Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung – Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotenziale

W. Krewitt, M. Pehnt, M. Fischedick, H. Temming (Hrsg.)
Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2004-09-23

1 Zusammenfassung

Unsere heutige Energieversorgung ist aufgrund erheblicher Defizite vor allem im Bereich des Klimaschutzes und der Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen nicht nachhaltig. Durch die Verfügbarkeit neuer Technologien zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Nutzung erneuerbarer Energien eröffnen sich neue Chancen für eine nachhaltige Entwicklung, die es gerade in einer Phase des strukturellen Umbruchs in der Energiewirtschaft zu nutzen gilt. Die Einführung neuer Technologien in bestehende Strukturen erfordert allerdings oft erhebliche volkswirtschaftliche Aufwendungen über einen längeren Zeitraum. Auch ist zu berücksichtigen, dass sich diese Strukturen nur in Zeiträumen von Jahrzehnten ändern lassen. Entscheidungen in Energiewirtschaft und -politik haben deshalb stets weit reichende und lang wirkende Folgen. Entscheidungsträger müssen eine ausgewogene Balance zwischen den heutigen technischen und ökonomischen Möglichkeiten und den zu erwartenden langfristigen Entwicklungsperspektiven finden. Um in dieser Hinsicht tragfähige Entscheidungen treffen zu können, ist – trotz aller damit verbundenen Unsicherheiten – die Analyse möglicher Entwicklungspfade über einen entsprechend langen Zeitraum geboten.

Gerade bei der Einschätzung der Brennstoffzellen-Entwicklung ist von einem ausreichend langen Zeithorizont auszugehen. Die hohe Effizienz, das günstige Umweltverhalten und die Rolle der Brennstoffzelle als Brückentechnologie auf dem Weg zu einer regenerativen Wasserstoffwirtschaft haben hohe Erwartungen in eine Technologie geweckt, die manchmal bereits als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts bezeichnet wird. Wegen der hohen Herstellungskosten und der zum Teil noch ungelösten technischen Probleme ist die Brennstoffzelle allerdings heute noch kein wirtschaftlich und technisch ausgereiftes Produkt. Brennstoffzellen werden also eher mittel- bis langfristig eine energiewirtschaftlich relevante Rolle in der Energieversorgung spielen können. Um diese überhaupt zu erreichen, sind allerdings bereits heute Weichenstellungen in Politik und Wirtschaft notwendig. Die vorliegende Studie bietet eine umfassende Analyse der Rahmenbedingungen und des Umfeldes, in dem sich die zukünftige Entwicklung stationärer Brennstoffzellen abspielen wird.

1.1 Perspektiven der Brennstoffzellen in einer an Nachhaltigkeitszielen orientierten Energieversorgung

Die Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung in Deutschland wird maßgeblich von energie- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen sowohl auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene beeinflusst. 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 auf nationaler Ebene anzusetzenden politischen Vorgaben, die das Erreichen dieser Ziele ermöglichen sollen, haben zwangsläufig einen großen Einfluss auf die Entwicklungsmöglichkeiten einzelner Technologien.

Die genannten Ziele können wirtschaftlich und umweltverträglich nur dann erreicht werden, wenn es gelingt, sowohl den Strom- und Wärmebedarf durch vielfach kostengünstige Effizienzmaßnahmen zu reduzieren als auch gleichzeitig die bestehende Versorgungsstruktur zu ändern. Für die Einsatzmöglichkeiten der Brennstoffzelle ergibt sich daraus ein Spannungsfeld, in dem sie sich behaupten muss. Im Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgung sind dabei insbesondere folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Geht man von einer insgesamt nachhaltigen Entwicklung aus wie sie im Nachhaltigkeitsszenario des Umweltbundesamtes skizziert ist, so schränkt der *deutlich sinkende Raumwärmebedarf* (Minderung um 52 % bis 2050) generell das Potenzial für KWK-Anwendungen – und damit auch für Brennstoffzellen – ein. Bei einem wachsenden Bedarf an Hausenergiesystemen mit einer niedrigen Auslegungsleistung hat die Brennstoffzelle aufgrund ihres modularen Aufbaus voraussichtlich konstruktive Vorteile gegenüber motorischen Blockheizkraftwerken. Auch die deutliche Verschiebung des Verhältnisses Strom- zu Wärmebedarf begünstigt den Einsatz von Brennstoffzellen mit ihren potenziell höheren Stromkennzahlen.

- Auch der *stark wachsende Anteil erneuerbarer Energieträger an der direkten Strom- und Wärmeversorgung*, der im Nachhaltigkeitsszenario bis 2050 auf 41 % (Wärme) bzw. 60 % (Strom) wächst, 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 mittel- bis langfristig das Potenzial der Brennstoffzelle auch dazu dienen, durch

die Nutzung von Brenngasen aus erneuerbaren Energien neue Anwendungsmöglichkeiten für regenerative Energieträger zu erschließen.

- Durch die *wachsende Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung* für eine umweltfreundliche Strom- und Wärmeversorgung eröffnet sich für die Brennstoffzelle trotz absolut sinkenden Wärmebedarfs ein grundsätzlich hohes Einsatzpotenzial. Für Blockheizkraftwerke mit einer Leistung unter 10 MW_{el} liegt dies in den untersuchten Nachhaltigkeits-Szenarien im Jahr 2030 zwischen 18,6 und 23,4 GW_{el} bzw. 21,6 und 30,6 GW_{el} im Jahr 2050. Dabei ergeben sich im Bereich der Hausenergieversorgung mit Mini-BHKW, die auch als virtuelle Kraftwerke betrieben werden können, neue Einsatzbereiche.

1.2 Wirtschaftliche Perspektiven stationärer Brennstoffzellen

Kurz vor der Einführung einer ersten Serienproduktion sind die heutigen Herstellungskosten stationärer Brennstoffzellen gegenüber konventionellen Versorgungssystemen naturgemäß noch nicht konkurrenzfähig. Die von verschiedenen Herstellern anvisierten Zielkosten deuten auf das große Kostenminderungspotenzial hin, das es in den nächsten Jahren durch die Weiterentwicklung sowohl der Brennstoffzelle selber als auch der Brennstoffzellenfertigung auszuschöpfen gilt.

Auch wenn sich die Hoffnung auf stetig fallende Kosten bei dem bisher einzigen kommerziell verfügbaren Brennstoffzellen-BHKW, dem PC25 System von UTC (ONSI), nicht erfüllt hat, so erscheint langfristig eine Kostenminderung auf spezifische Kosten zwischen 800 und 1.500 €/kW_{el} durch technisches Lernen bei einer ausreichend großen Produktionsmenge als realisierbar. Voraussetzung für eine solche Entwicklung ist allerdings, dass der Lernprozess durch eine ausreichend große Nachfrage während der Markteinführung bei noch relativ hohen Einstiegspreisen frühzeitig angeregt wird.

Kosten-Benchmarks zeigen, dass vor allem im Bereich der Hausenergieversorgung mit kleinen Leistungseinheiten stationäre Brennstoffzellen unter bestimmten Randbedingungen bereits mit spezifischen Kosten von 2.000 bis zu 5.000 €/kW_{el} zumindest im Vergleich zu Strombezug und lokaler Wärmeversorgung wirtschaftlich betrieben werden können. Die wirtschaftlichen Vorteile der gekoppelten Strom- und Wärmeversorgung gelten jedoch nicht nur spezifisch für die Brennstoffzelle, sondern auch für andere KWK-Technologien. Um gegenüber konventionellen KWK-Anlagen konkurrenzfähig zu sein, müssen mindestens die von den Brennstoffzellen-Herstellern genannten Zielkosten erreicht werden. Ein gewisses Alleinstellungsmerkmal hat die „kleine“ Brennstoffzelle zur Hausenergieversorgung (1 bis 2 kW_{el}), da

sich motorische BHKW in dieser Leistungsklasse bis jetzt nicht wirtschaftlich realisieren lassen.

Neben den ausgereiften konventionellen KWK-Technologien stehen aber auch weitere innovative Technologien wie Holzpelletheizung, Stirlingmotor oder regenerative (z.B. solare) Nahwärmeversorgung kurz vor der Markteinführung. Zwar können auch diese Systeme heute in der Regel noch nicht ohne eine entsprechende Förderung wirtschaftlich betrieben werden, langfristig dürfte aber in diesen ebenfalls umweltfreundlichen Technologien die wirtschaftliche Messlatte für die Brennstoffzelle zu sehen sein.

1.3 Ökologische Bewertung stationärer Brennstoffzellen

Von einem verstärkten Einsatz der Brennstoffzelle in einem zukünftigen Energiesystem werden erhebliche Beiträge zur Verminderung von Treibhausgasemissionen und zum Ressourcenschutz erwartet. Um in einer umfassenden ökologischen Bewertung den gesamten Lebensweg der Brennstoffzellen mit Herstellung, Betrieb, Entsorgung und Brennstoffbereitstellung zu erfassen, wurden detaillierte Ökobilanzen für verschiedene Brennstoffzellensysteme erstellt.

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 einer Brennstoffzelle 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. Ausschlaggebend für die ökologische Bewertung sind letztendlich die zukünftig erreichbaren Gesamtnutzungsgrade für Strom und Wärme. Auf Grund des frühen Entwicklungsstandes ist ein Vergleich der verschiedenen konkurrierenden Technologien heute noch nicht abschließend möglich. Bei den schadstoffbedingten Umweltwirkungen fällt die Bilanz allerdings eindeutig zugunsten der Brennstoffzelle aus. Eine Ausnahme macht nur der auch im Vergleich zur Brennstoffzelle sehr gut abschneidende Stirling-Motor, dessen niedrige Emissionswerte noch in der Serienpraxis validiert werden müssen.

Wird Erdgas als Brennstoff verwendet, so wird die Ökobilanz der verschiedenen Brennstoffzellensysteme eindeutig von der Bereitstellung und Nutzung des Brennstoffs dominiert. Im Gegensatz dazu ist der Beitrag durch die Herstellung der Brennstoffzelle an den Umwelteinwirkungen klein, solange ein weitgehendes Recycling von Komponenten und Materialien gewährleistet werden kann, und liegt bei den meisten Brennstoffzellentypen und Umweltwirkungen unter 10 % der gesamten Lebenszyklusemissionen. Bei der PEMFC und der PAFC bestimmt dabei vor allem Grafit den „ökologischen Rucksack" der Stackherstellung, bei der MCFC der Einsatz von Nickel, und bei der SOFC sind der Einsatz von Yttriumoxid und Chrom (planare SOFC) bzw. $LaMnO_3$ (tubulare SOFC) für die Bilanz der Stackherstellung von Bedeutung.
Im Hinblick auf die Ressourcenverfügbarkeit müssen einige Materialien wegen des großen Bedarfs der Brennstoffzellen (Nickel, Platin), der geringen Reserven (Zirkonoxid) und der konkurrierenden Einsatzfelder in anderen Technologiefeldern (seltene Erden, Zirkonoxid) im Zuge der weiteren Brennstoffzellenentwicklung kritisch beachtet werden.

Durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung und der damit einhergehenden sinkenden CO_2-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.

1.4 Brennstoffzellen im Netzverbund

Die Integration von Brennstoffzellen in die öffentliche Stromversorgung führt zu Wechselwirkungen mit dem Stromnetz. Da das bestehende Niederspannungsnetz, an dem kleine Brennstoffzellen in der Regel angeschlossen werden, ursprünglich nicht für eine Vielzahl von Eigenerzeugungsanlagen ausgelegt wurde, kann es mit zunehmender dezentral installierter Leistung dazu kommen, dass die Anforderungen an einen sicheren Netzbetrieb nicht mehr erfüllt werden.

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass es bei der Bemessungsleistung der Betriebsmittel (wie Leitungen, Transformatoren), der Einhaltung der maximal zulässigen Spannungsanhebung und der Zuverlässigkeit der Schutztechnik durchaus zu Restriktionen beim Netzanschluss kommen kann. Andere Aspekte wie Kurzschlussstrom, Langzeitflicker oder Oberschwingungen dürften in der Regel keine wesentlichen Probleme für den Netzanschluss von Brennstoffzellen darstellen. Bis auf die Bemessung der Betriebsmittel und die Spannungsanhebung sind die Netzrückwirkungen eher lokale Phänomene,

auf die durch anlagentechnische und/oder lokale netzseitige Maßnahmen reagiert werden kann.

Eine Genehmigung von Netzanschlussvorhaben erfolgt bislang häufig aufgrund pauschaler Überprüfungen der Netzverhältnisse durch den Netzbetreiber. Bei steigender Anlagenzahl wird dies jedoch zunehmend problematisch, da unzulässige Betriebssituationen eventuell nicht mehr rechtzeitig erkannt werden. Für die Zukunft wird erwartet, dass individuelle Betrachtungen von Netzanschlüssen notwendig werden, für die die Durchführung von Lastflussberechnungen eine Voraussetzung ist. In diesem Zusammenhang ist mit einer Überarbeitung des bestehenden Regelwerks für den Netzanschluss zu rechnen, bei der alle relevanten Akteure frühzeitig zu beteiligen sind, damit keine unzumutbaren Kostenbelastungen entstehen.

Der Markteinstieg stationärer Brennstoffzellen wird zunächst über die wärmegeführte Betriebsweise zur Deckung des thermischen Objektbedarfs erfolgen. In Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen können allerdings durch die Vermarktung von Regelenergie zusätzliche Wertschöpfungspotenziale erschlossen werden. Vor allem in Netzgebieten mit großer Last-Stochastik kann die vertragliche Zugriffsmöglichkeit des Netzbetreibers zur Einsatzänderung einzelner Anlagen helfen, den Bedarf an Regelenergie zu minimieren. Voraussetzung dafür ist neben den institutionellen Anpassungen im Regelenergiemarkt aber ein umfangreicher und heute noch teurer Einsatz an Informations- und Telekommunikationstechnik.

1.5 Langfristszenarien für den verstärkten Ausbau stationärer Brennstoffzellen

In verschiedenen Langfristszenarien wurden alternative Ausbaupfade für die Nutzung stationärer Brennstoffzellen innerhalb einer Versorgungsstruktur dargestellt, die das Erreichen wesentlicher Nachhaltigkeitsziele sicherstellen. Ergänzend wurde ein Ausbaupfad beschrieben, der von den Potenzialen zur Nutzung stationärer Brennstoffzellen unter den Randbedingungen eines Business-as-Usual Szenarios (Referenzszenario) ausgeht. Mit dieser Bandbreite unterschiedlicher Entwicklungspfade 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. 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. 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 drastisch 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 regenerativer Energien werden ausreichende Potenziale für innovative Technologien eröffnet. Im Szenario „BZ-Nachhaltigkeit“ wächst die insgesamt installierte Brennstoffzellenleistung bis 2030 auf 6.200 GW_{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 GW_{el} und zur industriellen KWK mit 2.250 GW_{el} sind deutlich größer als das Potenzial der Objektversorgung mit 1.050 GW_{el}. Bis 2050 wächst die Brennstoffzellenleistung auf insgesamt 14.040 GW_{el}. Sollte sich die Nahwärme nicht in dem im Szenario unterstellten Maß durchsetzen, so würde sich ein gewisser Anteil der Potenziale in den Bereich der Hausheizungsgeräte verschieben.

Im Szenario „BZ-Maximal“, das durch eine Erhöhung des KWK-Anteils an der Nahwärmeversorgung vor allem zu Lasten regenerativer Energien und durch eine zusätzliche Substitution konventioneller Einzelheizungen charakterisiert ist, wird bis 2030 eine installierte Leistung von insgesamt 8.250 GW_{el} erreicht, die bis 2050 auf 21.300 GW_{el} anwächst. Rund die Hälfte der Brennstoffzellen wird in diesem Szenario für die Nahwärmeversorgung eingesetzt. Die Brennstoffzellen-Zubauraten, die sich in den Nachhaltigkeits-Szenarien einstellen, liegen zwar vor allem in den nächsten zehn Jahren unter den Absatzzielen einiger Hersteller, mittelfristig dürfte das Marktvolumen aber ausreichen, um eine effiziente Serienfertigung auszulasten und durch technisches Lernen die erwarteten Kostenminderungen zu realisieren.

Die volkswirtschaftlichen Aufwendungen für einen verstärkten Einsatz stationärer Brennstoffzellen hängen in erster Linie von der Entwicklung der Brennstoffzellen-Herstellungskosten ab, werden aber unter anderem auch von der Entwicklung der Energieträgerpreise beeinflusst. Wird im Ausbauszenario „Brennstoffzelle-Nachhaltigkeit“ die Entwicklung der Herstellungskosten entsprechend einer Lernkurve „Trend“ angenommen, so erreichen die jährlichen

Investitionen in neue Brennstoffzellen im Jahr 2040 ein Maximum von 1,2 Mrd. $€_{2000}$. Den Investitions- und Betriebskosten für Brennstoffzellen stehen vermiedene Investitionen und Betriebskosten für substituierte konventionelle KWK-Anlagen und Kondensationskraftwerke gegenüber. Wegen der hohen Effizienz der Brennstoffzellen werden außerdem Brennstoffkosten eingespart. Wird eine obere Variante der Erdgas-Preisentwicklung unterstellt, so steigen alleine die vermiedenen Brennstoffkosten bis 2050 auf jährlich ca. 1,2 Mrd. $€_{2000}$. Die in diesem Szenario beschriebene Ausbaustrategie ist trotz der während der Markteinführungsphase notwendigen Vorleistungen langfristig mit erheblichem volkswirtschaftlichem Nutzen verbunden. Von einem verstärkten Ausbau stationärer Brennstoffzellen gehen tendenziell positive Auswirkungen für den Arbeitsmarkt in Deutschland aus. Voraussetzung für eine solche Entwicklung ist es jedoch, dass es gelingt, die Herstellungskosten für Brennstoffzellen langfristig, d.h. bis 2040/2050 auf unter 1.000 $€_{2000}$/kW zu senken.

1.6 Markthemmnisse und Förderinstrumente

Die Analyse wesentlicher Hemmnisse, Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren bei der Markteinführung von Brennstoffzellen macht deutlich, dass die Brennstoffzelle zwar interessante Perspektiven hat, aber nicht automatisch ein Selbstläufer sein wird. Die zentrale Herausforderung liegt darin, dass die Brennstoffzelle, die wie andere Innovationen auch zu Beginn der Kommerzialisierung vergleichsweise teuer ist, über die Einführungshürde zu bringen und damit marktfähig zu machen. Um die Kosten zu senken, müssen Lerneffekte im Zuge einer Massenproduktion erschlossen werden. Das setzt wiederum voraus, dass für eine Übergangsphase eine erhebliche Stückzahl zu nicht wettbewerbsfähigen Kosten abgesetzt werden muss, bevor ein selbsttragender Absatz zu Marktpreisen erreicht werden kann. Zusätzlich sind die institutionellen und sozio-ökonomischen Voraussetzungen wie z. B. die rechtzeitige Qualifizierung des Handwerks oder der Abbau von Hemmnissen für KWK-Contracting in der Wohnungswirtschaft sicherzustellen. Insgesamt ergeben sich dadurch folgende strategische Ansatzpunkte für eine Förderung des Markteintritts der stationären Brennstoffzellen:

Fortführung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sowohl bei der grundlagennahen Forschung wie auch bei marktnahen Demonstrationsprojekten. Angesichts der nationalen wie internationalen Anstrengungen zur Intensivierung und Bündelung der Forschung im Bereich Brennstoffzelle und Wasserstoff kann eine ausreichende F&E Dynamik erwartet werden, um die notwendigen Fortschritte in Richtung Endprodukt zu erzielen.

Kompensation der Mehrkosten bei Markteintritt durch begrenzte finanzielle Förderung durch öffentliche degressiv ausgerichtete (z. B. KWK-Bonus) oder private Programme.
Das private Engagement der Industrie und der privaten Akteure war für die Entwicklung der Brennstoffzelle unverzichtbar und bleibt angesichts der begrenzten öffentlichen Mittel auch für die Markteinführung der wichtigste Faktor. Dieses Engagement braucht eine langfristige Perspektive und damit verlässliche energiewirtschaftliche sowie regulatorische Rahmenbedingungen z. B. im Bereich des Netzzugangs und der Netznutzung.
Als effiziente Umwandlungstechnologie profitiert die Brennstoffzelle generell von der relativen Verteuerung fossiler Energieträger und Elektrizität, die mittelfristig wegen der Verknappung der fossilen Energieträger und dem zukünftigen Investitionsbedarf im Kraftwerkspark zu erwarten ist. Durch die Internalisierung externer Kosten, die in Ansätzen durch Energie-/CO_2-Steuer, CO_2-Emissionshandel oder ähnliche Instrumente begonnen wurde, kann dieser Trend verstärkt werden. Hiervon würden allerdings nicht nur die KWK-Technologien profitieren, sondern sehr viel stärker noch die erneuerbaren Energien.
Die Herausforderung der nächsten Jahre wird darin liegen, die möglichen Fördermaßnahmen, Politikinstrumente und industrielle Aktivitäten auf einander abzustimmen und in allen Handlungsfeldern rechtzeitig die Voraussetzungen für die Markteinführung der Brennstoffzelle zu schaffen. Die einzelnen Maßnahmen müssen deshalb im Rahmen einer energie- und klimapolitischen Gesamtstrategie zu einem sinnvollen Mix an Politikinstrumenten gebündelt werden.

1.7 Ausblick

Die Entwicklung der Energieversorgung entlang einer Trendfortschreibung führt nicht zu einer nachhaltigen Struktur und verfehlt insbesondere die Klimaschutzziele deutlich. 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 selbsttragenden Kostenreduktion führen.

Geht man jedoch 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 tief greifende

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.

Einerseits muss durch Effizienzmaßnahmen, vor allem bei der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes und im Strombereich, der Energiebedarf insgesamt deutlich gesenkt werden. Dies ist generell die *Grundvoraussetzung* für alle auf Dauer angelegten Zukunftsstrategien im Bereich der Energieversorgung. Nur so kann der gleichzeitige Ausbau regenerativer Energien rasch genug wirksam werden, um den Einsatz fossiler Energieträger bis 2050 um rund zwei Drittel zu verringern und die CO_2-Emissionen um 80 % zu reduzieren. Die Gesamtstrategie einer stärker vernetzten und im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien stärker dezentral organisierten Energieversorgung fördert gleichzeitig auch die Marktpotenziale effizienter Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien und damit auch von Brennstoffzellen. Sie erlaubt schließlich die Vorbereitung und den Übergang in eine zu beträchtlichen Teilen auf Wasserstoff basierende Energieversorgung in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts. Ebenso unterstützt diese Strategie neben der Verankerung von Brennstoffzellen im stationären Bereich die Bemühungen, sie im Verkehrssektor als effizienten Antrieb neben den herkömmlichen Motoren zu etablieren.

Zwar wird durch die Verringerung des Wärmebedarfs und den steigenden Anteil regenerativer Energien das Einsatzpotenzial stationärer Brennstoffzellen prinzipiell eingeschränkt. Die Szenarienanalyse hat jedoch gezeigt, dass eine engagierte Nachhaltigkeitsstrategie neben dem Ausbau regenerativer Energien ein ausreichendes Entwicklungspotenzial für innovative KWK-Technologien wie der Brennstoffzelle bietet. Es ist eine wichtige Erkenntnis, dass gerade erst in einem an Nachhaltigkeitszielen orientierten Ausbaupfad der Energieversorgung 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 insgesamt, 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.

Allerdings weisen die vorliegenden Ergebnisse auch darauf hin, dass die Auswirkungen eines bloßen Technologiewechsels innerhalb der verschiedenen KWK-Alternativen, also von konventionellen Technologien oder auch innovativen Systemen wie dem Stirlingmotor hin zur Brennstoffzelle, relativ klein sind im Vergleich zu den durch die Veränderung der Versorgungsstrukturen

selber hervorgerufenen Effekten. Es ist also nicht in erster Linie die Brennstoffzelle, sondern zunächst einmal der forcierte Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, der zum Klima- und Ressourcenschutz beiträgt. Die Weichen hierfür werden in den nächsten Jahren gestellt und ein Ausbau der kurzfristig verfügbaren konventionellen Techniken kann als Wegbereiter auch für die Brennstoffzelle genutzt werden. Durch die zunehmende Substitution konventioneller KWK-Anlagen können stationäre Brennstoffzellen dann einen zusätzlichen Beitrag zur Minderung der Umweltbelastungen leisten.