

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

Abbildung 2 →
Stirlingmotor mit einer
Leistung von 1 kW
für Holzfeuerung
(Foto: Solo)



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.