

■ Umwelt, Markt und Logistik – Schlüsselfragen der Nachhaltigkeit

- Wasserstofftechnik – Forschung für Sicherheit und Transport
- Wasserstofflogistik – verteilen, speichern und betanken
- Brennstoffzellen im Vergleich mit anderen Energiekonversionstechnologien
- Umweltauswirkungen und Märkte des dezentralen Einsatzes stationärer Brennstoffzellen

Wasserstofftechnik – Forschung für Sicherheit und Transport

Dr. Wolfgang Breitung

FZK • Forschungszentrum
Karlsruhe
breitung@iket.fzk.de

Prof. Dr. Horst Friedrich
DLR

horst.friedrich@dlr.de

Dr. Peter Treffinger
DLR

peter.treffinger@dlr.de

Dr. Ullrich Schmidtchen

DWV • Deutscher
Wasserstoff- und
Brennstoffzellen-
Verband
h2@dwv-info.de

Einleitung

Bei der Einführung von Wasserstoff (H_2) als zukünftigem Energieträger stellt sich auch die wichtige Frage nach der sicheren Nutzung durch eine breite Allgemeinheit. Im Vergleich zum heutigen Gebrauch in der Großindustrie wird Wasserstoff in der Zukunft viele neue Anwendungen mit sich bringen: Er wird weitgehend dezentral angewendet werden und seine Nutzung erfolgt dann auch in normalen Wohn- und Arbeitsumgebungen durch nicht speziell dafür ausgebildete Menschen. Kann Wasserstoff unter diesen veränderten Randbedingungen sicher genutzt werden?

Das Beispiel des Zeppelin-Unfalls der „Hindenburg“ 1937 hat gezeigt, wie ein einziger schwerer Unfall die Akzeptanz einer gesamten Technologie zerstören kann. Dieser Unfall bedeutete das Ende der Luftschiffahrt weltweit. Ein weiteres Beispiel für Transportunfälle mit Wasserstoff ist das Ereignis in Stockholm im Jahr 1984. Dort traten aus einem H_2 -Flaschenbündel etwa 180 Normalkubikmeter Wasserstoff aus, entzündeten sich und beschädigten Fahrzeuge und Gebäude im Umkreis von 90 m (Abb.1). 16 Personen wurden verletzt. Es muss deshalb frühzeitig untersucht werden, wie sich die bekannten Risiken von Wasserstoff beherrschen lassen und wie zukünftige Wasserstofftechnolo-

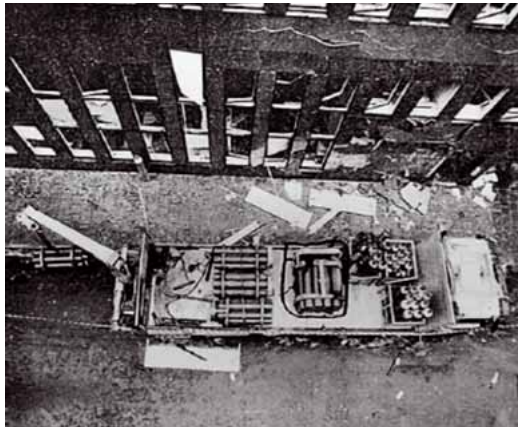
gien in unsere heutige Wirtschaftsform sicher integriert werden können. Das Ziel muss sein, ein mit heutigen konventionellen Brennstoffen vergleichbares und vom Endverbraucher akzeptiertes Restrisiko zu erreichen.

Stand der Sicherheitsforschung

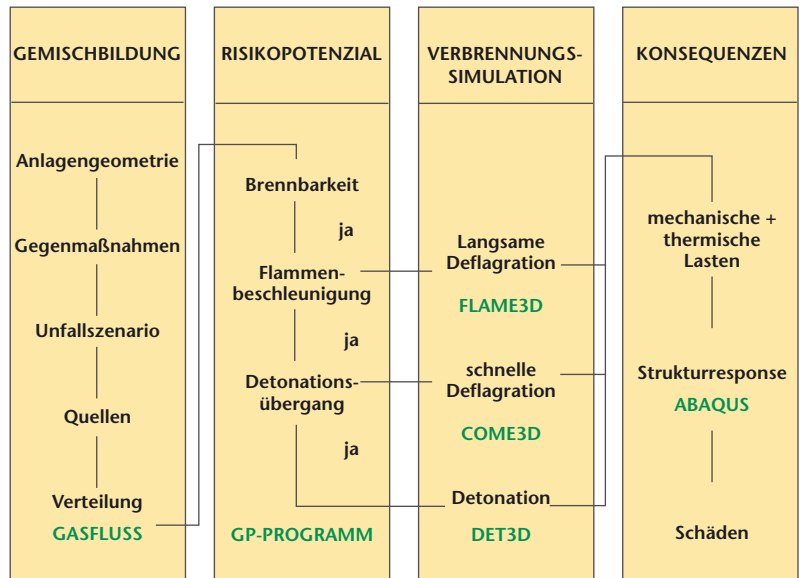
Die prinzipiellen Vorgänge bei Störfällen mit Wasserstoff sind gut verstanden. Die Hauptphasen der generellen Ereigniskette bestehen aus der anfänglichen Gasfreisetzung, der anschließenden Vermischung mit Luft, Zündung, Verbrennung, Erzeugung von Bränden und Druckwellen, sowie daraus resultierenden Personen- und Sachschäden. Dieser generelle Ablauf ist zwar im Prinzip für alle Brenngase identisch, aber Wasserstoff unterscheidet sich in seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften erheblich von den derzeit genutzten fossilen Brennstoffen wie Erdgas, Propan oder Benzindampf. Beispiele sind Dichte, Auftrieb, Diffusionskoeffizient, Zündenergie, Brennbarkeitsbereich und Brenngeschwindigkeit. Diese speziellen physikalisch-chemischen Eigenschaften von H_2 bzw. H_2 -Luftgemischen manifestieren sich zum Beispiel in einer starken – bei Kohlenwasserstoffen nicht beobachteten – Neigung zur spontanen Flammenbeschleunigung, die wiederum ungewöhnlich hohe Verbrennungsdrücke erzeugen kann.

Der Ablauf von Unfallszenarien mit Wasserstoff kann theoretisch und experimentell untersucht werden. Für die theoretische Analyse des Wasserstoffverhaltens wurde im Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) eine durchgehend deterministische Methodik entwickelt, in der unter Einsatz von dreidimensionalen Simulationsprogrammen die Gemischbildung, das damit verbundene Risikopotenzial, die schnellst mögliche Verbrennungsform und die strukturmechanischen Konsequenzen berechnet werden (Abb.2).

Abbildung 1
Wasserstofftransport-
unfall in Stockholm
1984: Freisetzung von
180 Nm³, beschädigte
Gebäude und Fahr-
zeuge im Umkreis von
90 m, 16 Verletzte



Für die punktuelle Überprüfung und Absicherung der theoretischen Voraussagen sind Experimente eine wertvolle Ergänzung. Insbesondere bei sehr komplexen Ereignisabläufen muss sichergestellt werden, dass die Simulation tatsächlich alle wichtigen physikalischen Prozesse beschreibt. Experimente können auch schnellere und genauere Antworten geben als Simulationen. Oft lassen sich Verteilungs- und Verbrennungsprozesse nicht befriedigend auf verkleinerten geometrischen Skalen untersuchen, so dass die Notwendigkeit von Experimenten auf voller 1:1-Skala entsteht. Aus diesem Grund wurde im Forschungszentrum Karlsruhe ein Wasserstoff-Versuchszentrum mit Unterstützung der Industrie errichtet, in dem Wasserstofffreisetzung- und -verbrennungsexperimente durchgeführt werden können (Abb. 3). Diese Anlagen erschließen neue experimentelle Möglichkeiten für Sicherheitsuntersuchungen an wasserstoffbetriebenen Systemen, wie z. B. Brennstoffzellenstapel oder ganzen H₂-betriebenen Fahrzeugen. In einem 160 m³ großen Prüfstand kann Wasserstoff unter kontrollierten Strömungsbedingungen aus einer zu prüfenden Apparatur



freigesetzt und seine Verteilung im Raum mit hoher Orts- und Zeitaufösung gemessen werden. Szenarien mit hochenergetischen Verbrennungsabläufen können in zwei großen Versuchsbehältern untersucht werden (Abb. 4).

Abbildung 2 Am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) entwickelte Analysenmethodik zum Wasserstoffverhalten bei Unfällen mit 3d-Simulationsprogramm

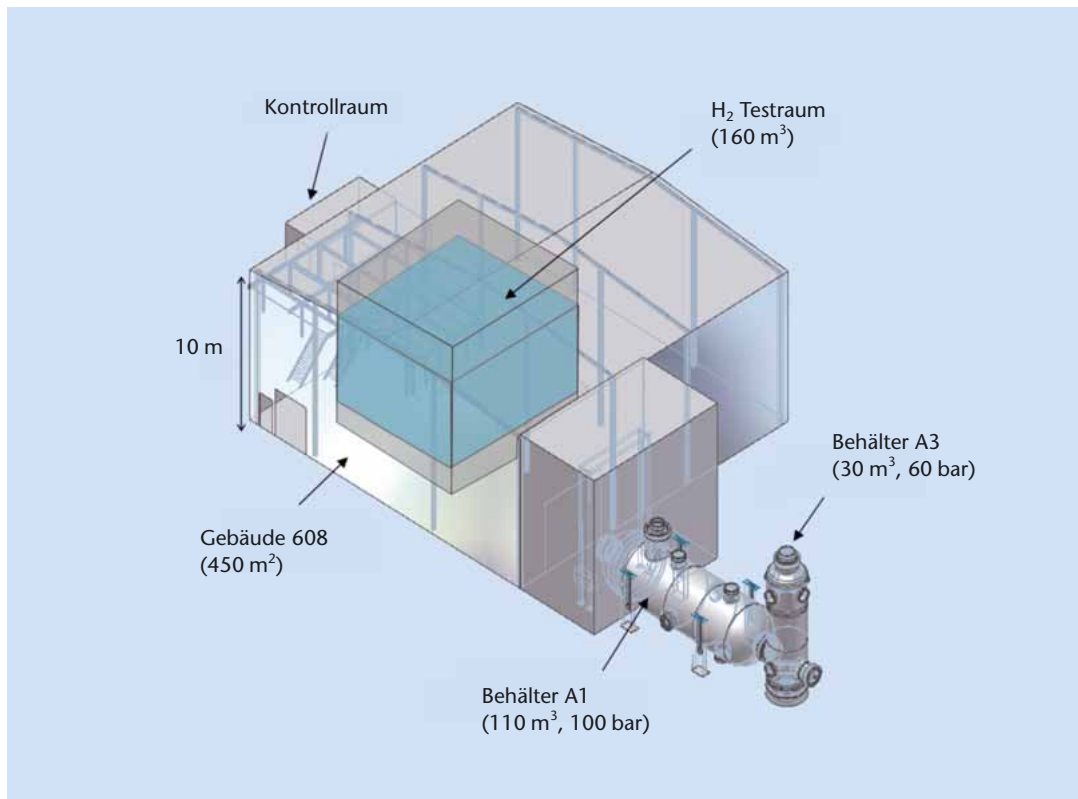


Abbildung 3 Versuchszentrum des FZK für Freisetzung- und Verbrennungsexperimente mit Wasserstoff



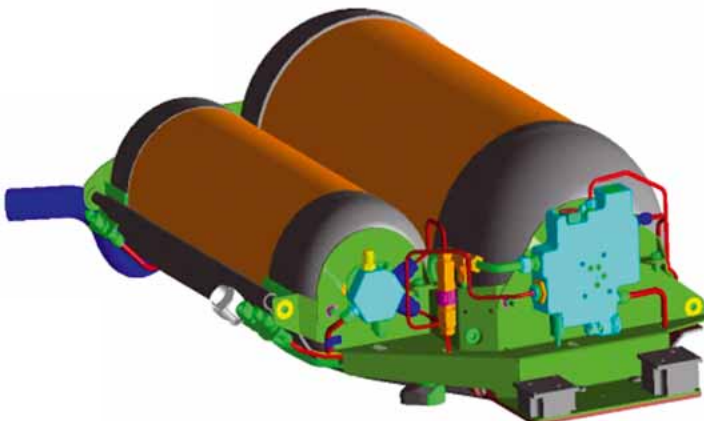
Abbildung 4
Versuchsbehälter für
Verbrennungsversuche
mit großen Wasser-
stoffmengen

Stand der Sicherheit in der Transporttechnik

Wasserstoff wird in der Industrie in großen Mengen hergestellt und verbraucht, jährlich ca. 500 Milliarden m³ weltweit. Er kommt vor allem in der Petrochemie (Benzinherstellung), bei der Ammoniak- und Methanolherstellung, in der Lebensmittelchemie (Fetthärtung), der Stahlindustrie (Eisenreduktion) und als Raketentreibstoff zum Einsatz. Es gibt deshalb sichere und langfristig erprobte industrielle Transporttechnologien für flüssigen und gasförmigen Wasserstoff. Wegen der geringen Dichte von Wasserstoff (71 kg/m³ LH₂¹, 0.09 kg/Nm³H₂) sind die

¹LH₂ = Liquid Wasserstoff

Abbildung 5
Wasserstoff-
Druckgasspeicher aus
Kompositwertstoffen
für Drücke bis
700 bar und 3.1 kg
H₂-Inventar



Nettoladungen beim LKW-Transport überraschend gering. Ein Lastzug für 53 m³ LH₂ transportiert nur etwa 3300 kg H₂, während es bei Gasflaschen für 3000 Nm³ CGH₂ (Compressed Gaseous Hydrogen) sogar nur 270 kg sind.

Pipelines

Eine attraktive Transportmöglichkeit bieten Pipelines. Die Firma Air Liquide betreibt im Raum Nordfrankreich, Belgien und Holland ein Pipeline-System für Wasserstoff mit einer Länge von insgesamt 966 km bei einem Betriebsdruck von 100 bar. Weitere Wasserstoffpipelines bestehen z. B. im Rhein-Ruhr-Gebiet (240 km) und im Leuna-Merseburg-Bitterfeld-Gebiet (150 km). Diese Pipelines verbinden große industrielle Wasserstoffhersteller und -Verbraucher. Wasserstoff kann risikolos und ohne nennenswerte Verluste in Stahlpipelines transportiert werden. Die dabei verwendeten Stähle sind sowohl bei Raumtemperatur als auch bei höheren Temperaturen für den Wasserstofftransport sehr gut geeignet.

Fahrzeuge

Ein wichtiger Sektor der Transporttechnik ist die Speicherung und der Transport von Wasserstoff in Fahrzeugtanks. Dazu wurden Flüssigwasserstofftanks und Gasdruckbehälter für den Einsatz in PKW und Bussen entwickelt. Heutige Speichertechnologien für mobile Anwendungen erreichen noch nicht die Energiedichten von üblichen Diesel- und Benzintanksystemen (etwa 30 MegaJoule pro Liter (MJ/l), bzw. 35 MJ/kg). Am besten schneiden derzeit LH₂-Speicher mit bis zu 8 MJ/l bzw. 20 MJ/kg ab. Um Gasdruckspeicher auf vergleichbare Energiedichten zu verbessern, sind Systeme aus leichten Kompositwerkstoffen mit 700 bar Speicherdruck in der Entwicklung (Abb.5).

Brennstoffzellen

Ein wichtiger Schritt bei der Entwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen besteht in der Systemintegration von Antrieb, H₂-Speicher und Brennstoffzellenaggregat, verbunden mit einem Wasserstoffsicherheitskonzept. Im Rahmen des Projektes HyLite entwickelt das DLR gemeinsam mit der Zulieferindustrie eine Brennstoffzellenenergieversorgung für ein Elektrofahrzeug, das bisher mit einem Batteriesatz ausgerüstet war. Das Fahrzeug dient als Versuchsträger für die

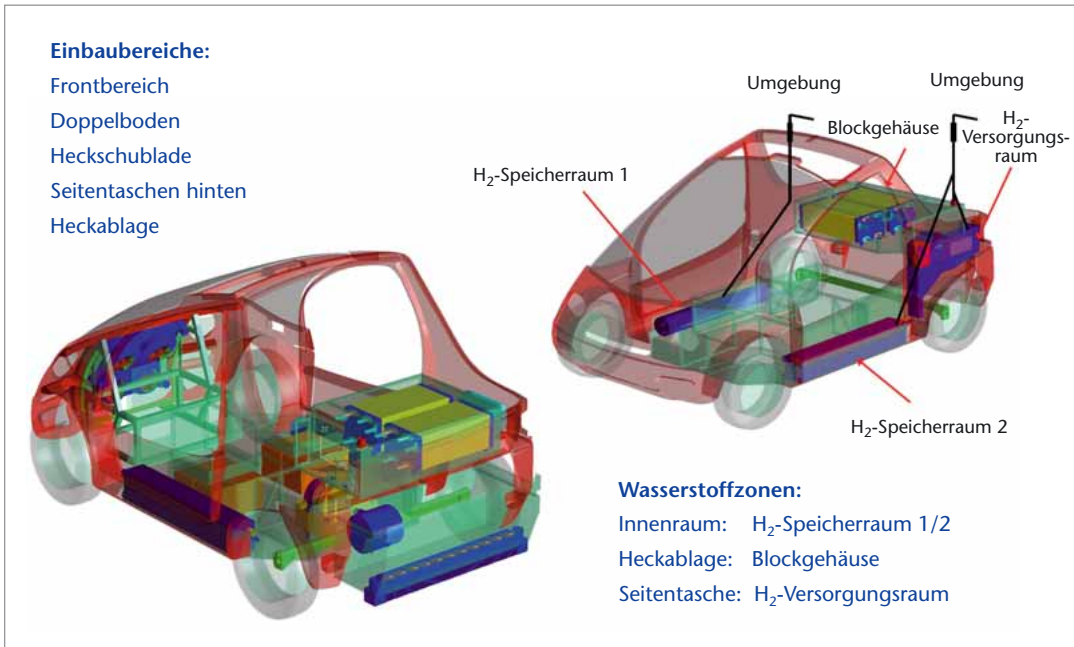


Abbildung 6
 Entwurf für ein PEMFC-Fahrzeugkonzept der DLR

von den Projektpartnern entwickelten Komponenten. Das DLR ist im Projekt für Systemdesign und Systemintegration verantwortlich und betreibt neben dem Fahrzeug weitere stationäre Prüfstände (Abb. 6).

Im Rahmen des Projektes wurde ein Wasserstoffsicherheitskonzept erarbeitet, das auf einer geeigneten Packungstechnik beruht. Innerhalb geeigneter Packungsräume des Fahrzeugs wurden

vier „Wasserstoffzonen“ spezifiziert, die jeweils gasdicht zum Innenraum ausgeführt werden. Außerdem verfügt jeder dieser Räume über eine nicht verschließbare Öffnung, die an der höchsten Stelle des Raumes angebracht ist (Abb. 7). In den Leitungen, die von den Wasserstoffzonen nach außen führen sind H₂-Detektoren angebracht, die fest mit der Not-Ausschaltung des Fahrzeugs verdrahtet sind.

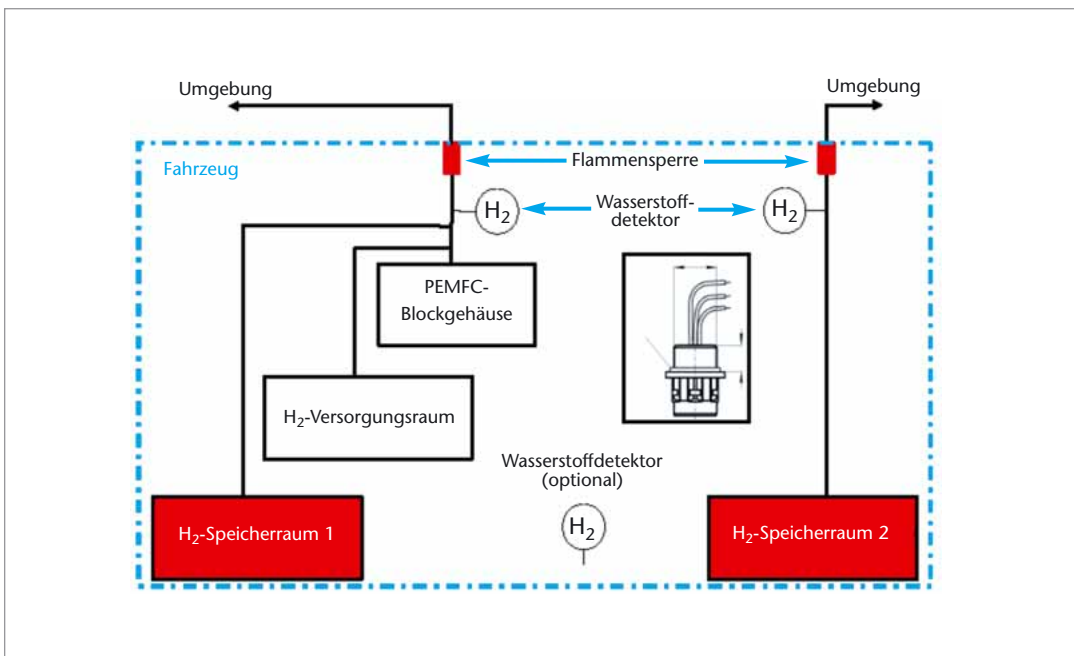


Abbildung 7
 Wasserstoffsicherheitskonzept der DLR-Fahrzeugstudie mit PEMFC

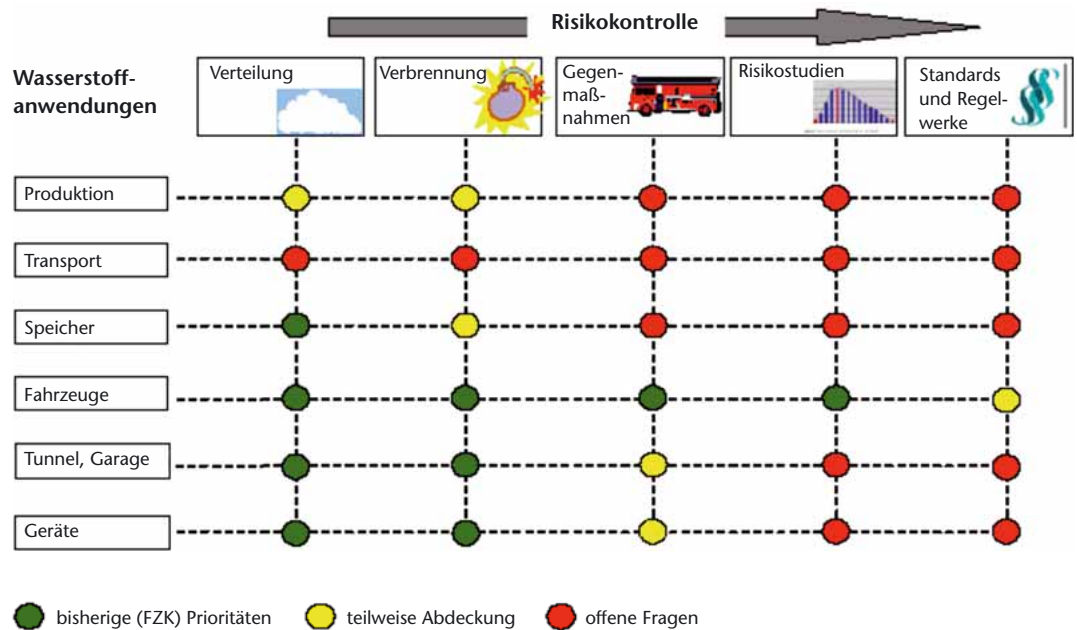


Abbildung 8
Aufgabenfeld für zukünftige Wasserstoffsicherheitsuntersuchungen

Die verwendeten Gasableitungen sind elektrisch leitfähig und mit der Fahrzeugmasse verbunden. Außerdem sind in der Not-Abschaltungskette zwei Beschleunigungssensoren eingebunden, die bei einem Crash einen Not-Abschaltung auslösen.

Das DLR betreibt weiterhin einen Prüfstand für Brennstoffzellensysteme, der aus folgenden Modulen aufgebaut ist: Brennstoffzellen-Modul, Wasserstoffversorgungsmodul, Luftversorgungsmodul, Wasser- und Wärmemanagement-Modul, sowie Steuerungs- und Messdatenerfassungs-Modul. Mit diesem Prüfstand werden Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Brennstoffzellensystemen durchgeführt. Dabei können zeitabhängige Betriebsparameter wie mittlere und minimale Zellspannung, Soll- und Ist-Strom, Luftmassenstrom, sowie H₂- und Luftdrücke bei transienten Leistungsänderungen des Brennstoffzellen-Stapels gemessen werden. Aus diesen Daten lassen sich die optimalen Betriebsstrategien für verschiedene Leistungsanforderungen ableiten.

Zukünftige Aufgaben

Die Sicherheitsaspekte des Energieträgers Wasserstoff werden im europäischen Network-of-Excellence „HySafe“ systematisch untersucht. Das Konsortium besteht aus 24 Partnern aus 12 europäischen Ländern und Kanada. Die Koordination von HySafe liegt beim Forschungszentrum Karlsruhe. Industrie, Forschungseinrichtungen und Universitäten werden in den Jahren 2004 - 2008 durch internationale Kooperationen die existierenden Experimentiereinrichtungen, Simulationswerkzeuge und Arbeitsgruppen zusammenführen, sowie die wichtigsten Aufgaben im Bereich der Wasserstoffsicherheit identifizieren. Das gesamte anstehende Aufgabenfeld ist in Abb.8 für die verschiedenen Wasserstoffanwendungen und die zugehörigen Risikokontrollmaßnahmen dargestellt. Die bisherigen Prioritäten der FZK-Arbeiten betrafen z. B. die Untersuchung von H₂-Verteilungs- und Verbrennungsprozessen bei Fahrzeugen in einer weitgehend geschlossenen Umgebung, wie Tunnel und Garage. Ziel ist die Ableitung von wirkungsvollen Schutzmaßnahmen und die Bereitstellung von grundlegenden Daten für H₂-Standards und Regelwerke. Durch die Kombination der Expertise der verschiedenen HySafe-Partner kann das gesamte Aufgabenfeld abgedeckt und bestehende Lücken identifiziert werden.

Schlussfolgerung

Erfahrungen mit Wasserstoff haben gezeigt, dass Unfallrisiken bei der Einführung neuer H₂-Technologien frühzeitig erkannt und kontrolliert werden müssen, damit keine sicherheitsbedingten Akzeptanzbarrieren entstehen. Wasserstoff ist nicht gefährlicher als die heutigen fossilen Brennstoffe, aber er verhält sich anders. „Learning bei doing“ wäre hier der falsche Ansatz.

Für die Untersuchung möglicher Unfallabläufe sind im Forschungszentrum Karlsruhe bereits moderne dreidimensionale-Simulationsprogramme und große Testanlagen vorhanden. Diese können für die Entwicklung von funktionalen, sicheren und vom Endverbraucher akzeptierten Produkten eingesetzt werden. Im Transportsektor gibt es sichere und für den industriellen Einsatz erprobte Technologien. Für eine zukünftige flächendeckende Verteilung von Wasserstoff bieten sich insbesondere Pipelinesysteme an, wie sie bereits für Wasserstoff und Erdgas bestehen. Für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge wurden überzeugende und bereits erprobte Sicherheitskonzepte entwickelt, z. B. beim DLR und verschiedenen deutschen Automobilherstellern.

Im Bereich der Standards und Regelwerke sind auf der europäischen Ebene noch erhebliche Anstrengungen notwendig, um vorhandene genehmigungsbedingte Innovationsbarrieren abzubauen. Dazu muss auch eine breitere wissenschaftliche Basis geschaffen werden. Insgesamt ist zu erwarten, dass der Energieträger Wasserstoff auch bei einer breiten Markteinführung sicher genutzt werden kann, sofern seine spezifischen Eigenschaften berücksichtigt werden.

Wasserstofflogistik – verteilen, speichern und betanken

Prof. Dr. Bernd Höhlein
FZ Jülich
b.hoehlein@fz-juelich.de

Thomas Grube
FZ Jülich
th.grube@fz-juelich.de

Jaco Reijerkerk
Linde AG
jaco.reijerkerk@linde-gas.com

Dr. Thomas Aicher
Fraunhofer ISE
thomas.aicher@ise.fraunhofer.de

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

Einführung

Abnehmende Ölressourcen, höhere Kraftstoffpreise und eine notwendige Reduktion klimarelevanter und lokaler Emissionen verstärken den Druck auf neue Energieträger und Energieumwandlungssysteme [1].

Unsere Herausforderung besteht darin, eine saubere, sichere und zugleich zuverlässige Bereitstellung von Energie zu bezahlbaren Preisen und bei wirtschaftlicher Tragfähigkeit zu realisieren.

Auf dem Weg in eine wasserstoff-orientierte Energiewirtschaft wird nicht nur die Herstellungsfrage sondern auch die Frage nach der Logistik der Wasserstoffbereitstellung bis hin zum Kunden von Bedeutung sein. Bei der heute fossilbasierten Wasserstoffbereitstellung kann beispielsweise der Kostenanteil dieser Logistik ab zentralem Erdgasreformer bis zu 2/3 der Wasserstoffkosten (1/3 für zentrale Produktion) beim Tanken betragen. Optionen und Herausforderungen dieser Wasserstofflogistik sind zu analysieren.

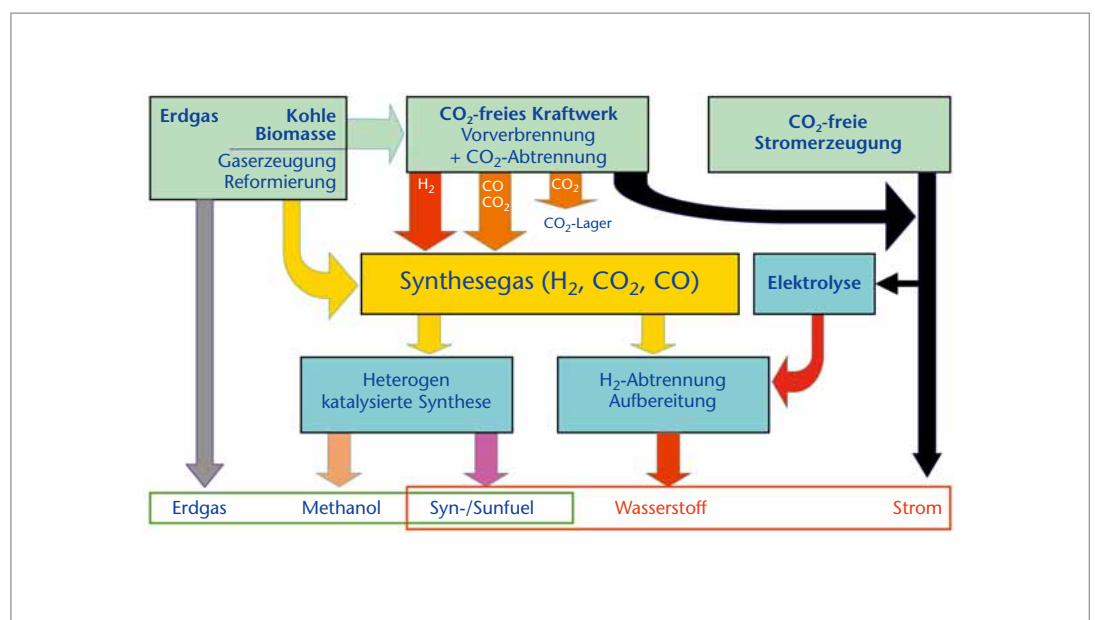
Zukünftige Primär- und Sekundärenergieträger

Zukünftige Sekundär- oder Endenergieträger werden Aussicht auf mittel- bis langfristigen Einsatz haben, wenn sie gleichzeitig für konventionelle als auch für neue Energieumwandlungssysteme mit Brennstoffzellen auch unter Einsatz regenerativer Primärenergieträger genutzt werden können [2]. Der Weg dazu führt über synthese gasstämmige Energieträger wie Methanol, Synfuel (auf Erdgasbasis), Sunfuel (auf Biomassebasis) oder Wasserstoff, wie in *Abb. 1* dargestellt.

In den dargestellten Synthesegaspool können folgende Gase eingespeist werden:

- Synthesegas aus der Erdgasreformierung
- Synthesegas aus der Kohle
- Synthesegas aus der Biomasse
- Wasserstoff aus der CO₂-freien Stromerzeugung
- Wasserstoff aus der Elektrolyse durch fossil oder regenerativ hergestelltem Strom

Abbildung 1
Zukünftige Primär- und Sekundärenergieträger unter besonderer Berücksichtigung synthese gasstämmiger Energieträger



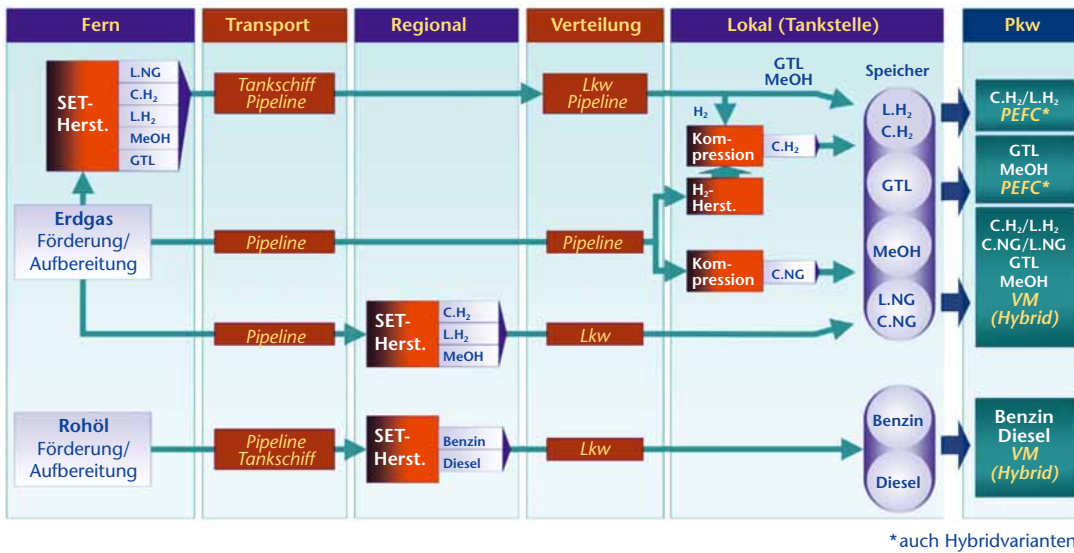


Abbildung 2
Konkurrierende
Antriebssysteme
und Kraftstoffpfade
fossiler Herkunft

- L.NG
flüssiges Erdgas
- L.H₂
flüssiger Wasserstoff
- C.NG
komprimiertes Erdgas
- VM
Verbrennungsmotor
- GTL
Gas-to-Liquid
Kraftstoffe

Auf der Nutzerseite können die Gase so eingesetzt werden:

- Erdgas kurz- bis mittelfristig direkt in Verbrennungsmotoren [3]
- Methanol, Syn-/Sunfuel mittelfristig bis langfristig für Verbrennungsmotoren oder für besondere Brennstoffzellenanwendungen
- Wasserstoff mittelfristig für Verbrennungsmotoren und langfristig für Brennstoffzellenantriebe [4]

Bereitstellungswege für Kraftstoffe aus fossilen Energiequellen

Im Straßenverkehr gibt es für die Zukunft eine Reihe von Kraftstoffversorgungsmöglichkeiten auf fossiler Basis. Diese konkurrieren miteinander je nach Marktsituation und geographischen Gegebenheiten und können kurz- bis mittelfristig für Verbrennungsmotoren sowie mittel- bis langfristig für Brennstoffzellenantriebe genutzt werden.

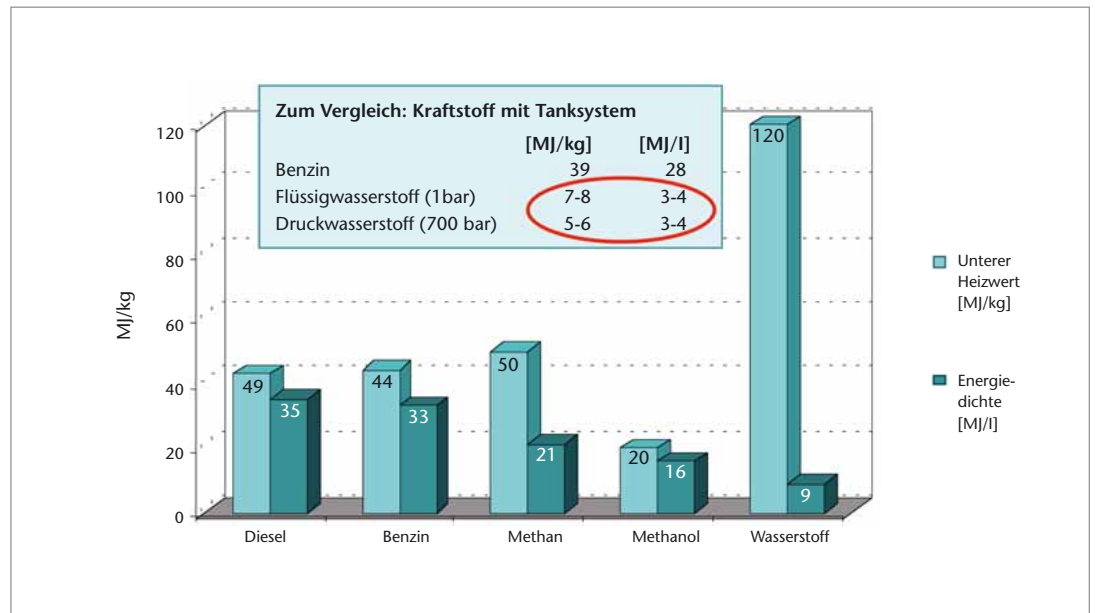
Für den Wasserstoff sind folgende Bereitstellungswege möglich:

- an der Erdgasquelle aus Erdgas erzeugt und konditioniert (verflüssigt oder komprimiert) mit anschließendem Transport nach Europa bis hin zu den Tankstellen

- in Deutschland an einer Erdgas-Pipeline in großen zentralen Reformierungsanlagen erzeugt und konditioniert mit anschließendem Transport zu den Tankstellen (kurz- bis mittelfristig Straßentransport, langfristig Pipelinetransport)
- an der Tankstelle aus Erdgas in kleinen Reformern erzeugt und direkt nach entsprechender Konditionierung verteilt
- an der Tankstelle aus Strom in kleinen Elektrolyseuren an der Tankstelle erzeugt und direkt nach entsprechender Konditionierung verteilt
- für erste kurzfristige Nischenanwendungen aus den vorhandenen H₂-Pipelinesystemen, Raffinerien und Chemieparcs für die Tankstelle bereitgestellt

Diese Bereitstellungswege müssen mit Bezug auf Energieaufwand, Emissionen und Kosten bilanziert werden, so wie es in den Studien [5] bis [10] mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung durchgeführt wurde. Die genannten Studien wurden bewertet und sind in den nachfolgenden Ausführungen zur Wasserstoffbereitstellungslogistik berücksichtigt [11].

Abbildung 3
Bewertung der
Speicherdichte von
Kraftstoffen ohne
Tanksystem [12]
Quelle: Linde



Wasserstoff in langfristigen Energieversorgungsstrukturen

Langfristig spielen Wasserstoff und Elektrizität zusammen eine herausragende Rolle. Einerseits kann Strom direkt ins Versorgungsnetz eingespeist werden, wobei Elektrizität im Gegensatz zu Wasserstoff auch Informationen übertragen und speichern kann. Andererseits verfügt der Wasserstoff durch seine Speicherfähigkeit über einen Vorteil gegenüber Elektrizität, der die Verwendung gerade in mobilen Anwendungen und zur Einbindung fluktuierender Solar- oder Wind-Energie attraktiv macht. Wasserstoff und Elektrizität sind, wenn auch mit Umwandlungsverlusten, wechselseitig konvertibel und erlauben im Versorgungssystem eine hohe Flexibilität. Dies ist eine Voraussetzung, um das Bereitstellungsnetz aus zentralen und dezentralen Energieversorgern sowie aus fluktuierenden Einspeisungen stabil halten zu können. Beide Energieträger lassen sich auf fossiler, nicht-fossiler und langfristig regenerativer Basis herstellen.

Bausteine einer Wasserstofflogistik bis zur Tankstelle

Die Bausteine einer Wasserstofflogistik von der Erzeugung bis hin zur Abgabe an den Kunden an der Tankstelle werden durch Produktion, Konditionierung, Transport, Speicherung und Betankung bestimmt (Abb. 2). Dabei spielt bei fast allen Bausteinen die Speicherung eine besondere Rolle. Abb. 3 zeigt die besondere Situation der Speicherung von Wasserstoff, die massebezogen alle anderen überragt mit 120 MJ/kg aber volumenbezogen mit weniger als 9 MJ/l den untersten Rang einnimmt. Bewertet man nicht nur den Kraftstoff allein sondern bezieht auch das Tanksystem ein, so ergibt sich gegenüber Benzin im Tank eine Reduktion der Systemspeicherdichte für flüssigen Wasserstoff im Tank bei 1 bar oder gasförmigen Wasserstoff im Tank bei 700 bar um mehr als 80% (Abb. 3).

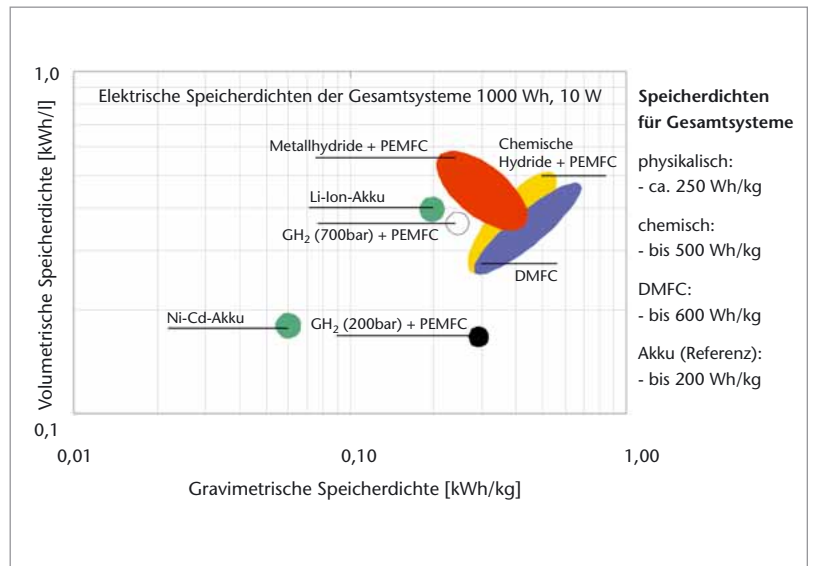
Im europäischen HYPNET Projekt [13] wurden die Speicherdichten der unterschiedlichen Wasserstoff-Speichersysteme (also inklusive Tank) für Hydridspeicher (MH), Flüssigspeicher (LH₂), Druckspeicher (CGH₂), dargestellt und diskutiert.

Heutige Wasserstoff-Speichersysteme liegen demnach im Bereich von 3-4 MJ/l und etwa 6 Gewichtsprozent Wasserstoff bezogen auf das Systemgewicht. Ein erheblicher Forschungs- und

Entwicklungsaufwand wird erforderlich sein, um für eine zukünftige Einführung von Wasserstoff auf dem Verkehrsmarkt die Speicherdichten zu verbessern.

Geht man in der Speicherbewertung noch einen Schritt weiter und bezieht für portable Brennstoffzellenanwendungen (Abb. 4) Energieträger und -wandler mit in die Bewertung ein, so ergeben sich für kleine portable Anwendungen elektrische Speicherdichten von etwa 1,4 MJ/kg oder MJ/l für Hydridspeicher und PEFC (etwas niedriger für Brennstoffzellen auf Methanolbasis) verglichen mit einer elektrischen Speicherdichte von Ni-Cd-Akkus von 0,2 MJ/kg und 0,7 MJ/l (Li-Ion Akku: 0,7 MJ/kg und 1,4 MJ/l).

Beim Wasserstoffeinsatz im Verkehr zeigt sich, dass mit einem LKW-Anhänger von etwa 40 t etwa 6 mal mehr Wasserstoff und damit Energie transportiert werden kann, wenn Flüssigwasserstoff transportiert wird (Abb. 5). Es sei aber auch gesagt, dass bei der großtechnischen Konditionierung von Wasserstoff etwa 30% der Energie des zu verflüssigenden Wasserstoffs in Form von Strom eingesetzt werden muss im Gegensatz zu 10% bei komprimiertem Wasserstoff.



Ein wesentlicher Unterschied dieser beiden Speicherformen für Wasserstoff ist bei der Tankstelle von Bedeutung, wo der Aufwand für das Wasserstoff-Management von Druckwasserstoff an der Tankstelle bis zur Abgabe an das Fahrzeug des Kunden (Abb. 6) größer sein wird als der Aufwand zur Herstellung von Flüssigwasserstoff.

Abbildung 4 Wasserstoffspeicher für portable Anwendungen

Bewertung der Anhänger



← Anhängen für **druckgasförmigen Wasserstoff** mit **leichtgewichtigen Druckflaschen aus Verbundmaterial**

Gesamtgewicht	40 t
Wasserstoffinhalt	530 kg

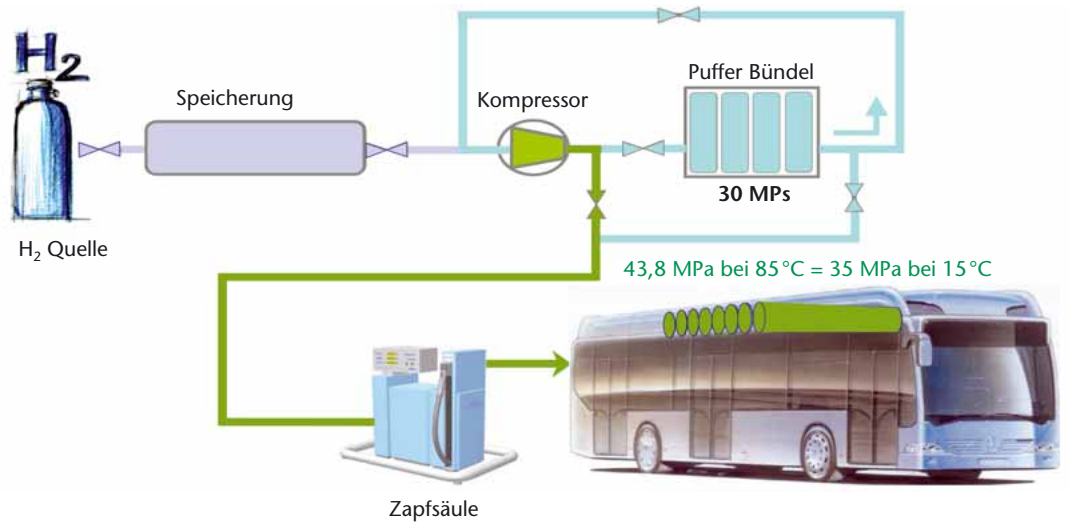
Anhängen für **Flüssigwasserstoff** mit **doppelwandig isoliertem Tank** →

Gesamtgewicht	< 40 t
Wasserstoffinhalt	3.370 kg



Abbildung 5 LKW für den Transport von Druckwasserstoff (oben) und Flüssigwasserstoff (unten) [12] Quelle: Linde

Abbildung 6
Funktion einer Hochdrucktankstelle für Wasserstoff [12]
Bewertungskriterien:
Platzbedarf,
Investitions- und Betriebskosten,
H₂-Management



Bewertung der Bereitstellung von Wasserstoff

Primärenergie und entstehende Klimagasemissionen sind zwei wesentliche Kriterien bei der Bewertung der Kraftstoffbereitstellung bis hin zur Tankstelle. Eine weitere Bewertungsgröße sind die Bereitstellungskosten des Endenergieträgers.

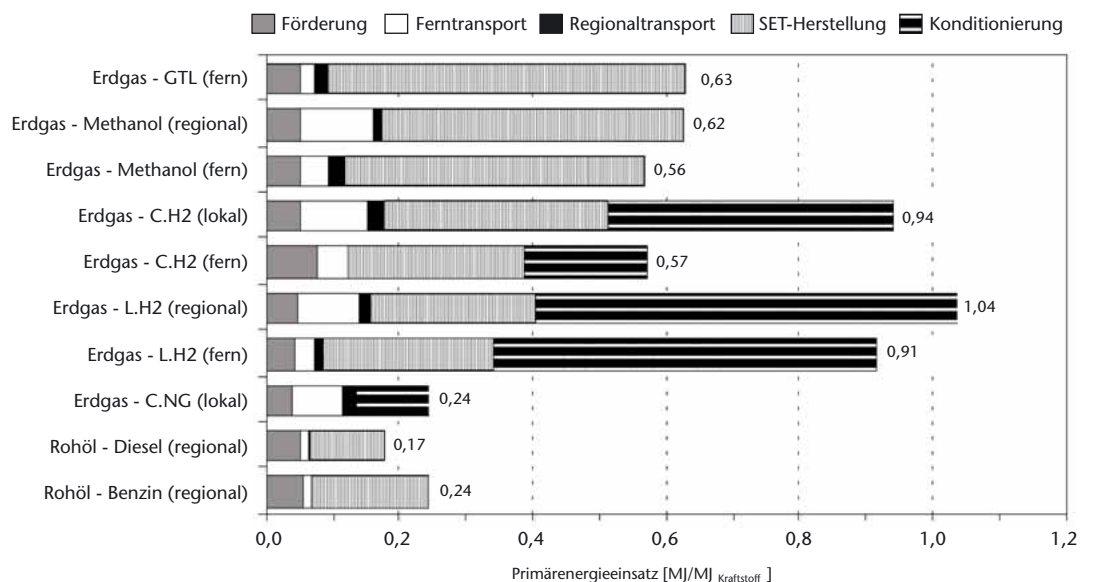
1. Primärenergie- und Klimagasemissionen

Abb. 7 fasst Ergebnisse einer Bilanzierung der aufgewendeten Primärenergie für die Kraftstoff-

bereitstellung bis hin zur Tankstelle und Abb. 8 entsprechend die für die Klimagasemissionen zusammen [8]. Jede Bilanzierung einer solchen vom „Bohrloch bis zum Pkw“ oder Well-to-Tank Kraftstoffkette wurde durchgeführt auf der Basis vorgegebener Randbedingungen, insbesondere unter Berücksichtigung der in Abb. 2 diskutierten lokalen, regionalen oder fernen Umwandlungsschritte und Transportmöglichkeiten.

Kurz zusammengefasst kann festgestellt werden, dass der niedrigste Primärenergieaufwand erforderlich ist für die Bereitstellung von Benzin, Diesel und komprimiertem Erdgas (C.NG).

Abbildung 7
Primärenergetisch bewertete Energieaufwendungen bei der Bereitstellung von fossilen Kraftstoffen [8] (vgl. auch Abb. 2)



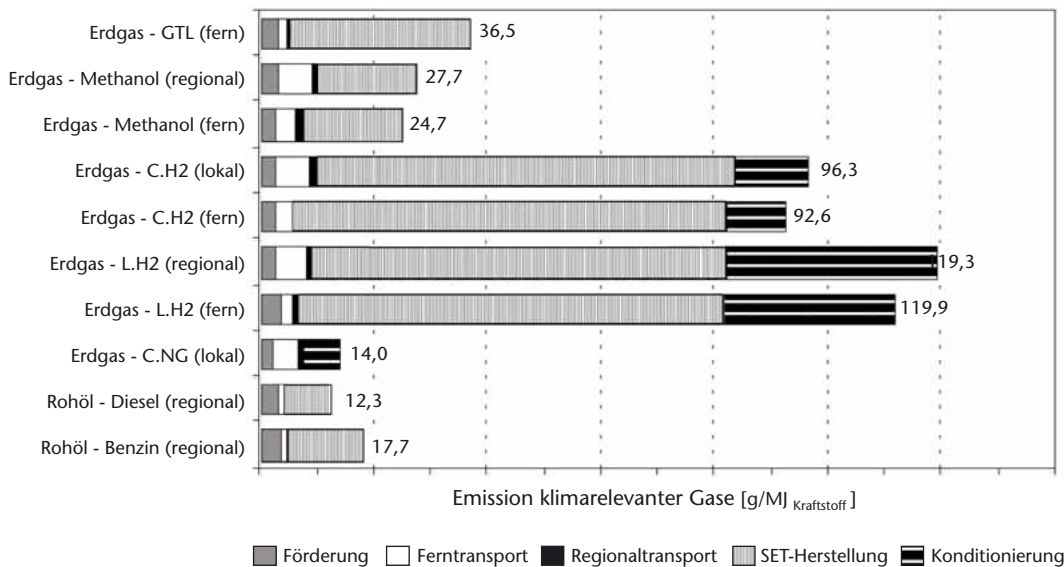


Abbildung 8
Klimagasemissionen bei der Bereitstellung von Kraftstoffen fossiler Herkunft [8] (vgl. auch Abb.2)

Den nächst höheren Primärenergieaufwand erfordert komprimierter Wasserstoff, der in großen Erdgas-Reformierungsanlagen erzeugt, in Pipelines transportiert und an der Tankstelle auf 430 bar für die Abgabe an den Pkw komprimiert wurde („Erdgas - C.H₂ fern“).

Der Aufwand von 0,57 MJ Primärenergie pro MJ C.H₂ am Pkw-Einfüllstutzen ist etwas geringer als der Aufwand für Methanol (regional) oder Fischer-Tropsch-Diesel (fern), beide auf Erdgasbasis. Der größte Primärenergieaufwand ist bei der Abgabe von flüssigem Wasserstoff (L.H₂) insbesondere bei regionaler Produktion bei einer Verflüssigung mit Strom aus dem deutschen Stromnetz erforderlich. Elektrolytisch hergestellter Wasserstoff mit Strom aus dem deutschen Stromnetz würde selbst bei C.H₂-Anlieferung gegenüber der zuletzt diskutierten Kette einen erheblich höheren Primärenergieaufwand von etwa 3 MJ/MJ erforderlich machen.

Da hier nur fossil-hergestellter Wasserstoff diskutiert wird, so wie er in einer ersten Einführungsphase auf dem Energiemarkt anzubieten wäre, wird deutlich, dass auf allen Wasserstoffpfaden die höchsten CO₂-Emissionen anfallen, da sämtlicher Kohlenstoff schon bei der Herstellung dem Prozess entzogen wird (Abb. 8). In dieser Darstellung sind allerdings Abtrennung und Endlagerungsschritte nicht berücksichtigt.

Gerade die CO₂-Diskussion macht deutlich, dass letztendlich die Bewertungskette nicht

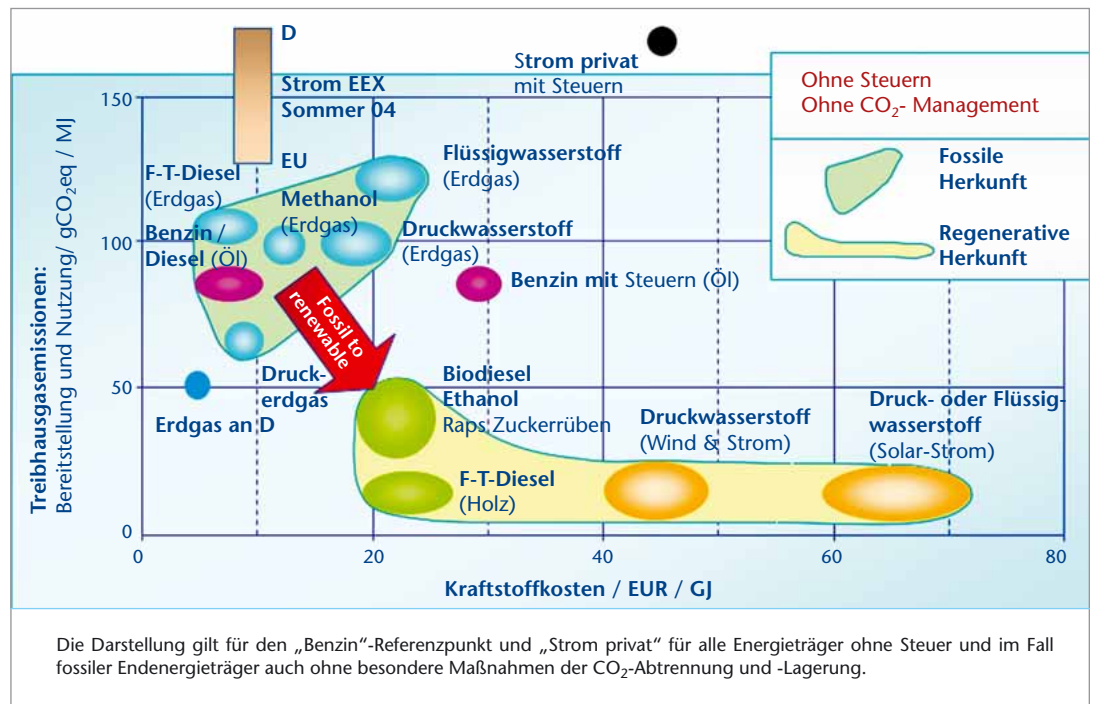
nur bis zur Tankstelle sondern einschließlich der Nutzung zu betrachten ist. Entsprechende Zahlen in g CO₂ pro MJ-Kraftstoff (Bereitstellung und Nutzung) sind in Abb. 9 dargestellt und werden dort im Zusammenhang mit den Bereitstellungskosten aufgezeigt.

2. Bereitstellungskosten

Der Weg zu emissionsarmen und insbesondere treibhausgasfreien Endenergieträgern wird zu einem höheren Kostenniveau führen. Dies wird in der Darstellung der Bereitstellungskosten (EUR/MJ) für Endenergieträger im Zusammenhang mit den CO₂-Emissionen (g/MJ) bei der Bereitstellung und vollständigen Verbrennung von jeweils einem Megajoule – also ohne Berücksichtigung von unterschiedlichen Wirkungsgraden der Energieumwandlungssysteme – in Abb. 9 gezeigt.

Benzin und Diesel auf Erdölbasis sowie C.NG und Fischer-Tropsch-Diesel (FTD auf Erdgasbasis als Synfuel) können unter bestimmten Voraussetzungen ein vergleichbares Kostenniveau haben. Methanol aus Erdgas ist etwas teurer und komprimierter Wasserstoff (C.H₂) aus Erdgas nur zwei- bis dreimal so teuer wie konventionelle Energieträger, aber auf etwas höherem CO₂-Niveau. Alle genannten Endenergieträger einschließlich RME (Rapsölmethylester) und Ethanol aus Zuckerrüben sind in der Anlieferung ohne staatliche Abgaben günstiger als Benzin an der Tankstelle einschließlich staatlicher Abgaben.

Abbildung 9
Gegenüberstellung
von Bereitstellungskosten
und Klimagasemissionen
von Kraftstoffen
(Klimagasemissionen
inklusive der vollständigen
Verbrennung
von jeweils 1 MJ).



Die aus Biomasse hergestellten Energieträger (RME oder Biodiesel, Ethanol und FTD aus Holz) ordnen sich bezüglich der CO₂-Emissionen und Kosten auf einem sehr niedrigen CO₂-Niveau ein – bei niedrigeren Kosten gegenüber Wasserstoff aus Wind- oder Photovoltaik.

In dieser Diskussion muss aber auch berücksichtigt werden, dass mittelfristig sich generell die Bereitstellung fossiler Kraftstoffe verteuert und sich die Kostenschere zwischen regenerativen und fossilen Kraftstoffen verkleinert. Auch ist die Endenergieträgernutzung – zum Beispiel im Fahrzeug – mit einzubeziehen und hier gerade die effektive Wasserstoffnutzung im Brennstoffzellenantrieb eine Veränderung der Bilanzen und damit langfristig eine besondere Option für die Zukunft darstellt.

3. Kostenanalyse einer Wasserstofflogistik

Abb. 10 zeigt eine Übersicht der Kosten einer Wasserstofflogistik bei einer zentralen Produktion in Erdgasreformern (Z-SMR), Transport mit Lkw und druckförmiger (G-B) oder flüssiger (L-B) Betankung bei entsprechendem Wasserstoff-Management an der Tankstelle.

Diese Varianten werden verglichen mit einer Möglichkeit, Wasserstoff an der Tankstelle in kleinen Reformern zu erzeugen (On-Site Reformer)

oder Wasserstoff mit der Pipeline bis zur Tankstelle anzuliefern. Die Auslegung wird für eine 10% Kraftstoffsubstitutionsquote in Deutschland bestimmt [12].

Als Fazit dieser Analyse ist zu erkennen:

- Bei der Wasserstoff-Verflüssigung wird in der Prozesskette der höhere Primärenergieaufwand teilweise kompensiert durch einen geringeren Transportaufwand gegenüber der Druckwasserstoff-Variante.
- Das Wasserstoff-Management an der Tankstelle bestimmt die unterschiedlichen Betriebskosten einer Betankung von Druck- oder Flüssig-Wasserstoff. Hardwareumfang und damit Kosten für Flüssigwasserstoff sind niedriger.
- Die dezentrale Wasserstoff-Bereitstellung wird durch relativ hohe Stückkosten und Stromkosten (Elektrolyseure) beziehungsweise Erdgaskosten (On-Site Reformer) bestimmt.
- Eine langfristige Pipelineanlieferung erlaubt niedrige Wasserstoff-Bereitstellungskosten nur bei großer Kraftstoff-Substitutionsquote.

	Herstellung €/kg	Verflüssigung €/kg	Kompression €/kg	Transport €/kg	Betankung €/kg	Summe €/kg
Z-SMR 100 t/d ¹⁾ G-Bündel; G-B HTAS: 216 t/d ⁴⁾	1,02 0,55		0,42	0,66	0,75	2,8 (0,023 €/Mj)
Z-SMR 200 t/d ¹⁾ L-Transport; L-B	0,92	1,01		0,21	0,26 US: 0,6-0,3	2,4 (0,02 €/Mj)
Onsite-SMR G-B ¹⁾ On-Site-E G-B ²⁾	2,00 4,40				0,89 0,72	2,9 5,1 ²⁾ 2,9 ³⁾
Z-SMR 28 t/d ¹⁾ Pipeline; G-B 50% Quote 107 t/d ¹⁾ US: 1200 t/d ⁵⁾	1,27 1,01 1,03		0,14 0,14 s. Herst.	2,73 0,67 (290 km) 0,42 (600 km)	0,80 0,80 0,54	4,9 2,6 2,0

Z: Zentral; SMR-Erdgas-Reformierung; E: Elektrolyse; G: Druck H₂; L: Flüssig H₂; G/L-B Gas/Flüssig-Betankung

¹⁾ [12]; On-Site SMR 200 Nm³/h bei 1000 Stück und 777 €/kW Invest, Erdgas 7 €/GJ (On-Site); ~4-5 €/GJ (Z-SMR)
²⁾ On-Site-Elektrolyse nach RECHLER [12] bei Strom 6 Ct/kWh;
³⁾ On-Site-Elektrolyse nach RECHLER [12] bei Strom 2 Ct/kWh
⁴⁾ [14] Z-SMR Erdgas 3,5 €/GJ;
⁵⁾ [15] Z-SMR Erdgas 4,5 €/GJ, 150 km Pipeline, 600 000 €/km, 2,5 t/d H₂

Abbildung 10
Kosten der Wasserstoffbereitstellung
[12,14,15]

- Zentrale Anlagen auf Erdgasbasis erlauben heute H₂-Kosten (ohne Steuer) an der Tankstelle, die niedriger liegen als Benzin und Diesel. Letztere produzieren allerdings mehr CO₂ bei der Herstellung und Bereitstellung.
- Dezentrale Reformer erlauben keine wirtschaftliche CO₂-Abtrennung und für Wasserstoff per Pipeline angeliefert wäre dies erst bei Substitutionsquoten deutlicher größer 10% sinnvoll.

und regional unterschiedlichen Potenzialen. Im Bereich Forschung und Entwicklung besteht noch großer Handlungsbedarf insbesondere bei der Wasserstoffherstellung und der Bereitstellungslogistik bis hin zum Kunden. Die anstehenden Aufgaben der vorab beschriebenen Lösungsansätze einer Wasserstoffbereitstellung für den Verkehr sind nur zu lösen durch Bündelung der Ressourcen – international, national und regional.

Für ein kurz- bis mittelfristiges Wasserstoff-Angebot müssen vorrangig folgende Forschungs- und Entwicklungsziele bearbeitet werden:

- zentrale Prozesse für die Erschließung fossiler Energieträger mit CO₂-Abtrennung
- dezentrale Anlagen für die On-Site Wasserstoffherzeugung (Elektrolyseure)
- marktfähige Prozesse für die Darstellung erneuerbarer Energieträger
- Wasserstoff-Speicherungssysteme
- Wasserstoff-Infrastruktursysteme verbunden mit Wasserstoff-Management insbesondere an den Kundenstationen
- Bereitstellung marktfähiger Energieumwandlungssysteme mit Brennstoffzellen [4] und ihre peripheren Einheiten

Zusammenfassung und Optionen

Wasserstoff wird zunächst für Nischenbedarfe auf Basis fossiler Energieträger durch Bereitstellung aus zentralen oder dezentralen Anlagen sowie aus Chemieparcs und Raffinerien zunehmend mit CO₂-Abtrennung bereit gestellt. Er wird auf unterschiedlichen Transportwegen und mittels stationärer und mobilen Befüllungseinrichtungen für Kraftfahrzeuge und z. B. Kartuschen angeboten. Langfristig nimmt die Bedeutung regenerativ erzeugten Stroms für die direkte Nutzung und für die H₂-Bereitstellung zu, bei oft dezentraler Bereitstellung

Die Bereitstellungskosten für neue Energieträger und den langfristig angestrebten Wasserstoff müssen als Funktion des Brennstoff-Substitutionszieles und der Bereitstellungswege analysiert werden. Erheblicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand ist mittelfristig erforderlich. Staatliche Regulierungen und Life-Cycle-Cost-Analysen [16] sind notwendig. Die Logistik der Wasserstoffbereitstellung ist kosten- und energieintensiv, wenn man dabei Produktion, Konditionierung, Verteilung, Speicherung sowie das Wasserstoff-Management an der Tankstelle (für mobilen Einsatz im Kfz) oder Befüllstation (zur Befüllung von Kartuschen) berücksichtigt. Langfristig muss die hier aufgezeigte fossilbasierte Wasserstofflogistik auf nicht-fossil bzw. regenerativ erzeugten Wasserstoff umgestellt werden.

Literatur

- [1] IEA, World Energy Outlook 2002, OECD/IEA, Paris 2002
- [2] Höhlele, B.; Brennstoffzellensysteme und Wasserstoff als Energieträger; BWK Bd.56 (2004), Nr. 1/2 Höhlele, B., Nitsch, J., Wagner, U., Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen. Brennstoffzellenstudie, Projekt 686, Nr. 657, Schlussbericht, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt/M, 1998
- [3] Ramesohl, St. et al., Bedeutung von Erdgas als neuer Kraftstoff im Kontext einer nachhaltigen Energieversorgung. Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie, September 2003
- [4] TAB-Arbeitsbericht No. 67, Dagmar Oertel und Torsten Fleischer, TA-Projekt Brennstoffzellen-Technologie Endbericht, Büro für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages“, buero@tab.fzk.de
- [5] Well-to-Wheel Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context <http://ies.jrc.cec.eu.int/download/eh>
- [6] Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study. L-B-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, September 2002; www.lbst.de/gm-wtw
- [7] Grahl, M., Ökonomische Systemanalyse zum Antrieb von Personenkraftwagen mit Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen unter Verwendung neuer Kraftstoffe. in Beiträge zur Energieforschung, Dissertation.de Verlag im Internet GmbH Berlin, 2001
- [8] Berechnungsmodell für die Bewertung von Fahrzeug-/Kraftstoff-Systemen bezüglich Energiebedarf und Emissionen, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, April 2004

- [9] Höhlelein, B., Isenberg, G., Edinger, R., Grube, Th., Well-to-Wheel efficiencies of different fuel choices, Handbook of Fuel Cells. Herausgeber W. Vielstich, A. Lamm, H.A. Gasteiger, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2003
- [10] On the Road in 2020 - A Life Cycle Analysis of New Automobile Technologies. Massachusetts Institute of Technology (Cambridge USA), 2000/2003; www.mit.com/e-labNRC [2004] NATIONAL RESEARCH COUNCIL and NATIONAL ACADEMY of ENGINEERING [2004]: The Hydrogen Economy; The National Academies Press; www.nap.edu
- [11] Höhlelein, B.; Grube, T.; Vergleichende Bewertung zukünftiger Fahrzeug-Kraftstoffsysteme, VDI Innovative Fahrzeugantriebe, Dresden 11. und 12. November 2004
- [12] Diplomarbeiten von Reijerkerk, Valentin und Rechler, LINDE GAS, München
- [13] Towards a European Hydrogen Energy Roadmap; Executive Report; www.HyNet.info
- [14] Key questions to be solved to develop an EU Hydrogen Policy; The Hydrogen Economy – a Bridge to Sustainable Energy; Brüssel, 17. Juni 2003
- [15] National Research Council and National Academy of Engineering [2004]: The Hydrogen Economy; The National Academies Press; www.nap.edu
- [16] Ogden, J. M. et al., Societal lifecycle costs of cars with alternative fuels/engines. Energy Policy 32 (2004) 7-27

Brennstoffzellen im Vergleich mit anderen Energiekonversionstechnologien

Jochen Bard

ISET
jbard@iset.uni-kassel.de

Dr. Robert
Steinberger-Wilckens

FZ Jülich
r.steinberger@fz-juelich.de

Ulf Groos

Fraunhofer ISE
ulf.groos@ise.fraunhofer.de

Einführung

Brennstoffzellen müssen in allen Anwendungsbereichen etablierte Technologien verdrängen oder sich gegen konkurrierende neue Wandlungssysteme behaupten. Dies wird nur gelingen, wenn sich bei Einsatz der Brennstoffzellen in Handhabung, Zuverlässigkeit, Wirkungsgrad, Kosten und Umweltauswirkungen Vorteile ergeben. Bis zur breiten Markteinführung von Brennstoffzellen, die sicher noch einige Jahre auf sich warten lässt, werden sich aber viele konventionelle Technologien ebenfalls weiter entwickeln; und auch neue Energiekonversionstechnologien zum Beispiel im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung, Stirlingmotoren oder neue Dampfmaschinen werden in relativ kurzer Zeit verfügbar sein.

Dieser Beitrag soll die Situation für die Einsatzbereiche tragbare Stromversorgungen, Kraft-Wärme-Kopplung und Versorgung von elektrischen Bordnetzen in Fahrzeugen verdeutlichen. Der gesamte Bereich der Fahrzeugantriebe wird bewusst ausgeklammert.

Portable Stromversorgungen

Tragbare elektronische Geräte wie z. B. Camcorder, Mobiltelefone, Computer (Laptop, **PDA** **P**ersonal **D**ata **A**ssistants (Minicomputer) und viele elektrisch betriebene Werkzeuge werden heute mit Akkutechnologien betrieben. Dabei werden nur relativ kurze Betriebszeiten erreicht, wenn Größe und Gewicht des Akkus die Handhabung des Geräts nicht zu sehr beeinträchtigen sollen. Ursache dafür ist die relativ geringe Energiedichte dieser Akkus bezogen auf Volumen und Gewicht von nur wenigen Hundert Wattstunden pro Liter und pro Kilogramm.

Demgegenüber erreichen flüssige oder komprimierte gasförmige Kohlenwasserstoffe wie Benzin, Diesel, Butan oder Propan Werte von

einigen Tausend bis 10.000 Wh/l.

Nun lässt sich Benzin nicht direkt zum Antrieb eines Laptops nutzen (die Emissionen bei der Nutzung fossiler Brennstoffe wären im Indoor-Bereich auch nicht akzeptabel). Der Einsatz von Brennstoffzellen in Kombination mit relativ „sauberen“ Brennstoffen wie Methanol und Wasserstoff kann hier langfristig Abhilfe schaffen. Berücksichtigt man die Umwandlungswirkungsgrade von 20 bis 30%, so ergeben sich Speicherdichten im Bereich von etwa 1000 Wh/l. Darüber hinaus bietet diese Kombination die Möglichkeit, den Energiespeicher z. B. in Form eines Metallhydrids oder einer Methanolfflasche unabhängig von der Leistung der Brennstoffzelle zu skalieren. Ein rascher Austausch der Brennstoffbehälter ist leicht möglich. Damit wäre auch bei einer weiter anhaltenden schnellen Entwicklung der elektronischen Geräte mit immer größerer Leistungsfähigkeit und erweitertem Funktionsumfang auch auf lange Sicht eine zuverlässige und angemessene Stromversorgung möglich.

Ein Vorteil für eine rasche Markteinführung von Brennstoffzellen in diesem Bereich sind die sehr hohen spezifischen Energiekosten sowie die relativ schwierige Leistungssteigerung der heute etablierten Akkutechnologien. Dennoch sind noch erhebliche Entwicklungsschritte notwendig wie z. B. Erhöhung des Brennstoffzellen-Wirkungsgrades, Reduktion des peripheren Energieverbrauchs, weitere Miniaturisierung sowie die Auslegung für extreme Umgebungstemperaturen. Aussichtsreich sind aus heutiger Sicht kleine portable Stromversorgungssysteme auf Basis von Polymerelektrolytbrennstoffzellen (PEFC) und Wasserstoff sowie Direktmethanolbrennstoffzellen (DMFC). Letztere erreichen noch nicht die gleichen spezifischen Kosten, Leistungsdichten und Wirkungsgrade wie die PEFC, Handhabung und Speicherung von Methanol sind aber gegenüber dem Einsatz von Wasserstoff wesentlich einfacher.

Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Im Gegensatz zum oben genannten Bereich gibt es bei der Versorgung von Wohngebäuden sowie im industriellen Bereich keine technischen Schwierigkeiten mit der Strom- und Wärmeversorgung. Mit einem Anteil am deutschen Primärenergieverbrauch von etwa einem Drittel für Raumwärme und etwa 20% für Prozesswärme ergibt sich durch die gekoppelte Erzeugung von Wärme und Strom gegenüber der ungekoppelten Stromerzeugung in zentralen Kraftwerken und separater Wärmebereitstellung eine Brennstoffeinsparung im Bereich von 40% mit entsprechender Reduzierung der CO₂-Emissionen. Darin ist neben dem verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien die wichtigste Möglichkeit gegeben, den umweltpolitischen Zielen der Ressourcenschonung und des Klimaschutzes zu entsprechen. Daneben sind die Kosten für Strom und Wärme ein Wirtschaftsfaktor. Aber gerade hier liegt ein wichtiges Hemmnis für den Ausbau der Kraftwärmekopplung in Deutschland. Für ein kleines Motor-BHKW¹ mit 10 kW Leistung liegen die Stromerzeugungskosten bei knapp

9 Ct/kWh - eine im freien Markt erzielbare Vergütung liegt aber nur bei etwa 4,5 Ct/kWh. Das KWK-Gesetz schafft durch die Festsetzung erhöhter Einspeisetarife hier Abhilfe.

Alle Brennstoffzellentypen basieren auf exothermen elektrochemischen Reaktionen, es wird also immer Strom und Wärme erzeugt – dies prädestiniert Brennstoffzellen für die dezentrale KWK. Die Niedertemperatursysteme, vor allem die PEFC, ist besonders für die Raumwärmeerzeugung in Ein- und Mehrfamilienhäusern geeignet. Dieses Marktsegment wird heute von Diesel- oder Gasmotor-betriebenen so genannten Mikro-KWK-Anlagen versorgt. Die Anlagen leisten typischerweise 5 kW_{el} und werden in der Regel wärmegeführt betrieben, um in Kombination mit einem Spitzenlastkessel Warmwasser und Raumwärme bereit zu stellen. In über 10.000 Anlagen wird dabei vorwiegend Erdgas eingesetzt, Anlagen mit biogenen Brennstoffen wie Rapsöl sind mit ca. 50 installierten Maschinen noch selten. Besonders häufig findet man solche BHKWs in Kleingewerben, Krankenhäusern

¹ BHKW = Blockheizkraftwerk

Hersteller/Produkt	Motortyp	Leistung kW (el./therm.)	Wirkungsgrad (el./gesamt)	weitere Informationen
Senertec Dachs HKA	Diesel/Gas-Kolbenmotor	4,5/12,5	27%/88%	ca. 2650/kW
Ecopower BHKW	Gas-Kolbenmotor	1,3-4,7/12,5	25%/91%	ca. 2650/kW
Honda Ecowill	Gas-Kolbenmotor	1/3,25	20%/85%	nur in Japan über 6000 Einheiten
Enginion Steamcell	Dampfentspannungsmotor	0,5-4,6/2-25	15%/>90%	Feldversuche ab 2005, Ziel 1500 E/kW
OTAG Lion	Freikolbendampfmaschine	0,2-3/2-16		Feldversuch mit 10 Einheiten
Whispergen	Alpha-Stirling	0,4-1,2/4,9-8	12%/>90%	Feldversuch mit 500 Einheiten
BG-Group Microgen	Freikolben-Stirling	1,1/15	18%/>90%	Feldtest 50 Einh., Preis 2800 E
Solo	Stirling	4-9/12-25	24%/>75%	ausgelegt für Holzpelletfeuerung

Tabelle 1
Micro-KWK-
Technologien auf
Motorbasis



Abbildung 1
Stirlingaggregat für
Erdgasbetrieb als
Untertischgerät
(Foto: Whisper Tech)

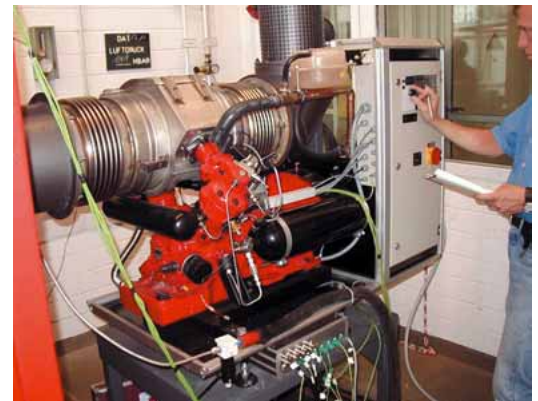
oder anderen Liegenschaften mit hoher Wärmegrundlast. Eine Übersicht über marktverfügbare sowie neue Mikro-KWK-Technologien auf Motorbasis enthält die abgebildete [Tab 1](#).

Beachtenswert ist der Entwicklungsstand der neuen Technologien wie z. B. der Stirlingmotoren. Die Microgen Anlage der BG-Group soll in Kürze als kompaktes Wandgerät zu einem konkurrenzfähigen Preis angeboten werden. EON-UK plant den Einsatz von 80.000 Stirlingsystemen der Firma Whisper Tech mit einer jährlichen Einsparung bei den Energiekosten von 220 € pro Haushalt ([Abb. 1](#)). Auch die jüngsten Erfolge mit neuen dampfgetriebenen Anlagen versprechen einen kurzfristigen Markteintritt mit wettbewerbsfähigen Kosten in Kombination mit CO₂-Einsparungen im Bereich von 20%. Zwar ist auch für alle neuen Systeme zur Zeit Erdgas noch der wichtigste Brennstoff. Anlagen mit externer Verbrennung haben gegenüber internen Verbrennungsmotoren wie Otto und Diesel aber den Vorteil, dass sie mit relativ wenig Aufwand an andere Brennstoffe wie Biogas oder Holzfeuerung angepasst werden können ([Abb. 2](#)). Das ist mit Brennstoffzellen – wenn überhaupt – nur sehr eingeschränkt möglich.

Ein wichtiger Aspekt bei der langfristigen Einschätzung der Bedeutung von Brennstoffzellen für die Raumwärmebereitstellung ist der konti-

nuierlich sinkende Raumwärmebedarf. Es wird erwartet, dass sich der gesamte Raumwärmebedarf von heute bis zum Jahr 2050 um mindestens 25% verringert – im Szenario einer nachhaltigen Energiepolitik sogar halbieren wird. Dies wirkt sich nicht allein auf die wirtschaftlich sinnvolle Leistung der KWK-Aggregate und die Betriebsstunden aus. Wenn das Verhältnis zwischen Raumwärme- und Warmwasser sowie dem Strombedarf sinkt, könnten in Zukunft vor allem kleine Brennstoffzellensysteme mit guten elektrischen Wirkungsgraden von mindestens 35% weitere Reduktionen von Brennstoffbedarf und Emissionen bewirken.

In der industriellen KWK spielt die Raumwärme eine geringere Rolle. Der industrielle Wärmebedarf, der immerhin etwa ein Drittel des gesamten Wärmebedarfs ausmacht, liegt vorwiegend in der Prozesswärme vor allem für die Dampferzeugung. Eine saisonale Bedarfsabhängigkeit wie bei der Raumwärme gibt es daher kaum. Motor-BHKW sind in der Industrie nur im Niedertemperaturbereich einsetzbar. Für die Prozesswärmebereitstellung werden dann spezielle Gas- oder Ölbrenner oder elektrische Heizsysteme eingesetzt.



Eine Alternative sind die Hochtemperaturbrennstoffzellen wie MCFC², SOFC³ und teilweise auch die PAFC⁴, die in Systemen mit elektrischen Leistungen von typisch 200 bis 300 kW angeboten werden.

² Molten Carbonate Fuel Cell

³ Solid Oxid Fuel Cell

⁴ Phosphoric Acid Fuel Cell



Aufgrund der hohen Betriebstemperaturen von 650°C bei der MCFC und 750 bis zu 1000°C bei der SOFC lässt sich Wärme auf dem erforderlichen Niveau auskoppeln (Abb. 3). Damit ergeben sich bei elektrischen Wirkungsgraden über 50% sehr hohe Gesamtwirkungsgrade und Primärenergieeinsparungen. Als relativ neue Technologie bieten Mikrogasturbinen mit elektrischen Leistungen von 25 bis 500 kW und Wirkungsgraden zwischen 25 und 35% ebenso die Möglichkeit der Prozesswärmebereitstellung bei einigen Hundert Grad – je nach gewählter Wärmetauscherkonfiguration (Abb. 4).

Mikrogasturbinen sind wartungsarm, haben gute Abgaswerte und erlauben prinzipiell verschiedene Brennstoffe. Eine Anlage mit Biogas als Brennstoff wurde vom ISET erfolgreich in Betrieb genommen. Auch große Dampfmotoren lassen sich im industriellen Umfeld zur Kombination von Wärme- und Stromerzeugung sinnvoll einsetzen. Neben den etablierten Dampfkolbenmotoren ist besonders auch ein neues Dampfschraubenaggregat von Bedeutung, das in 2004 im Biomasseheizwerk Hartberg mit 730 kW_e erstmals in Betrieb ging. Unter dem Blickwinkel der Biomassenutzung haben Verbrennungsmotoren und Gasturbinen, die prinzipiell auch für flüssige und gasförmige biogene Brennstoffe geeignet sind, heute noch große Vorteile gegenüber Brennstoffzellen – eine Ausnahme ist dabei die MCFC.

Für die gekoppelte Nutzung fester Biomasse wie Holz oder landwirtschaftliche Restbiomasse sind zur Zeit nur Systeme mit externer Verbrennung wie zum Beispiel Stirlingmotoren oder Dampfaggregate einsetzbar.

Im Gegensatz dazu hat der Einsatz von Brennstoffzellen als Auxiliary Power Unit (APU) zur Bordstromversorgung von Fahrzeugen, Flugzeugen und Schiffen erhebliche Vorteile durch die Entkopplung von Antriebsaggregat und Stromerzeugung. Dies ermöglicht im PKW bei stehendem Motor Beheizung, Klimatisierung und Batterieerhaltungsladung sowie eine spürbare Verbrauchsminderung bei laufendem Motor durch den deutlich höheren Wirkungsgrad im Verhältnis zur konventionellen Lichtmaschine. In LKW können mit einer Brennstoffzellen-APU zum Beispiel Kühlaggregate bei längerem Stillstand unabhängig vom Stromnetz betrieben werden. Auch in Flugzeugen ist eine Stromversorgung im Stand – ohne laufende Triebwerke möglich.

← *Abbildung 3*
MCFC mit 250 kW
Strom und 180 kW
Wärme in Form
von 200°C heißem
Dampf



Abbildung 4
Mikrogasturbine
des ISET, zur Zeit in
der Praxiserprobung
mit Biogas

Schlussbetrachtung

Wie am Beispiel der APU gezeigt, bietet der Einsatz von Brennstoffzellen technologische Vorteile und auch für den Nutzer ergibt sich ein zusätzlicher Mehrwert im Vergleich zur konventionellen Technik. Für diesen erhöhten Nutzen wird ein höherer Preis über dem Vergleichsmarktwert zu erzielen sein. Dafür erhält der Nutzer ein Produkt mit verbesserter Leistungsfähigkeit und Handhabung, aber auch Kriterien wie Prestige, Spaß und Erholung spielen im Verhalten der Konsumenten eine wichtige Rolle.

Für den Einsatz in der KWK stehen demgegenüber harte Faktoren wie die Kosten und die Emissionen im Vordergrund. Zur Minderung von Treibhausgasen tragen Systeme auf Brennstoffzellenbasis im Verhältnis zu den genannten Technologien nur verhältnismäßig wenig bei, wenn man einmal von der Vision der solaren Wasserstoffwirtschaft absieht. Auch wenn zukünftige sekundäre Energieträger wie Wasserstoff aus erneuerbaren Energien bereit gestellt werden, sind Brennstoffzellen nur eine von vielen möglichen Technologien. Die Investitionskosten liegen heute noch um einen Faktor 5 bis 10 über den Motortechnologien. Doch selbst die Motor-BHKW können sich ohne gesetzlich geregelte Einspeisevergütung noch nicht wirtschaftlich behaupten.

Wann und in welchem Umfang Brennstoffzellen in Zukunft eingesetzt werden, lässt sich bis heute nur in entsprechenden Szenarien prognostizieren. Insbesondere entwickeln auch lange bekannte konventionelle Technologien in einem verschärften Verdrängungswettbewerb eine neue Entwicklungsdynamik, wie dies am Beispiel der Glühbirne oder des Dampfschiffes („sailing ship effect“) in der Technikgeschichte belegt ist.

Umweltauswirkungen und Märkte des dezentralen Einsatzes stationärer Brennstoffzellen

Energieversorgungsstrukturen im Wandel – Chancen für stationäre Brennstoffzellen?

Unsere heutige Energieversorgung ist aufgrund erheblicher Defizite vor allem im Bereich des Klimaschutzes und der Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen nicht nachhaltig. Als Reaktion auf die Herausforderungen des Klimaschutzes, aber auch um vor dem Hintergrund begrenzter fossiler Energieressourcen die langfristige Versorgungssicherheit zu gewährleisten, wurden in Europa konkrete Vorgaben für den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung festgeschrieben. Empfehlungen der Europäischen Union liegen auch für eine deutliche Ausweitung der Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung vor. Die genannten Ziele können wirtschaftlich und umweltverträglich nur dann erreicht werden, wenn es gelingt, sowohl den Strom- und Wärmebedarf durch kostengünstige Effizienzmaßnahmen zu reduzieren als auch gleichzeitig die bestehenden Versorgungsstrukturen zu ändern. Für die Einsatzmöglichkeiten stationärer Brennstoffzellen ergibt sich daraus das folgende Spannungsfeld, in dem sie sich in Zukunft behaupten müssen:

- Der deutlich sinkende Raumwärmebedarf schränkt generell das Potenzial ein für KWK-Anwendungen – und damit auch für Brennstoffzellen. Bei einem wachsenden Bedarf an Hausenergiesystemen mit einer niedrigen Auslegungsleistung hat allerdings die Brennstoffzelle aufgrund ihres modularen Aufbaus voraussichtlich konstruktive Vorteile gegenüber motorischen Blockheizkraftwerken. Auch das Nutzungsverhältnis Strom- zu Wärmebedarf verschiebt sich zu einem größeren Strombedarf, der den Einsatz der Brennstoffzelle mit ihren potenziell höheren Stromkennzahlen¹ begünstigt.
- Auch der stark wachsende Anteil erneuerbarer Energieträger an der direkten Strom- und Wärmeversorgung schränkt das Ausbaupotenzial der Brennstoffzelle ein. Markteinführungsprogramme für Brennstoffzellen sollten nicht dazu führen, dass eine Stromerzeugung auf der Basis erneuerbarer Energien verdrängt wird. Vielmehr sollte das Potenzial der Brennstoffzelle dazu genutzt werden, durch die Nutzung von Brenngasen aus erneuerbaren Energien (Biogas, Elektrolyse-Wasserstoff) neue Anwendungsmöglichkeiten für erneuerbare Energieträger zu erschließen.
- Durch die wachsende Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung eröffnet sich für die Brennstoffzelle trotz absolut sinkenden Wärmebedarfs ein grundsätzlich hohes Einsatzpotenzial. Dabei ergeben sich im Bereich der Hausenergieversorgung mit Mini-BHKW, die in ihrer Vielzahl auch als virtuelle Kraftwerke betrieben werden können, möglicherweise neue Einsatzbereiche.

¹ Die Stromkennzahl einer Brennstoffzelle definiert sich als Quotient aus der bereitgestellten Strommenge und der nutzbaren Wärmemenge eines Kraft-Wärme-Kopplungs-Prozesses.

Dr. Wolfram Krewitt
DLR
wolfram.krewitt@dlr.de

Friedhelm Steinborn
Steinborn innovative
Gebäude-Energie-
versorgung Stuttgart
steinborn@bhkw-info.de

Dr. Frithjof Staiß
ZSW
frithjof.staiss@zsw-bw.de

Dr. Andreas Bühring
Fraunhofer ISE
buehring@ise.fraunhofer.de

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

Thomas Feck
FZ Jülich
t.feck@fz-juelich.de

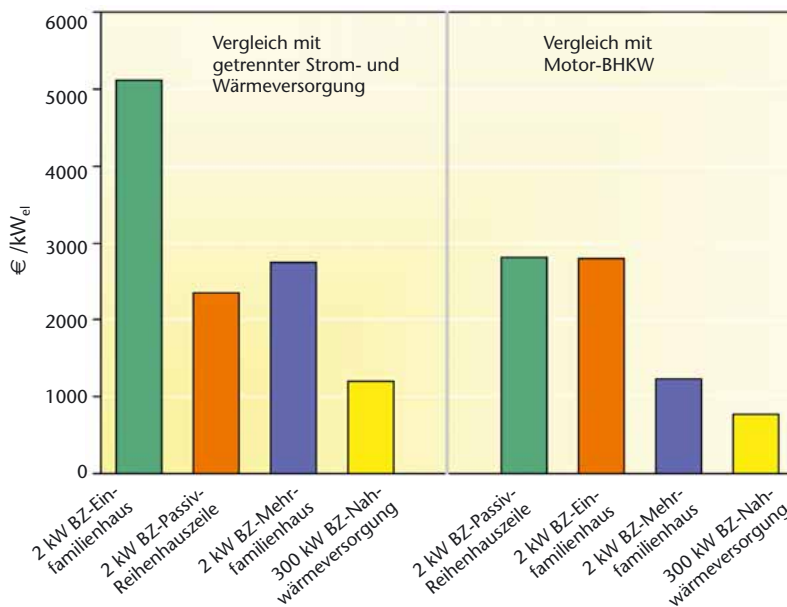


Abbildung 1
Vergleich der Investitionskosten für Brennstoffzellen mit getrennter Strom- und Wärmeversorgung (links) und mit einem Motor-BHKW (rechts)

Ökonomischer Leistungsvergleich

Brennstoffzellen müssen sich nicht nur technisch und ökologisch, sondern vor allem wirtschaftlich gegenüber den verschiedenen Konkurrenztechnologien durchsetzen und behaupten können. Die Herstellungskosten für stationäre Brennstoffzellen liegen heute zwischen ca. 4.000 und 30.000 €/kW_{el} und damit noch weit über den Zielkosten für marktfähige Produkte. Für die Markteinführung muss die Brennstoffzelle ihre Wirtschaftlichkeit zunächst gegenüber den konventionellen Konkurrenztechnologien der getrennten Strom- und Wärmeversorgung und vor allem der Kraft-Wärme-Kopplung unter Beweis stellen. Mittelfristig steht die Brennstoffzelle aber auch in Konkurrenz zu einer ganzen Palette innovativer und hocheffizienter Technologien zur Nutzung sowohl fossiler als auch erneuerbarer Energieträger wie zum Beispiel dem Stirlingmotor.

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer neuen Technologie können die Investitionskosten herangezogen werden im Vergleich zu alternativen Techniken. *Abb. 1* zeigt Investitionskosten für verschiedene Einsatzgebiete stationärer Brennstoffzellen. Generell gilt, dass die Konkurrenzfähigkeit der Brennstoffzelle umso besser ist, je höher die anlegbaren

Kosten sind, also je teurer eine Brennstoffzellenanlage im Vergleich zu einem Konkurrenzsystem werden darf.

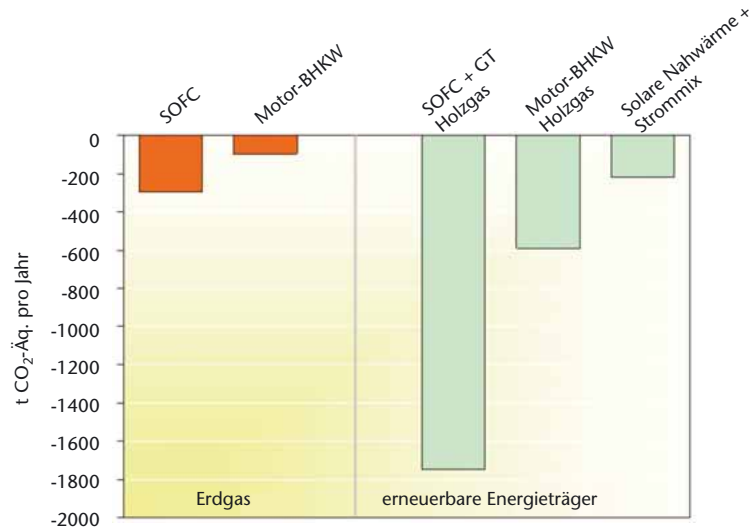
Besonders wirtschaftlich kann eine kleine Brennstoffzelle zur Versorgung einer Passiv-Reihenhauszeile über ein kleines Nahwärmenetz eingesetzt werden. Durch den extrem niedrigen Raumwärmebedarf von Passivhäusern, der nur ungefähr ein Drittel des gesamten Wärmebedarfs beträgt, kommt es zu einem sehr gleichmäßigen Wärmebedarf auf niedrigem Niveau, der zu einer hohen Auslastung der Brennstoffzelle führt. Gleichzeitig ist der Strombedarf der Passivhäuser hoch im Vergleich zum Wärmebedarf, so dass der erzeugte Strom weitgehend selbst genutzt wird. Im Vergleich zur getrennten Strom- und Wärmeversorgung kann die Brennstoffzelle in diesem Fall selbst bei Investitionskosten von ca. 5.000 €/kW noch wirtschaftlich betrieben werden. Für die Versorgung eines Ein- bzw. Mehrfamilienhauses liegen die Kosten für eine Brennstoffzelle zur Hausenergieversorgung im Vergleich zum Brennwertkessel mit ca. 2.000 bis 3.000 €/kW_{el} noch über den von den Herstellern genannten Zielkosten. Das dies auch für den Vergleich mit motorischen BHKW zutrifft, liegt an den hohen spezifischen Kosten von Motor-BHKW mit kleiner Leistung. Eine Entwicklung hin zu noch kleineren motorischen BHKW-Einheiten, wie sie zum Beispiel durch den Stirlingmotor realisiert werden können, würde die Konkurrenzfähigkeit der Brennstoffzelle in diesem Anwendungsbereich erheblich erschweren. Um eine „große“ Brennstoffzelle (Leistungsbereich 300 kW) zur Nahwärmeversorgung im Vergleich zu einem entsprechenden Motor-BHKW wirtschaftlich betreiben zu können, müssen Herstellungskosten von unter 1.000 €/kW erreicht werden.

Ökologische Bewertungen und Vergleiche Von einem verstärkten Einsatz der Brennstoffzelle in einem zukünftigen Energiesystem werden erhebliche Beiträge zur Verminderung von Treibhausgasemissionen und zum Ressourcenschutz erwartet. Detaillierte Ökobilanzen (Life Cycle Assessment) helfen, eine umfassende ökologische Bewertung einer Brennstoffzelle unter Berücksichtigung des gesamten Lebensweges mit Herstellung, Betrieb, Entsorgung und Brennstoffbereitstellung zu erstellen.

Der direkte Vergleich verschiedener Umwandlungstechnologien zeigt, dass unter heutigen Bedingungen durch den Einsatz stationärer Brennstoffzellen der Verbrauch erschöpflicher Energieträger und die Emissionen von Treibhausgasen im Vergleich zur ungekoppelten Stromerzeugung bei gleichem Brennstoff um 20 bis 50 % reduziert werden kann. Der Ausstoß weiterer Luftschadstoffe geht zum Teil sogar um bis zu 90 % zurück. Diese günstigen Werte gehen einerseits auf die sehr niedrigen direkten Emissionen während des Betriebs zurück, andererseits aber auch auf die systematischen Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung. Gegenüber den direkten Konkurrenten wie Stirling-Motor, Motor-BHKW oder Gasturbine entfällt dieser Systemvorteil der KWK, so dass in diesen Fällen der Vorteil der Brennstoffzelle in Bezug auf Treibhausgasemissionen und Ressourcenverbrauch deutlich kleiner wird oder unter Umständen sogar ganz wegfällt.

Abb. 2 zeigt, wie durch den Einsatz von Brennstoffzellen und anderer innovativer Technologien die CO₂-Emissionen durch die Strom- und Wärmeversorgung einer gemischten Wohnsiedlung mit Nahwärmenetz im Vergleich zu einer getrennten Strom- und Wärmeversorgung (Brennwertkessel und Strombezug aus dem öffentlichen Netz) reduziert werden können. Das CO₂-Minderungspotenzial durch den Einsatz von Brennstoffzellen kann vor allem dann voll erschlossen werden, wenn Brennstoffe aus erneuerbaren Energieträgern eingesetzt werden.

Durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung und der damit einhergehenden sinkenden CO₂-Intensität der Strombereitstellung verliert die hohe elektrische Effizienz der Brennstoffzelle – so lange sie mit fossilen Brennstoffen betrieben wird – als umweltpolitisches Argument an Bedeutung. Bei einem wachsenden Ausbau erneuerbarer Energien ist die Brennstoffzelle als Wandlungstechnologie mit einem zukünftigen Strommix ökologisch daher nur dann konkurrenzfähig, wenn auch die Brennstoffzelle mit Brennstoffen aus erneuerbaren Energien betrieben wird.



Langfristszenarien für den verstärkten Ausbau stationärer Brennstoffzellen

In verschiedenen Langfristszenarien wurden alternative Ausbauwege für die Nutzung stationärer Brennstoffzellen innerhalb einer Versorgungsstruktur dargestellt, die das Erreichen wesentlicher Nachhaltigkeitsziele sicherstellen [1]. Ergänzend wurde eine Entwicklung beschrieben, die von den Potenzialen zur Nutzung stationärer Brennstoffzellen unter den Randbedingungen eines Business-as-Usual-Szenarios (Referenzszenario) ausgeht [2]. Mit dieser Bandbreite unterschiedlicher Entwicklungswege wurden sowohl die Chancen als auch die Restriktionen einer Brennstoffzellen-Markteinführung unter verschiedenen energiepolitischen Randbedingungen aufgezeigt.

Das Referenzszenario ist auf der Grundlage einer „weiter wie bisher“ Entwicklung zwar einerseits durch einen hohen Wärmebedarf, andererseits aber durch eine eher konventionelle Versorgungsstruktur gekennzeichnet. Für den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung ergeben sich unter diesen Randbedingungen nur wenige Anreize. Für die Markteinführung der Brennstoffzelle führt dies zu dem Dilemma, dass zwar wärmebedingt grundsätzlich ein hohes Anwendungspotenzial vorliegt, dass aber aufgrund unzureichender Unterstützung keine ausreichende Nachfragedynamik erzeugt wird, die für eine erfolgreiche Markteinführung erforderlich wäre.

Abbildung 2
Mögliche CO₂-Einsparungen bei der Strom- und Wärmeversorgung einer Wohnsiedlung (Vergleichswert ist Wärmeversorgung mit Brennwertkessel und Strom aus dem öffentlichen Netz)

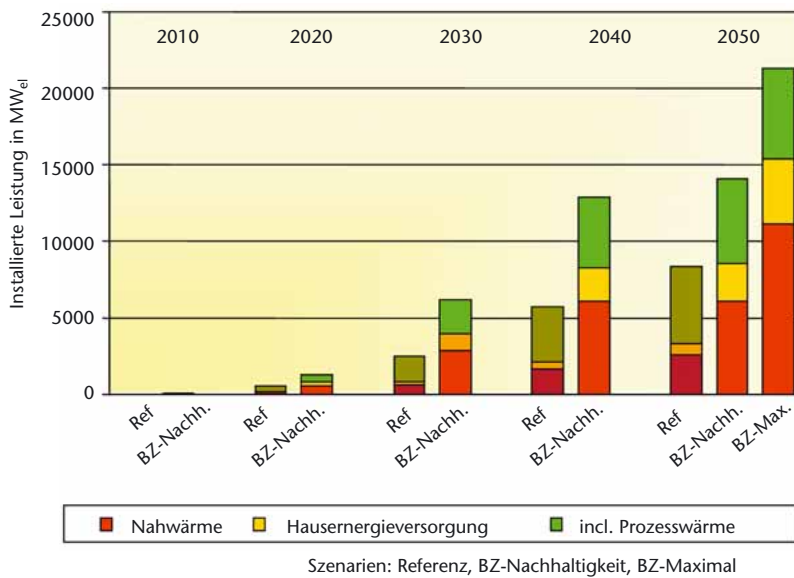


Abbildung 3
Ausbaupotenziale stationärer Brennstoffzellen in verschiedenen Szenarien nach Einsatzgebieten

Vor allem die Potenziale im Bereich der Hausenergieversorgung liegen im Referenzszenario mit rund 150 MW_{el} installierter Leistung bis 2030 und knapp 800 MW_{el} bis 2050 weit unter den von Herstellern anvisierten Absatzzahlen (Abb. 3). Die Ergebnisse unterstreichen, dass auch bei hohem Raumwärmebedarf eine erfolgreiche Markteinführung der Brennstoffzelle einen Strukturwandel der Wärmeversorgung hin zu einem Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung voraussetzt.

Szenarien mit an Nachhaltigkeitszielen orientierten Bedarfs- und Versorgungsstrukturen zeigen hingegen, dass trotz eines zurückgehenden Raumwärmebedarfs das Einsatzpotenzial der Brennstoffzelle durch eine Anpassung der Versorgungsstruktur gegenüber dem Referenzszenario deutlich erhöht werden kann. Durch eine Kombination von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung, der Kraft-Wärme-Kopplung und der Nutzung erneuerbarer Energien werden ausreichende Potenziale für innovative Technologien eröffnet. So wächst in dem Szenario „Brennstoffzellen-Nachhaltigkeit“ [3] die insgesamt installierte Brennstoffzellenleistung bis 2030 auf 6.200 MW_{el}. Dabei wurde unterstellt, dass die Brennstoffzelle sowohl die technischen Ziele als auch die Kostenziele erreicht und daher einen großen Marktanteil an den KWK-Technologien erzielen wird. Die Anteile der BHKW zur Nahwärmeversorgung mit 2.900 MW_{el} und zur industriellen KWK mit

2.250 MW_{el} sind deutlich größer als das Potenzial der Objektversorgung mit 1.050 MW_{el}. Bis 2050 wächst die Brennstoffzellenleistung auf insgesamt 14.040 MW_{el}. In einem „Brennstoffzellen-Maximal“-Szenario, in dem u.a. der KWK-Anteil an der Nahwärmeversorgung zu Lasten erneuerbarer Energien ausgebaut wurde, erreichen stationäre Brennstoffzellen langfristig eine installierte Leistung von über 20.000 MW_{el}.

Die Brennstoffzellen-Zubauraten, die sich in den Nachhaltigkeits-Szenarien einstellen, liegen zwar vor allem in den nächsten zehn Jahren unter den Absatzziele einiger Hersteller, mittelfristig dürfte das Marktvolumen aber ausreichen, um eine effiziente Serienfertigung auszulasten und durch technisches Lernen die erwarteten Kostenminderungen zu realisieren.

Ausblick

Das Referenzszenario zeigt, dass eine bloße Trendfortschreibung nicht zu einer nachhaltigen Struktur führt und insbesondere die Klimaschutzziele deutlich verfehlt. Da unter diesen Rahmenbedingungen die Entwicklung einer Versorgungsstruktur mit stärker vernetztem und dezentralisiertem Charakter und damit auch die Kraft-Wärme-Kopplung nicht befördert wird, kann auch nicht von einem isolierten Aufwachsen eines tragfähigen Marktes für stationäre Brennstoffzellen ausgegangen werden. In diesem Fall ist weder eine deutliche Unterstützung der Brennstoffzellen-Markteinführung zu erwarten, noch ergeben sich Perspektiven für ausreichende Marktvolumina, die zu einer selbst tragenden Kostenreduktion führen.

Geht man jedoch wie im Nachhaltigkeits-Szenario davon aus, dass Klimaschutz das handlungsleitende Motiv ist, ist der Einsatz innovativer Technologien auf der Angebots- und Nachfrageseite gleichermaßen notwendig. Langfristszenarien zeigen, dass engagierte Nachhaltigkeitsziele im Energiebereich nicht ohne tiefgreifende Änderungen in der Bedarfs- und Versorgungsstruktur zu erreichen sind.

Dabei bedarf es verschiedener aufeinander abgestimmter Teilstrategien, um das Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung unter Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit und in ökonomisch verträglicher Form zu erreichen.

Zwar wird durch die Verringerung des Wärmebedarfs und den steigenden Anteil erneuerbarer Energien das Einsatzpotenzial stationärer Brennstoffzellen prinzipiell eingeschränkt. Die Ergebnisse der Szenarienanalyse zeigen jedoch, dass eine engagierte Nachhaltigkeitsstrategie neben dem Ausbau regenerativer Energien ein ausreichendes Entwicklungspotenzial für innovative KWK-Technologien wie der Brennstoffzelle bietet. Gerade erst in einem an Nachhaltigkeitszielen orientierten Ausbaupfad der Energieversorgung werden durch die notwendigen Änderungen der Versorgungsstrukturen ausreichende Potenziale für die Brennstoffzelle mobilisiert werden.

Es ist also weniger die absolute Höhe des Strom- und Wärmebedarfs, sondern vielmehr die Art der Versorgungsstruktur und die Ausgestaltung des energiepolitischen Rahmens, die das Nutzungspotenzial stationärer Brennstoffzellen bestimmt. Auch wenn die ökologischen Vorteile der Brennstoffzelle erst beim Einsatz regenerativ erzeugter Brennstoffe voll zum Tragen kommen, zeigen die Ausbauszenarien, dass dezentrale Brennstoffzellen einen wichtigen Beitrag leisten können, um den auch mittelfristig noch notwendigen Anteil der fossilen Energieversorgung effizient bereitzustellen.

Literatur

- [1] Nitsch, J., Krewitt, W., Fishedick, M., Reinhardt, G. et al. (2004): Ökologisch optimierter Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 2004.
- [2] Enquete Kommission (2002): Endbericht der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“. Deutscher Bundestag, 14. Wahlperiode, Drucksache 14/9400, 7.7.2002
- [3] Krewitt, W., Pehnt, M., Fishedick, M., Temming, H. (Hrsg.) (2004): Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung – Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotenziale. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2004.