

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.hoehlein@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.

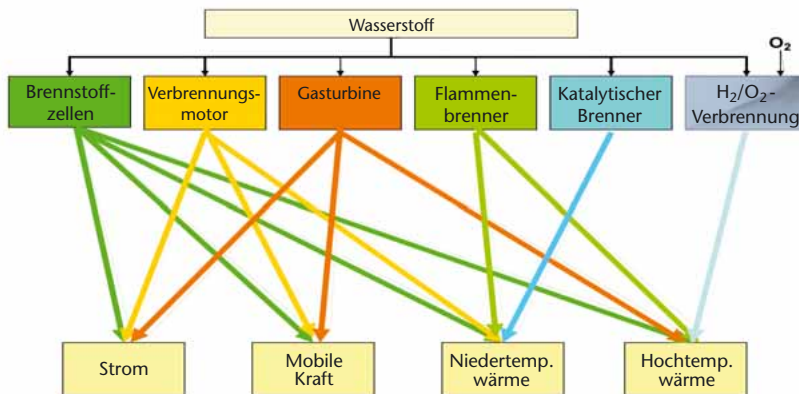


Abbildung 1
Mit Wasserstoff einsetzbare Energiewandler zur Bereitstellung von End- bzw. Nutzenergie

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.

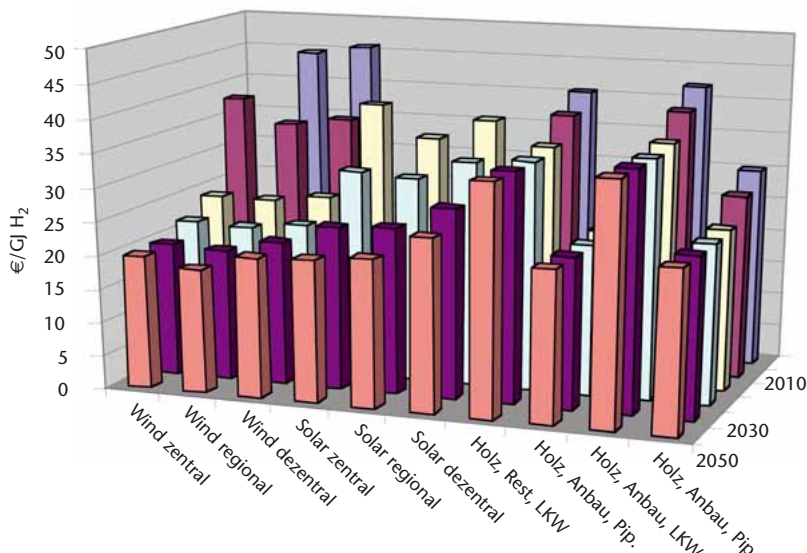
Die heutigen Kosten regenerativen Wasserstoffs (hinterste Balken) mittels Windstrom liegen bei Werten von 40 bis 45 €/GJ¹ (bezogen auf Hu²),

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.

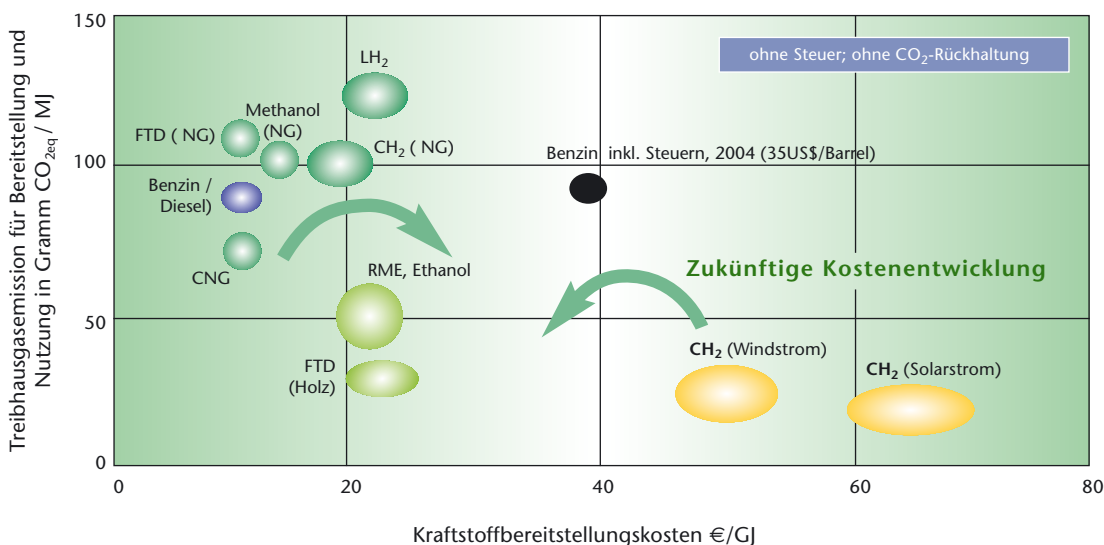


Abbildung 3 Treibhausgasemissionen und Bereitstellungskosten heutiger Kraftstoffoptionen (bis zum Tank). Die Pfeile deuten die Richtung der zukünftigen Kostenentwicklung an. CNG = Druckerddgas NG = Erdgas RME = Raps Methyl Ester

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 Kostenscheren 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?

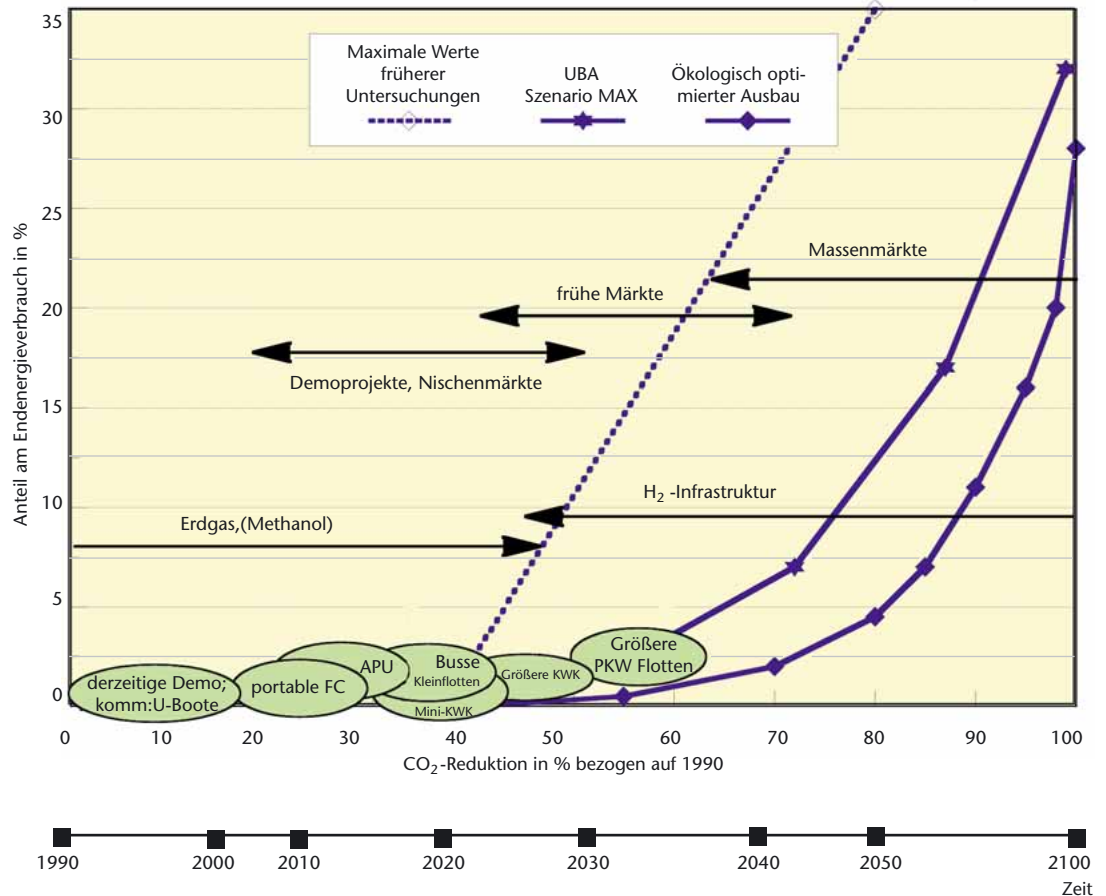
Wie sich dies auf aktuelle Szenarioentwicklungen [2, 5, 6] hinsichtlich einer deutlichen Verminderung der CO₂-Emissionen in der Energieversorgung Deutschlands auswirkt, zeigt *Abb. 4*. Obige Überlegungen führen zu einer Verknüpfung von (frühen) Brennstoffzellenmärkten und einem nachfolgenden Eindringen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