

ERGEBNISSE VON TA-PROJEKTEN – NEUE TA-PROJEKTE

Kommt sie unter die Haube, soll sie in den Keller? – Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung legt Studie zur Brennstoffzellen-Technologie vor

von Torsten Fleischer, ITAS

Im jetzt vorgelegten Abschlussbericht eines vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung angeregten TA-Projektes versucht das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), ein realistisches, umfassendes und differenziertes Bild vom Stand der Entwicklung und von den Zukunftsperspektiven eines verbreiteten Einsatzes von Brennstoffzellen-Systemen und dessen möglichen Folgen zu zeichnen. Der Schwerpunkt des Berichts liegt auf einer differenzierten Aufbereitung des Standes und der Perspektiven der Brennstoffzellen-Technologie in den Anwendungsfeldern Verkehr, Energiewirtschaft und tragbare elektronische Kleingeräte.

„Die Technik der Zukunft“, „Revolutionäre Zelle“, „Fahrspaß ohne Emissionen“, „Kraft ohne Kolben“, „Kraftwerke für unterwegs“ – so oder ähnlich titelten Zeitungen und Zeitschriften in den vergangenen Monaten. Das rege Medieninteresse gilt einer Technologie, die weitreichende Veränderungen in der Energiewirtschaft und im Fahrzeugbau mit sich bringen soll: der Brennstoffzelle.

Weltweite Entwicklungsanstrengungen großer Unternehmen und umfangreiche staatliche Förderprogramme dokumentieren die Erwartung, dass mit der Brennstoffzellen-Technik *erhebliche Marktpotenziale* erschlossen sowie *Problemlösungen im Verkehrssektor und in der Energiewirtschaft* gefunden werden könnten. Auch verbinden sich mit ihrem Einsatz Perspektiven wesentlich umweltfreundlicherer

Motorantriebe im Straßenverkehr und effizienterer sowie ökologisch vorteilhafterer Anlagen zur Wärme- und Stromerzeugung. Diese mittelfristige Perspektive wird ergänzt durch die plausible Vision einer Funktion der Brennstoffzellen-Technologie als *Brücke in eine (zukünftige solare) Wasserstoffwirtschaft* und als deren zentrales Element.

Der jetzt vorgelegte, in Zusammenarbeit mit mehreren externen Partnern (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Forschungszentrum Jülich, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung sowie Ludwig Bölkow Systemtechnik) erarbeitete Abschlussbericht des TAB versucht, ein realistisches, umfassendes und differenziertes Bild von Entwicklungsstand und Zukunftsperspektiven eines verbreiteten Einsatzes dieser Technologie zu zeichnen. Hierzu werden die technischen Besonderheiten der unterschiedlichen Brennstoffzellen-Systeme beschrieben sowie ein Überblick über die wichtigsten nutzbaren Brenn- bzw. Treibstoffe gegeben.

Anwendungen in Fahrzeugen

Die Nutzung von Brennstoffzellen als neues Antriebskonzept für Straßenfahrzeuge – und hier vor allem für Pkw – erfreut sich großen öffentlichen Interesses und einer detaillierten Wahrnehmung durch die Medien. Darüber hinaus wurden auch weitere Ansätze – etwa Brennstoffzellen als leistungsfähige Energiequelle (Batterie-Ersatz) in Fahrzeugen mit herkömmlichem Verbrennungsmotor oder ihre Anwendung als Antriebssysteme bei elektrischen Bahnen oder bei Schiffen – vorgeschlagen.

Bei der Analyse von verkehrsbezogenen Anwendungen von Brennstoffzellen konzentriert sich der TAB-Bericht auf den Pkw-Antrieb. Die Motive für die zahlreichen industriellen Aktivitäten in diesem Bereich liegen in einem – allerdings in großen Teilen technisch und wirtschaftlich erst noch zu erschließenden – Potenzial der Brennstoffzelle hinsichtlich Effizienz, Reduktion von Kraftstoffverbrauch und Emissionen sowie bei Innovationen in der Fahrzeugtechnik. Für den Fahrzeugbereich wird die Erfüllung dieser Potenziale am ehes-

ten von der Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) erwartet.

Beim Vergleich existierender und neuer Antriebskonzepte ist für eine aussagekräftige Analyse eine Einbeziehung des Kraftstoffversorgungssystems und der eingesetzten Energieträger wesentlich: Wasserstoff als direkter Kraftstoff für Brennstoffzellenantriebe stellt aus heutiger Sicht eher eine langfristige Perspektive dar. Darum dürften für den breiten Energiemarkt in den nächsten 20 bis 30 Jahren noch andere Energieträger – v. a. flüssige Alkohole (Methanol) beziehungsweise Kohlenwasserstoffe (Benzin) den Vorrang haben. Jedoch muss in beiden Fällen der getankte Kraftstoff im Fahrzeug in Wasserstoff umgewandelt werden. Dabei sind mit Methanol einfachere und effektivere Ansätze bei den Antrieben realisierbar, wobei derzeit keine Methanol-Infrastruktur vorhanden ist. Dagegen bringt Benzin aufwendige Brennstoffzellensysteme mit sich, jedoch könnte auf eine eingeführte Kraftstoffproduktion und -verteilung – bei allerdings unzureichender Kraftstoffqualität für Brennstoffzellen – aufgebaut werden.

In der durchgeführten umfangreichen ökologischen Bilanzierung verschiedener Antriebskonzepte und Kraftstoffe entsteht ein differenziertes Bild: Auch Brennstoffzellen-Fahrzeuge können zur Emissionsreduktion beitragen, wenn sie in genügend großer Zahl eingeführt sind. Dies gilt allerdings nicht für alle Systeme, da bei Nutzung von aus fossilen Quellen gewonnenen Kraftstoffen – im Vergleich mit konventionellen Verbrennungsmotoren – *energetischen und emissionsseitigen Vorteilen der Brennstoffzelle selbst energetische Verluste und Emissionen bei der Kraftstoffbereitstellung und -aufbereitung gegenüberstehen*. Für die Emissionen gilt dies eingeschränkt auch für regenerativ erzeugte Endenergieträger, nicht jedoch für die Wasserstoffherstellung auf der Basis von emissionsfrei regenerativ erzeugtem Strom. Bei einer Beurteilung der Brennstoffzellen-Technologie ist für jede Option mit einzubeziehen, ob und in welchem Umfang eine Verlagerung von energetischen Verlusten und Emissionen aus dem Fahrzeugbetrieb in die Kraftstoffgewinnung und -herstellung erfolgt. Dies ist von politischer Relevanz insbesondere vor dem Hintergrund, dass Treibhausgasre-

duktionsziele auch von einzelnen Branchen und Verbänden – nicht zuletzt im Rahmen von Selbstverpflichtungen – angestrebt werden.

Auch neue verbrauchsoptimierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor erlauben einen Betrieb mit lokalen Emissionen, die beinahe Null sind. Insofern kann als These formuliert werden, dass verkehrsbedingte Umweltbelastungen mit einer Optimierung des Verbrennungsmotors in ausreichendem Maße und vor allem mit geringerem finanziellem Aufwand reduziert werden können, so dass sich die Entwicklung alternativer Antriebstechnologien, wie die des Brennstoffzellen-Fahrzeuges, nicht aufdrängt. Kurzfristig und in einer entsprechenden Kosten-Nutzen-Perspektive ist diese Einschätzung nicht unplausibel. Mittel- und längerfristig und bei einer umfassenderen Betrachtung könnte jedoch eine weitergehende Reduktion der direkten Abgasemissionen bei Pkw notwendig sein – vor allem dann, wenn infolge der allgemeinen Verkehrszunahme die Schadstoffemissionen wieder ansteigen werden, weil das Optimierungspotenzial beim Verbrennungsmotor zunehmend ausgeschöpft sein wird. Zudem könnten dann, wenn Null-emissionsfahrzeuge eine wettbewerbsfähige Option darstellen, diese vom Verbraucher verstärkt nachgefragt – oder ihr Einsatz seitens der Politik oder von Umweltverbänden gefordert werden. Bereits die aktuellen technischen Entwicklungen und die sich abzeichnenden Verschärfungen bei den Emissionsstandards bei Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren legen die intensive Prüfung einer Einführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen nahe.

Da die wichtigen potenziellen Brennstoffzellen-Kraftstoffe Wasserstoff und Methanol aus verschiedenen Primärenergieträgern herstellbar sind, wird für entsprechende Antriebe eine *regionale Differenzierung und Diversifizierung von Energieträgern für den Verkehr* möglich. Zudem könnte die technische Basis für die Nutzung regenerativer Energien im Verkehr geschaffen und ein gleitender Übergang von der erdölbasierten in die regenerative Treibstoffversorgung ermöglicht werden. Auch aus diesem Grund ist die Brennstoffzelle im Fahrzeug eine Option für die nahe Zukunft, die weiter verfolgt werden sollte.

Mittel- und langfristig sollten *Optionen für den Einsatz erneuerbarer Energieträger im Verkehr* (und in anderen Bereichen) eröffnet werden. Dies ist nicht nur aus Emissions- und Klimaschutzgründen, sondern auch wegen der beschränkten Verfügbarkeit fossiler Energiequellen notwendig. Zum einen sind die Reichweiten fossiler Energieträger begrenzt, zum anderen ist die Übertragbarkeit des Konzepts einer auf Erdöl basierenden mobilen Gesellschaft auf den heute noch wenig motorisierten Teil der Welt nicht verantwortbar.

Beim Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff als Brenngas lassen sich die systembedingten Vorteile der Brennstoffzellen gegenüber konventionellen Lösungsansätzen bezüglich einer nachhaltigen Bedarfsdeckung deutlich aufzeigen: Sollten sich langfristig Kraftstoffversorger und Automobilhersteller auf eine nicht-fossile Energiebasis (z. B. regenerativ basierte Kraftstoffe) einigen, spielt die CO₂-Problematik weder für konventionelle noch für Brennstoffzellen-Fahrzeuge eine Rolle. Bei zu erwartenden höheren Kraftstoffkosten für nicht-fossile Kraftstoffe dürfte dem Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugs dann größere Bedeutung zukommen. Aus Kundensicht wären dann Fahrzeuge mit geringerem Verbrauch von Vorteil. Hier könnte der höhere Wirkungsgrad des Brennstoffzellen-Antriebs relevant werden und den Brennstoffzellenfahrzeugen eine günstige Marktposition verschaffen.

Insgesamt ist die Entwicklung von Brennstoffzellen für mobile Anwendungen geprägt durch die Diskussion über den „richtigen“ Kraftstoff, den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Technik in der Anwendung – insbesondere im Langzeitbetrieb –, die aus heutiger Sicht erforderliche Kostensenkung und die Frage nach der Markteinführung. Für eine Marktakzeptanz müssen einige technische und ökonomische Barrieren überwunden und Nutzer- sowie kapitalseitige Vorteile deutlicher als bislang sichtbar werden. Gegenwärtig liegen keine verlässlichen Angaben über zu erwartende Kosten (und Preise) von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen-Antrieben vor. Eine grobe Abschätzung zeigt, dass der Mehrpreis für Anschaffung und Betrieb um 30-50 DM/kW in der Mittelklasse (absolut zwischen 1.500 und 2.500 DM) bei erwarteten Benzinpreisen um

2,25 DM/l liegen dürfte. Nach Angaben von Fahrzeugherstellern soll der Preis für ein Brennstoffzellenfahrzeug „dem eines vergleichbaren Modells mit Dieselmotor und Automatik entsprechen.“ Dies wäre etwa mit einem Aufpreis von 2.000 DM gegenüber einem Diesel-Fahrzeug und 5.000 DM gegenüber einem vergleichbaren Benzin-Fahrzeug.

Eine breite Einführung neuer Energieträger im Verkehrssektor würde – weitgehend unabhängig von der Antriebstechnik – *seitens der Politik Koordination und Unterstützung* im Bereich der Zulassung dieser Stoffe als Kraftstoffe und bei der europaweiten Harmonisierung der Zulassungsvorschriften erfordern. Auch der Aufbau geeigneter Infrastrukturen scheint – solange sich Fahrzeug- und Mineralölindustrie nicht auf eine gemeinsame Strategie einigen – stärkeren Engagements von politischer Seite zu bedürfen. Beide Prozesse müssen einer Einführung solcher Energieträger und entsprechender neuer Antriebe zeitlich vorangehen (für Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit Methanol ist derzeit das Jahr 2004 geplant), damit sich ein weitgehend selbst tragender Markt ausbilden kann.

Stationäre Energieversorgung

Durch die zunehmende Liberalisierung der Energiemärkte zeichnen sich rasche Veränderungen in den Strukturen der stationären Energieversorgung hinsichtlich eingesetzter Techniken und Brennstoffe ab. Ein wesentlicher Trend ist die Dezentralisierung der Strom- und Wärmebereitstellung, so dass sich neben klassischen Heizungsanlagenbauern auch überregionale Elektrizitätsversorgungsunternehmen für alternative Techniken – wie die Brennstoffzelle – interessieren. Dies ist anhand erheblich gewachsener Entwicklungsanstrengungen und strategischer Allianzen dokumentierbar. Daneben besteht auch in der Strom- und Wärmeversorgung nach wie vor ein Bedarf an wirkungsgradverbesserten Energieumwandlungstechniken, die den hohen Anteil klimarelevanter Schadstoffemissionen von Kraft- und Fernheizkraftwerken sowie Kleinf Feuerungsanlagen reduzieren.

Die Anfang bis Mitte der 90er Jahre festzustellende eher abwartende Haltung zur Brennstoffzellen-Technologie ist mittlerweile

aktiven Innovationsstrategien bei Herstellern, Anwendern und auch der Politik gewichen. Ursache dafür sind hohe Erwartungen an die – technisch wie wirtschaftlich allerdings noch zu erschließenden – Potenziale. So führen hohe Wirkungsgrade auch im Teillastbereich *zu hohen Gesamtwirkungsgraden*, die z. B. bei Kopplung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit einer Gasturbine in Bereiche vorstoßen, die mit konventionellen Techniken allein nicht erreicht werden können und mit denen eine Abnahme des spezifischen Bedarfs an Primärenergieträgern verbunden ist. Brennstoffseitig bietet sich bei fossilen Energieträgern die Nutzung von Erdgas an, welches sich durch eine bereits verfügbare Infrastruktur auszeichnet. Die Diskussion um alternative Brennstoffe reduziert sich in der kurzfristigen Perspektive somit im Vergleich zum mobilen Bereich deutlich. Da die gesamte Bandbreite der Brennstoffzellen-Typen in Betracht gezogen wird, kommen auch gegenüber der Brenngaszusammensetzung robustere Brennstoffzellen-Typen in Betracht. Damit erschließt sich die energetische Nutzung eines breiteren Segmentes an Brenngasen (z. B. Klär- und Industriegase). Mittel- bis langfristig bietet sich analog der Ausbau einer (regenerativ basierten) Wasserstoffinfrastruktur an.

Brennstoffzellen für stationäre Anwendungen werden derzeit für fast alle Einsatzfelder der stationären Energieversorgung diskutiert. *Neu ist die mit Hilfe der Brennstoffzelle technisch attraktiv umsetzbare Perspektive des breiten Einsatzes der gekoppelten Strom- und Wärmezeugung im Haushaltsbereich.* Daneben ergibt sich eine zusätzliche Möglichkeit zur Einspeisung von überschüssigem Strom in das örtliche Stromnetz, wodurch die Bedeutung der öffentlichen Stromerzeugung weiter abnehmen würde.

Hausenergieversorgung, Kleinverbrauch

Die Entwicklungsbemühungen für die Haus- und Siedlungsenergieversorgung zeigen, dass zurzeit vor allem die PEMFC, mit Abstrichen auch die phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC) und die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) in Betracht kommen. Im technischen Vergleich zu konventionellen Heizungsanlagen sind diese Brennstoffzellen-Systeme als

gleichwertig anzusehen. Haupthandicap ist ihr (momentan noch) zu hoher Preis. Darüber hinaus steht generell eine technische und kostenseitige Optimierung der Brennstoffzellen-Systeme noch aus. Das anspruchsvollste Ziel dürfte die Erreichung einer Lebensdauer von etwa 40.000 Betriebsstunden im Jahr sein.

Als Brennstoffe für Brennstoffzellen-Systeme in der Gebäudeenergieversorgung sind neben Wasserstoff vor allem Erdgas, aber auch Heizöl, Benzin und Methanol in der Erprobung. Konventionelle Brennstoffe, wie Erdgas oder Heizöl, bieten den Vorteil einer vorhandenen Infrastruktur und sind den Nutzern vertraut. Da die Energiebilanz am Reformier günstiger ausfällt, je reiner und wasserstoffhaltiger der Einsatzstoff ist, sind Kohlenwasserstoff-Gemische (Heizöl, Benzin etc.) verfahrenstechnisch gesehen ungeeigneter, hätten jedoch eine strategische Bedeutung für eine Übergangszeit bis zur Etablierung einer Wasserstoffinfrastruktur.

Da die Brennstoffzelle selbst nur Wasserdampf an die Umgebung abgibt, führt eine direkte Wasserstoffversorgung deshalb vor Ort zu einer wenig komplexen Anlage ohne Schadstoffemissionen, womit ein Beitrag zur lokalen Emissionsminderung geleistet werden könnte.

Emissionen werden jedoch bei der Bereitstellung von Wasserstoff auf fossilem Wege freigesetzt. Insofern ist unter Umweltgesichtspunkten eine regenerative Bereitstellung des Wasserstoffs adäquater. Bei fossilen Energieträgern fällt eine Versorgung mit Erdgas günstiger aus als mit Heizöl. Trotz des höheren Wirkungsgrades von Methanol im Vergleich zum Heizöl-Einsatz in Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerken (BHKW) werden die höheren Emissionen bei der Herstellung von Methanol nicht kompensiert. Somit bietet sich aus Gründen des Klimaschutzes der Einsatz von Methanol als Brennstoff nicht an, vielmehr wäre der Einsatz von Erdgas sinnvoller. Ein damit verbundener Mehrverbrauch an Erdgas – verstärkt durch Zuwächse in anderen Bereichen (z. B. Fahrzeuge, Kraftwerke) – ist allerdings aus strategischen Gründen (z. B. Importabhängigkeit, Verknappung fossiler Ressourcen) nicht unproblematisch.

Obwohl Brennstoffzellen-Systemen für die Hausenergieversorgung von der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit noch entfernt sind, dürfte

diese aber doch leichter als die Wirtschaftlichkeitsschwelle bei Fahrzeuganwendungen zu erreichen sein. Anlegbare Investitionen für ein Brennstoffzellen-BHKW im Leistungsbereich von 1-10 kW (el) liegen etwa bei 2.000 bis 4.000 DM/kW (el) für das Brennstoffzellen-System bestehend aus Brenngasaufbereitung, Zellstapel und Wechselrichter, was in etwa in der Größenordnung herstellerseitiger Angaben liegt. Für größere, z. B. siedlungszentral aufgestellte Anlagen sollten aufgrund von Skalierungseffekten tendenziell etwa 2.000 DM/kW (el) erreichbar sein. Zum Vergleich: Für Anwendungen in Pkw muss das Brennstoffzellensystem zu Kosten von unter 100 DM/kW darstellbar sein.

Auf Grund ihrer Modularität weisen Brennstoffzellen ein *breites Einsatzpotenzial* auf. Interessant erscheinen momentan die Varianten der Einzelhausversorgung (Brennstoffzelle und Reformier im Keller) und die Siedlungsversorgung via Nahwärmenetz (Reformier und Brennstoffzelle siedlungszentral aufgestellt). Die zentrale Bereitstellung von Wasserstoff in größerem Umfang ist erst mittel- bis langfristig realisierbar (Infrastrukturaufbau). Wegen der momentan noch vergleichsweise hohen Anschaffungskosten bieten sich zur Finanzierung von Brennstoffzellen-Systemen neue Finanzierungsmodelle an. Dies sind zum einen Leasingmodelle und zum anderen – bei größeren Versorgungsobjekten – die Nutzung von Energiedienstleistungs-Paketen.

Im Hinblick auf eine breite Implementierung von Brennstoffzellen in Haushalten sowie im Kleinverbrauch wurden verschiedene Substitutionsvarianten und deren Effekte im Jahr 2010 analysiert. Aus einer angenommenen 10 %igen Substitution von konventionellen Heizungsanlagen durch Brennstoffzellen (PEMFC-Referenzsystem mit Spitzenlastkessel) in Haushalten resultiert eine veränderte Struktur der Nachfrage nach Energieträgern (Mehrverbrauch von bis zu 18 % beim Erdgas; Heizöl, Fernwärme und Strom nähmen entsprechend ab) und damit eine Reduktion der Emission klimarelevanter Gase (etwa beim CO₂ um bis zu 2,3 %). Gesondert zu erwähnen sind die positiven Auswirkungen auf die lokale Emissionssituation, wo sich zeigt, dass das erdgasbetriebene Brennstoffzellen-BHKW die geringsten Emissionen aufweist.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht bei der Optimierung der Brennstoffzellen-Systeme in Bezug auf eine verbesserte Langzeitstabilität zur Erreichung der Lebensdauer von 40.000 Betriebsstunden bei deutlicher Senkung der Kosten. Hierbei könnten insbesondere bei der PEMFC Synergieeffekte zum mobilen Bereich genutzt werden. Des Weiteren hat sich die Anpassung der klassischen Brenngasaufbereitung an die Größenordnung der Gebäudeenergieversorgung als erheblich schwieriger erwiesen, als ursprünglich angenommen. Daher besteht Forschungsbedarf im Hinblick auf die Miniaturisierung heute üblicher Reformierverfahren für den Einsatz fossiler Brennstoffe (Erdgas, Heizöl etc.).

Die kommerzielle Verfügbarkeit von Speichermedien für Wasserstoff mit höheren Speicherdichten könnte die dezentrale Energieversorgung auch von dünn besiedelten Regionen mit Wasserstoff rentabler machen und zum anderen die Markteinführung technisch erheblich vereinfachen. Da die verfügbaren Optionen zur Wasserstoffspeicherung momentan jedoch keine praktikable Alternative darstellen, besteht hier Forschungsbedarf.

Industrielle Energieversorgung, öffentliche Stromversorgung

Für Anwendungen in der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung und der öffentlichen Stromversorgung eignen sich Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFC) und Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen (MCFC) am besten. Beide Systeme befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium, ermöglichen jedoch ein breites Spektrum an Brennstoffen.

Brennstoffzellen-Systeme konkurrieren in diesem Anwendungsfeld im unteren Leistungsbereich mit Gasturbinen und Motor-BHKW und im oberen Leistungsbereich mit GuD-Kraftwerken. Konventionelle weisen gegenüber Brennstoffzellen-Anlagen einen deutlichen Praxisvorsprung, vergleichsweise niedrige Kosten und Entwicklungspotenziale auf. Brennstoffzellen hingegen können neben der Abdeckung eines breiten Anforderungsspektrums mit folgenden Vorteilen aufwarten: Höhere Stromkennzahlen von Hochtemperatur-Brennstoffzellen im Kraft-Wärme-Kopplungs

(KWK)-Betrieb kommen dem Trend des steigenden Stromverbrauchs in der Industrie entgegen. Sie sind deshalb optimal bei industriellen Verbrauchern mit hoher Stromintensität einsetzbar. Hohe Teillastwirkungsgrade kommen bei expliziten Teillastanforderungen, wie etwa in Regelkraftwerken oder beim gezielten An- und Abfahren von Wärme- oder Stromlasten bei KWK-Anlagen, zum Tragen. Zusammen mit ihrem schnellen Lastwechselverhalten könnte dies ein Pluspunkt für Hochtemperatur-Brennstoffzellen im liberalisierten Energiemarkt sein, da dort die Bedeutung von dezentral errichteten Regelkraftwerken eher zunehmen könnte. Da die gesamte Abwärme flexibel auf einem hohen Temperaturniveau zur Verfügung gestellt wird, könnten durch Brennstoffzellen Fernwärmenetze, aber auch Gas- und Dampfturbinen bedient werden.

Langfristig ist aufgrund des noch ausbaufähigen elektrischen Wirkungsgrades die Kombination von Brennstoffzellen mit GuD-Technik für hocheffiziente Gas- und Kohlekraftwerke interessant. Insbesondere könnte durch diese Kombination der CO₂-Nachteil des Brennstoffs Kohle verringert werden, da vergleichbare Wirkungsgradsteigerungen mit konventionellen Kohlekraftwerken nicht zu erwarten sind.

Insgesamt sind Brennstoffzellen konventionellen Systemen in Bezug auf ihre Umweltwirkungen in fast allen Bereichen überlegen. Sie können insbesondere einen *deutlichen Beitrag zur Minderung von Treibhausgasemissionen* liefern. Diese Effekte sind beim Übergang von einem fossilen auf einen regenerativen Brennstoff besonders ausgeprägt, *allerdings ist dabei der Wechsel des Brennstoffs von höherer Bedeutung als die Veränderung der Energieumwandlungstechnik*. Zudem ist zu berücksichtigen, dass auch konventionelle Energieumwandlungstechniken unter Emissionsgesichtspunkten noch deutliche Reduktionspotenziale aufweisen. Auch wenn Brennstoffzellen lokal betrachtet den Vorzug von „Null-Emissionen“ an Schadstoffen aufweisen, wirken sich vorgelagerte Brennstoffketten auf die Gesamtbilanz aus. Hohe Emissionsanteile einiger Brennstoffketten bleiben den Brennstoffzellen als „ökologischer Rucksack“ erhalten. Minderungspotenziale ergeben sich im Primärenergieverbrauch, bei den Treibhausgasen, der

Versauerung sowie bei den Stickoxidemissionen. Aus Sicht der Primärenergieersparnis und der Reduzierung von Treibhausgasemissionen sind Brennstoffzellen somit sowohl für die reine Stromerzeugung als auch gekoppelt in KWK sinnvoll einsetzbar.

Die Vorteile biogener Brennstoffe in Bezug auf Treibhauseffekt und Ressourcenverbrauch lassen sich unter Umweltgesichtspunkten effizient mit denen von Brennstoffzellen verknüpfen. Insgesamt gesehen können Brennstoffzellen bei weiterer Erschließung des Potenzials regenerativer Energieträger – auch unter Berücksichtigung der vorgelagerten Kette – einen deutlichen Beitrag zum Klimaschutz liefern. Der ökologisch verträgliche Einsatz vergaster oder vergärter (Rest)Biomasse (fast neutrale CO₂-Bilanz, kein Verbrauch erschöpflicher Ressourcen) kann in Brennstoffzellen ohne deutliche Verschlechterungen in anderen Umweltwirkungskategorien erfolgen.

Für den Einsatz in der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung liegen die „zulässigen“ (anlegbaren) Investitionen eines Hybrid-Systems (Hochtemperatur-Brennstoffzelle kombiniert mit Gasturbine) etwa 15-20 % über denen eines vergleichbaren Gasturbinen-Systems, gegenüber einem GuD-System in der zentralen Stromerzeugung um bis zu 30 % höher. Unter den z. Z. geltenden Rahmenbedingungen und bei gleich bleibenden gesetzlichen Emissionsanforderungen für (konventionelle) Energieumwandlungsanlagen ist für potenzielle Betreiber eines Brennstoffzellen-Systems darum derzeit kein ökonomischer Vorteil erkennbar. Dies könnte sich bei einer Verschärfung von Emissionsstandards ändern.

Der Einsatz von Hochtemperatur-Brennstoffzellen in der stationären Energieversorgung wird wahrscheinlich kurz- bis mittelfristig zuerst in dezentralen Anlagen mit kleiner Leistung erfolgen. Allerdings dürfte der „klassische“ dezentrale KWK-Markt aufgrund der Liberalisierung schrumpfen. Sinkende Strompreise und zunehmende Planungsunsicherheit spiegeln sich in angestrebten kurzen Amortisationszeiten neuer Anlagen zur Begrenzung des Investitionsrisikos wider. Dadurch werden Neuanlagen mit geringen Anfangsinvestitionen begünstigt. Effiziente Energieumwandlungskonzepte wie Brennstoffzel-

len, die vergleichsweise hohe Anfangsinvestitionen erfordern und sich erst langfristig über die Brennstoffeinsparung rentieren, haben deshalb Nachteile. Andererseits wird seitens der EU ein Ausbau des Anteils von KWK-Anlagen angestrebt, was zu einem Aufbau entsprechender Märkte in Europa führen könnte. Hierzu eignen sich neben der Brennstoffzelle u. a. auch Motoren oder Gasturbinen. Damit hängt die Marktintegration der Brennstoffzelle davon ab, ob sie den neuen Anforderungen flexibel und zu konkurrenzfähigen Preisen genügen kann. Durch energie- und umweltpolitische Maßnahmen ließe sich dieser Prozess ggf. unterstützen.

Mit einem Einsatz von Hochtemperatur-Brennstoffzellen in Kraftwerken ist eher langfristig zu rechnen. Brennstoffzellen für größere Anlagen befinden sich noch weitgehend im Entwicklungsstadium. Bevor größere Pilotanlagen gebaut werden können, besteht noch ein enormer Entwicklungsbedarf, u.a. im materialtechnischen Bereich. Insbesondere sind Materialien notwendig, welche hohen Temperaturen korrosionsfrei standhalten, gut verarbeitbar sind und kostengünstig zur Verfügung stehen. Darüber hinaus bemüht man sich um die Absenkung der Betriebstemperaturen von Hochtemperatur-Brennstoffzellen, was jedoch weiter intensiviert werden müsste. Daneben steht auch hier eine Optimierung der Gesamtsysteme in Bezug auf Langzeitstabilität an. Eine Markteinführung wird erst nach erfolgreicher Demonstration ihrer technischen Reife erfolgen können. Augenblicklich sind noch Vorleistungen zu erbringen, die die momentane Differenz zwischen Marktpreis und den noch hohen Fertigungskosten abdecken.

Die Kopplung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit Gasturbinen eröffnet ein attraktives Marktsegment, da hiermit eine weitere Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades und damit eine Verringerung der Emissionen einhergehen. Dies trifft auch auf eine Integration in Kohlegas-GuD-Kraftwerke zu, deren Markteinführung mittelfristig zu erwarten ist. Mit Hilfe der Kohlevergasung könnte eine effizientere Nutzung heimischer Rohstoffe erfolgen, was u. U. Exportchancen (China, Indien) eröffnet.

Brennstoffzellen in tragbaren Kleingeräten

Der Energieverbrauch neuer Kleingeräte (v. a. sogenannte CCC-Anwendungen, also Computer, Cellular Phones und Camcorder) nimmt schneller zu als die Energiedichte neuer Batterien - mit der Folge kürzerer Betriebszeiten. Der wachsende Energiebedarf dieser Anwendungen könnte auch durch Mini-Brennstoffzellen-Systeme (z. B. mit Metallhydridspeicher) gedeckt werden. In diesem weiter stark expandierenden Markt haben Brennstoffzellen gute Chancen, erhebliche Marktanteile zu gewinnen. Für tragbare elektrische Kleingeräte sind besonders Niedertemperatur-Brennstoffzellen geeignet. Voraussichtlich werden Membran-Brennstoffzellen (PEMFC) am ehesten die Marktreife erreichen. Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC) haben ebenfalls gute Chancen, befinden sich jedoch zurzeit noch im Laborstadium.

Die Vorteile von Brennstoffzellen gegenüber Batterien und Akkumulatoren liegen in deutlich erhöhten netzunabhängigen Betriebszeiten bei effektiver Nutzung eines begrenzten Platzangebotes, einer deutlich höheren Lebensdauer, günstigem Gewicht, flexibler Lastdynamik und relativ niedrigen Betriebstemperaturen. Aufgrund der räumlichen Trennung von Zelle und Brennstoffspeicher kann keine Selbstentladung auftreten. Als Brennstoff für tragbare elektrische Kleingeräte, die mit einer PEMFC ausgestattet sind, ist der Einsatz von reinem Wasserstoff aufgrund der Handlichkeit solcher Systeme vorzuziehen. Die einsetzbaren Metallhydridspeicher sind bis zu eintausendmal wieder beladbar. Ein wesentlicher Nachteil für PEMFC liegt – neben fehlenden technischen Normen – im Fehlen einer „flächendeckenden“ Wasserstoffbereitstellung. Alternativ könnten darum auch haushaltstypische, kohlenstoffstämmige Brennstoffe in Betracht kommen. Für deren Nutzung wären jedoch Mini-Reformer notwendig, an denen bereits gearbeitet wird. Der Direkteinsatz von Methanol in DMFC-Systemen ist energetisch gesehen günstiger als eine erneute Reformierung zu Wasserstoff.

Eine grobe Vergleichsrechnung (Anschaffungs- und Energiekosten) zeigt, dass gegenüber einer Batterie das Brennstoffzellen-System höhere Anschaffungskosten durch seine lange Lebensdauer relativiert. Eine Kostenabschätzung für die einzelnen Komponenten eines Mini-Brennstoffzellen-Systems ergab, dass das Kostenniveau von Li-Ion-Akkumulatoren erreichbar erscheint.

Der Emissionsbeitrag von Mini-Brennstoffzellen wird nicht wesentlich durch den Brennstoffpfad bestimmt, sondern – eher positiv – durch die lange Lebensdauer des Brennstoffzellen-Systems. Deshalb und wegen der teilweisen Recyclingfähigkeit könnten Brennstoffzellen bei einer Substitution von signifikanten Mengen an Akkumulatoren einen wichtigen Beitrag zur Müllvermeidung leisten.

Fazit

Übergreifend lässt sich festhalten, dass nach heutigem Stand *Energieumwandlungssysteme mit Brennstoffzellen zukünftig konkurrenzfähig werden können*, wenngleich das Erreichen entsprechender Kostenziele ein überaus ehrgeiziges Entwicklungsziel ist. Die Entwicklung von Brennstoffzellen-Systemen lässt *Innovations-sprünge* erwarten – sowohl für die Brennstoffzellen selbst im Bereich der Materialtechnik und der Herstellungsverfahren als auch für die unterschiedlichen Peripherie-Einheiten. Die Weiterentwicklung der Wasserstoffspeicherung (z. B. Nanospeicher) wird allgemein als dringlich angesehen, da sich die *Wasserstoffspeicherung* für alle Anwendungen (Fahrzeuge, dezentrale Energieversorgung, tragbare Kleingeräte) zunehmend als *Schlüsselfaktor* herauskristallisiert.

Entscheidend für die weitere Diffusion der Brennstoffzellen-Technologie werden die energie-, umwelt- und verkehrswirtschaftlichen Rahmenbedingungen sein, da viele Potenziale der Brennstoffzelle erst *im Rahmen einer Neuausrichtung des Verkehrssystems sowie der Energiewirtschaft* – hin zu einer auf regenerativen Energieträgern basierten Energieversorgung – *in vollem Umfang wirksam* werden können.

Kontakt

Dipl.-Phys. Torsten Fleischer
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Institut für Technikfolgenabschätzung
und Systemanalyse (ITAS)
Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe
Tel.: + 49 (0) 7247 – 82 45 71
Fax: + 49 (0) 7247 – 82 48 06
E-Mail: fleischer@itas.fzk.de

Der TAB-Arbeitsbericht Nr. 67 „Brennstoffzellen-Technologie“ (Endbericht, Berlin, Dezember 2000, 313 Seiten) kann schriftlich angefordert werden bei:

Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim
Deutschen Bundestag (TAB)
Frau Gabriele Rastätter
Neue Schönhauser Straße 10, D-10178 Berlin
Fax: + 49 (0) 30 / 28491 – 119
E-Mail: rastaetter@tab.fzk.de

«

Umweltrisiken gentechnisch veränderter Pflanzen: Zulässigkeit und Bedeutung von Risikovergleichen

von Othmar Käppeli, Fachstelle für Biosicherheitsforschung und Abschätzung von Technikfolgen der Schweiz (BATS)

Der Forschungsschwerpunkt der Fachstelle BATS ist die Methodik der Risikoermittlung für die Biotechnologie. Die Risikoanalyse ist der naturwissenschaftliche Teil und bildet die Grundlage für die Risikobewertung, die einer breiteren wissenschaftlichen (Multidisziplinarität) und gesellschaftlichen Abstützung bedarf. Die Risikoanalyse soll einerseits transparente und nachvollziehbare Entscheidungsgrundlagen für die Risikobewertung liefern, andererseits Defizite im Wissen und ungenügende oder unangebrachte regulatorische Vorgaben aufdecken.

Hier wird der Gültigkeit von Risikovergleichen nachgegangen. Grundlegende Voraussetzung für Risikovergleiche ist die Gleichartigkeit von Risiken, deren Notwendigkeit ergibt sich aus dem Fehlen von allgemein akzeptierten und Technologie unabhängigen Vertretbarkeitskriterien und Schutzziele für biologische Risiken.