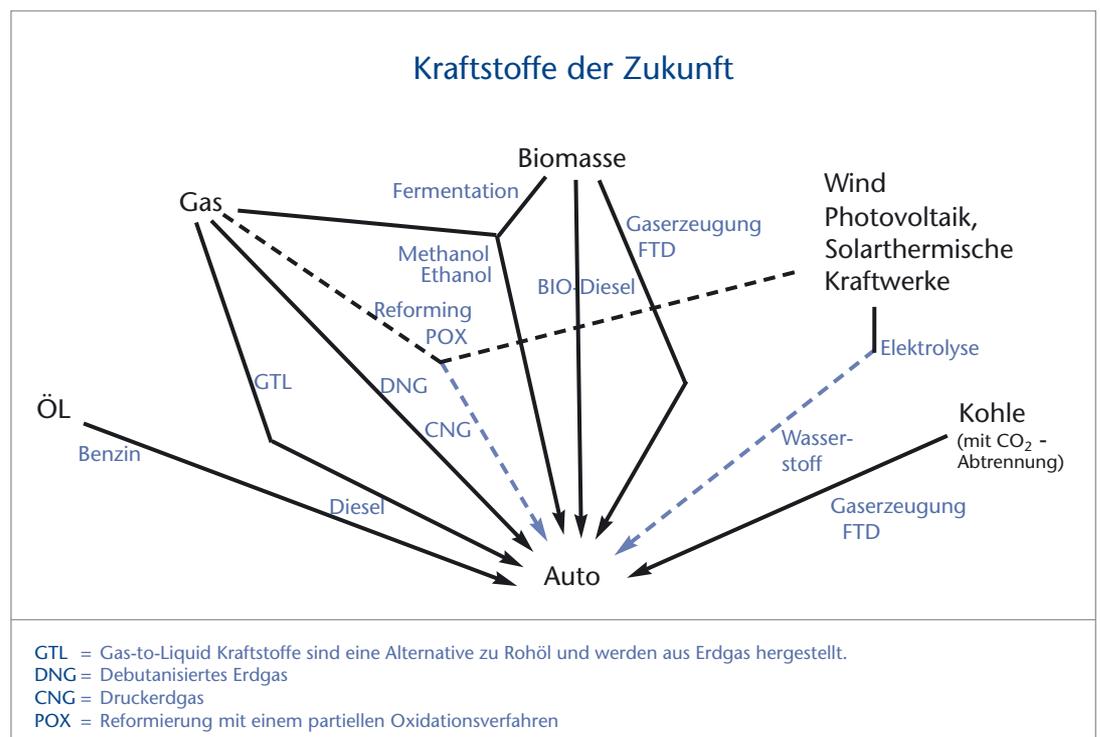
Ein wichtiges Thema des Forschungsverbundes Sonnenenergie ist auch die systemtechnische Herausforderung, Brennstoffzellen ebenso wie Photovoltaik- und Windanlagen so ins elektrische Versorgungsnetz einzubinden, dass Versorgungssicherheit und Frequenzstabilität gewährleistet sind. Hier liegt insbesondere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

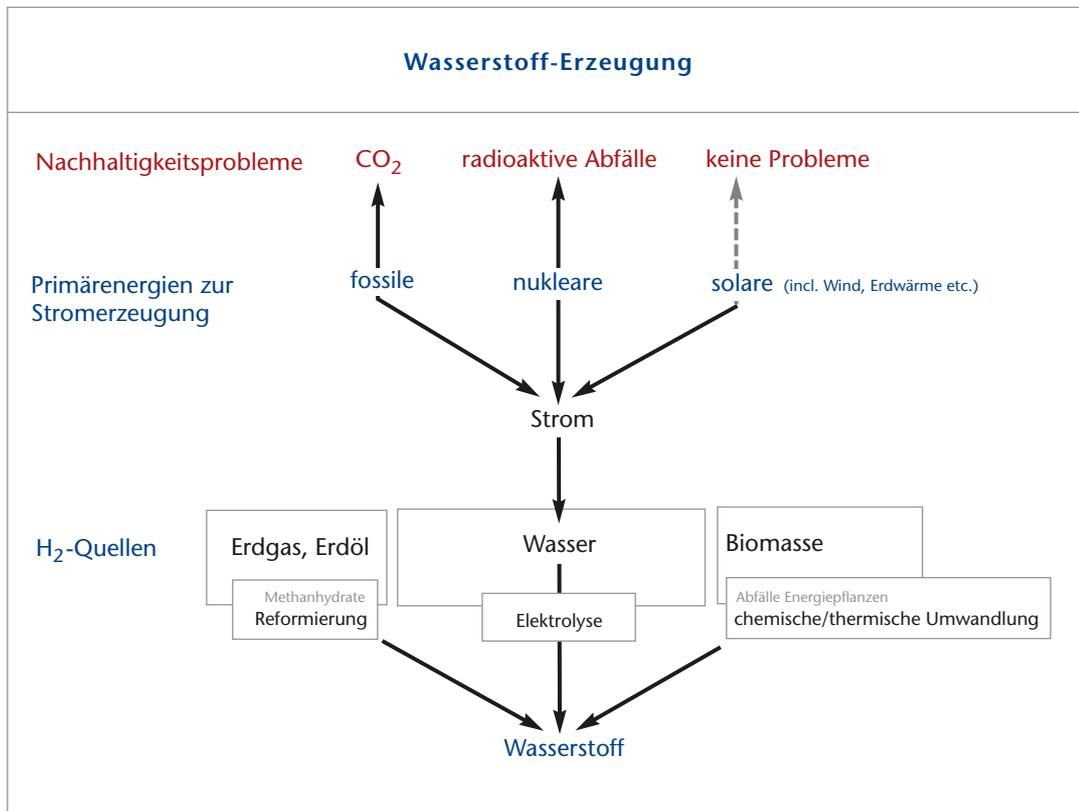


Abbildung 3 zeigt, wie Wasserstoff durch Einsatz verschiedener Primärenergiequellen aus seinen natürlichen Verbindungen gewonnen werden kann. Dabei sind die fossilen H₂-Quellen wie Erdgas und Erdöl (links) und Biomasse (rechts) nur beschränkt verfügbar. In der obersten Zeile ist vermerkt, welche ökologischen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

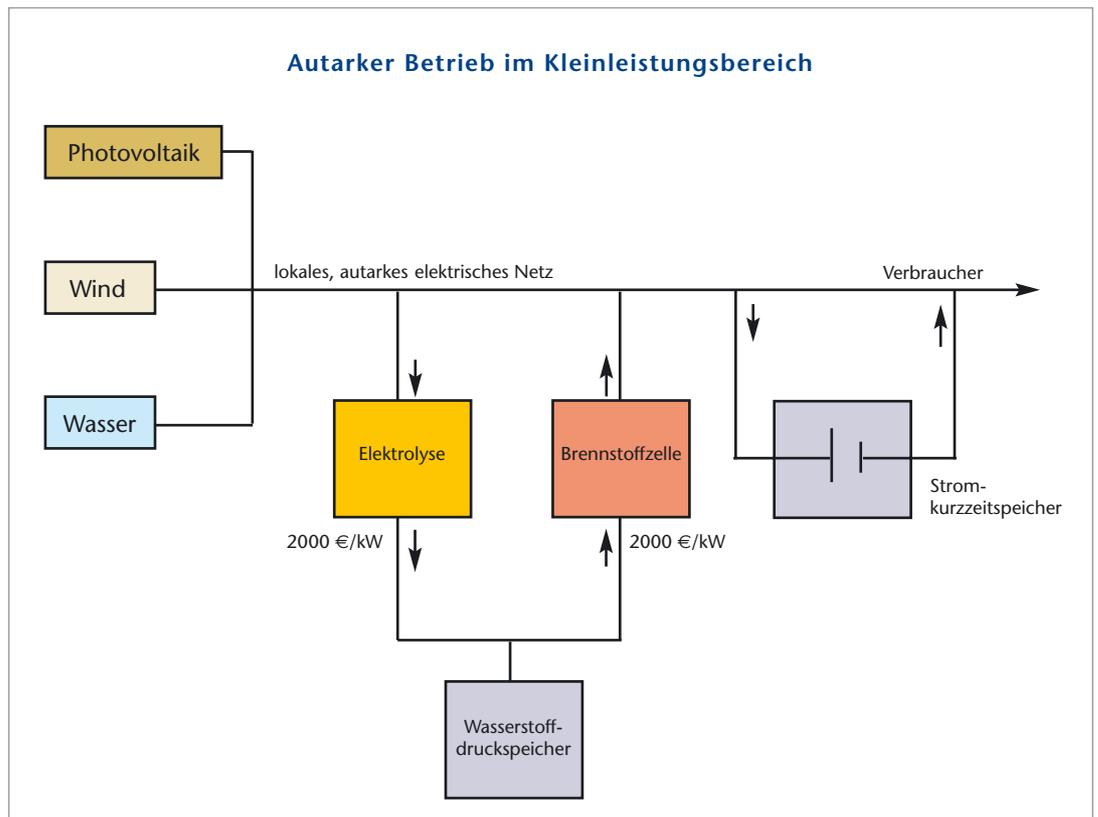


Abbildung 4 zeigt, wie erneuerbar erzeugter Strom im Bedarfsfall über einen Elektrolyseur als Wasserstoff gespeichert und über eine Brennstoffzelle ins Netz zurückgespeist werden kann.

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.

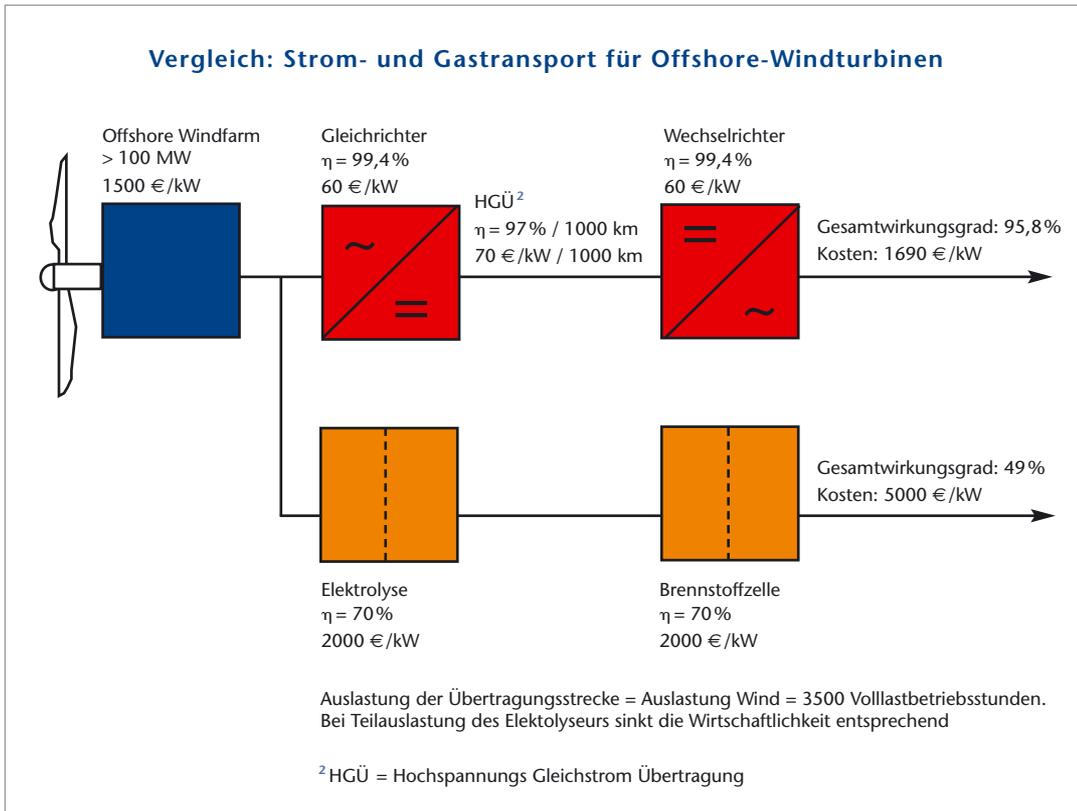


Abbildung 5 zeigt am Beispiel einer Offshore Windstromerzeugung, dass direkter Stromeinsatz günstiger ist als ein Umweg über Wasserstoff, falls nicht die Notwendigkeit zu speichern besteht.

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.