

# 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 Stromkennzahlen<sup>1</sup> 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.

<sup>1</sup> 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

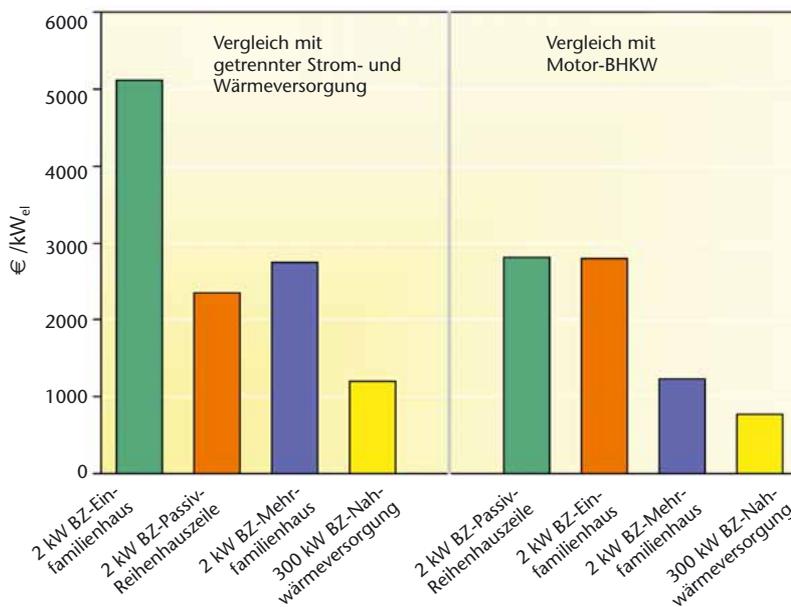
Friedhelm Steinborn  
Steinborn innovative  
Gebäude-Energie-  
versorgung Stuttgart  
steinborn@bhkw-info.de

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<sub>e</sub> 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 Brennstoffkessel mit ca. 2.000 bis 3.000 €/kW<sub>e</sub> 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.

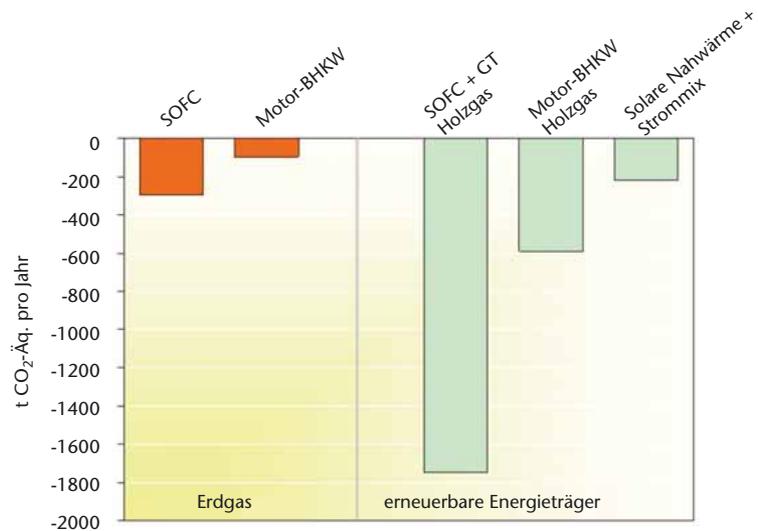
Ökologische Bewertungen und Vergleiche Von einem verstärkten Einsatz der Brennstoffzelle in einem zukünftigen Energiesystem werden erhebliche Beiträge zur Verminderung von Treibhausgasemissionen und zum Ressourcenschutz erwartet. Detaillierte Ökobilanzen (Life Cycle Assessment) helfen, eine umfassende 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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.

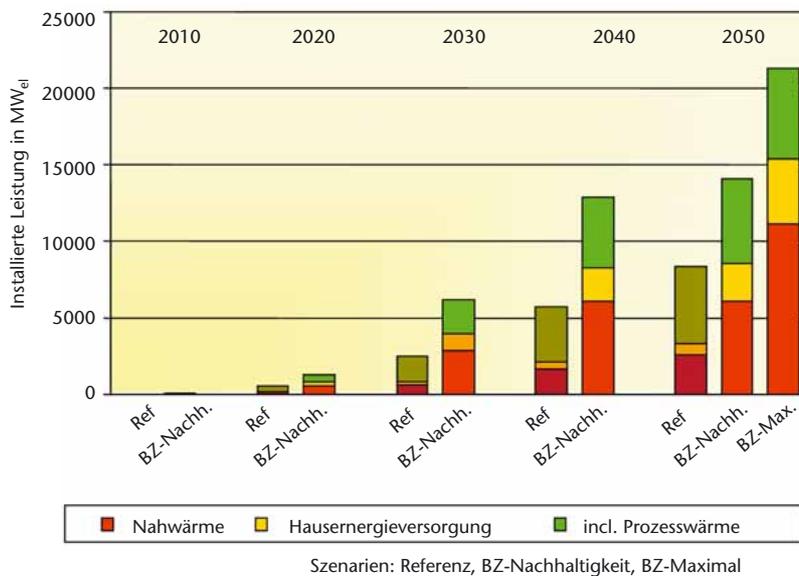


## Langfristszenarien für den verstärkten Ausbau stationärer Brennstoffzellen

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 CO<sub>2</sub>-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<sub>el</sub> installierter Leistung bis 2030 und knapp 800 MW<sub>el</sub> 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<sub>el</sub>. 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<sub>el</sub> und zur industriellen KWK mit

2.250 MW<sub>el</sub> sind deutlich größer als das Potenzial der Objektversorgung mit 1.050 MW<sub>el</sub>. Bis 2050 wächst die Brennstoffzellenleistung auf insgesamt 14.040 MW<sub>el</sub>. 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<sub>el</sub>.

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.