

Forschungsberichtsblatt

**Perspektiven
Stationärer
Brennstoffzellen
im Energiesystem
Baden-Württembergs**

Kurzbeschreibung des Forschungsergebnisses

Gestützt durch die dynamische Entwicklung im Bereich mobiler Antriebe und eine Vielzahl von Demonstrationsprojekten in der stationären Anwendung sind in die Brennstoffzellen-Technologie hohe Erwartungen hinsichtlich der zukünftigen Energiebereitstellung gelegt worden. Die z. T. euphorische Diskussion mag auch darin begründet sein, dass praktisch alle Bereiche des Energiesystems von ein und derselben Technologie profitieren können und die Brennstoffzelle zudem als erster Schritt von einer zunehmend in der Kritik stehenden fossilen Energiewirtschaft in Richtung nachhaltigerer Energieversorgungsstrukturen gesehen wird.

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel dieser Arbeit, einen Beitrag zur realistischen Einschätzung der kurz- und mittelfristigen Möglichkeiten und Grenzen der Brennstoffzellentechnik in der stationären Energiewandlung zu leisten sowie Ansatzpunkte für interessante Anwendungsbereiche auch hinsichtlich einer gegebenenfalls gewünschten forcierten Markteinführung dieser neuen Technologie zu identifizieren. Dazu ist es erforderlich, detaillierte, betriebswirtschaftlich orientierte Einsatzanalysen repräsentativer Versorgungsaufgaben konsistent mit einer volkswirtschaftlich orientierten systemaren Gesamtoptimierung des Energiesystems Baden-Württembergs zu verknüpfen.

Grundlage dafür bilden die technischen und ökonomischen Entwicklungstrends stationärer Brennstoffzellen, die im Rahmen einer allgemeinen Technikanalyse anhand der Erfahrungen mit aktuellen Demonstrationsanlagen abgeleitet werden. Diese werden ergänzt um die zeitlich und strukturell differenzierte Bedarfs- und Laststruktur in der Industrie und den Haushalten Baden-Württembergs, wozu eine Methodik zur Verknüpfung verschiedener statistischer Datengrundlagen erarbeitet wird.

Abgeleitet werden repräsentative Einsatzfälle, für die mit Hilfe eines neu entwickelten Simulationstools ein ökonomischer Vergleich der Brennstoffzellentechnologie mit den alternativen Versorgungsvarianten durchgeführt wird. Aufgrund der zunehmenden Liberalisierung der Energiemärkte ist dazu eine detaillierte Analyse der bestehenden und zukünftigen Energiepreisstrukturen erforderlich, auch vor dem Hintergrund, dass mit Öffnung der Märkte die verschiedenen Preiskomponenten individuell betrachtet werden müssen.

Die Ergebnisse des objektbezogenen Systemvergleichs werden dann in den gesamtwirtschaftlichen Kontext gestellt, d. h. im Rahmen eines Systemmodells in die technologische und topologische Struktur der Energieversorgung Baden-Württembergs eingebettet. Mit Hilfe dieses Modells werden schließlich Modellrechnungen über die Entwicklung des Energiesystems durchgeführt. Die betrachteten Szenarien werden dabei so gewählt, dass einerseits die technologiespezifischen Auswirkungen eines verstärkten Einsatzes stationärer Brennstoffzellen auch im zeitlichen Verlauf deutlich werden, andererseits der mögliche Beitrag der Technologie zum Erreichen nachhaltiger Versorgungsstrukturen dargestellt wird.

Welche Fortschritte ergeben sich in Wissenschaft und/oder Technik durch Ihre Forschungsergebnisse

Die Arbeit greift die technische Charakterisierung von Brennstoffzellen in der stationären Anwendung vorangegangener Studien auf und aktualisiert die Datenbasis um die neuesten Entwicklungstrends. Zusammengestellt werden die ersten Erfahrungen aus dem Praxisbetrieb aktueller Pilot- und Demonstrationsanlagen der verschiedenen Technologielinien. Diese bilden die Grundlage für die weiteren vergleichenden Betrachtungen, bieten aber auch eine Übersicht über den aktuellen Stand der Brennstoffzellentechnologie und der sich daraus ergebenden zukünftigen Entwicklungstrends bzw. -perspektiven für nachfolgende Forschungsvorhaben. Neben der Darstellung der kurz-, mittel- und langfristig zu erwartenden Systemkonzepte in der stationären Anwendung aus technischer Sicht werden darüber hinaus Ansatzpunkte für eine Abschätzung der zukünftigen Kostenentwicklung von Brennstoffzellenanlagen diskutiert. Diese umfassen Gesichtspunkte hinsichtlich der zu erwartenden Skaleneffekte der Anlagenleistungsgröße auf die Investitionskosten der Systeme sowie die theoretische Ableitung möglicher Kostenreduktionskurven (Erfahrungskurven) ausgehend von den veröffentlichten Kostenangaben erster Brennstoffzellenanlagen im praktischen Einsatz. Die dargestellten Ansätze können im Rahmen weitergehender Forschungsarbeiten konkretisiert werden und ein Benchmark für die weitere technische Entwicklung der Systeme bieten.

Darüber hinaus wird eine Methodik erarbeitet, die es erlaubt, die im industriellen Sektor vorliegenden Bedarfs- und Laststrukturen auf Basis verschiedener aggregierter Statistiken den Endenergieverbrauch strukturell hoch aufgelöst ausweisen zu können. Die Differenzierung des industriellen Endenergieverbrauchs nach einzelnen Wirtschaftszweigen und insbesondere Betriebsgrößenklassen ermöglicht es, das zeitliche Nachfrageprofil repräsentativer Einsatzfälle für stationäre Brennstoffzellen abzuleiten, die die tatsächliche Situation möglichst realistisch widerspiegeln. Dies ist auch für andere energiewirtschaftlich relevante Forschungsarbeiten beispielsweise hinsichtlich weiterer KWK-Anwendungen von Bedeutung, bei denen das thermische und/oder elektrische Lastprofil eines Verbrauchers und das Verhältnis der verschiedenen Endenergieanwendungen von Bedeutung ist. Entsprechend gilt dies auch für die durchgeführte Analyse der mit der Liberalisierung der Energiemärkte veränderten Preisstrukturen für den Bezug elektrischer Energie und Erdgas sowie die Vergütungssätze für die Einspeisung dezentral erzeugten Stroms in die öffentlichen Netze.

Für den praktischen Einsatz und die technische Weiterentwicklung stationärer Brennstoffzellen sind die erarbeiteten Gesichtspunkte zur konkreten Auslegung der Anlagen in den verschiedenen Teilsegmenten des Energiesystems von Bedeutung. Mit Hilfe des entwickelten Simulationstools lässt sich für verschiedene Versorgungsaufgaben schnell die optimale Anlagenleistung eines KWK-Systems darstellen und die ökonomischen Auswirkungen einer

Stromeigenerzeugung mittels Brennstoffzellen können quantifiziert werden. In Verbindung mit den durchgeführten Betrachtungen hinsichtlich der für eine Wettbewerbsfähigkeit von Brennstoffzellensystemen erforderlichen Investitionskosten in den einzelnen Marktsegmenten bietet dies eine Orientierungshilfe für die weitere technische Produktentwicklung. Die dabei interessanten Anwendungsnischen in der Industrie und im Gebäudebereich bieten darüber hinaus Ansatzpunkte für eine positive Markteinführung der Systeme, können aber auch interessante Möglichkeiten für die Strombeschaffung von Energieversorgungsunternehmen oder den Markteintritt neuer unabhängiger Stromerzeuger darstellen. Konkret können die Ergebnisse der durchgeführten Einsatzanalysen wie folgt zusammengefasst werden:

- Brennstoffzellen sind bei ökonomisch optimaler Auslegung im Vergleich zu konventionellen KWK-Technologien in der Regel sehr klein dimensioniert. Nur im Ernährungs-gewerbe, der Papier- sowie der chemischen Industrie ergeben sich höhere optimale Auslegungsleistungen, die zu teilweise deutlichen Stromüberschusspotenzialen über die Eigenversorgung hinaus führen. Insofern zeigt sich, dass die derzeit diskutierten Systemgrößen für die Markteinstiegsprodukte vor allem für kleinere Verbraucher häufig überdimensioniert sind und es so zu zum Teil deutlichen Potenzialeinbußen kommt.
- In den Fällen, in denen es nicht zum überdimensionierten Einsatz kommt (industrielle Verbraucher mit einem jährlichen Endenergiebedarf über 5-6 GWh/a bzw. Gebäude mit einem jährlichen Endenergiebedarf über rd. 50.000 GWh/a), zeigt sich für die zu erreichenden Zielkosten eine sehr deutliche Abhängigkeit von der zukünftigen Energiepreisentwicklung. Bei einer unterstellten für KWK-Systeme günstigen Entwicklung (höhere Strompreise bei gleichzeitig moderater Erdgaspreisentwicklung) liegen die zu erreichenden Zielkosten für Brennstoffzellen mit 1.250-1.750 €/kW_{el} in der Industrie und bis zu 2.500-3.000 €/kW_{el} in Gebäuden relativ hoch. Bei einer ungünstigen Entwicklung sinken diese allerdings auf Werte von 500 – 600 €/kW_{el} in der Industrie. Hausenergiesysteme wären in diesem Fall mit Zielkosten zwischen 1.500 und 2.000 €/kW_{el} besser gestellt.
- Vor dem Hintergrund der mittelfristigen Kostenziele von Seiten der verschiedenen Brennstoffzellenhersteller in Höhe von rund 1.250 €/kW_{el} zeigt sich, dass in der industriellen Anwendung nur bei günstiger Energiepreisentwicklung diese Kostenziele ausreichen, um weite Teile des Marktes zu erschließen. Bei ungünstigen Preisentwicklung müssen diese Kostenziele deutlich unterschritten werden.
- Weiterhin zeigt sich, dass zum Erreichen der erforderlichen Kostenreduktion allein durch Ausnützen der Skaleneffekte der Produktion (Erfahrungskurve) nur sehr wenige industrielle Marktnischen mit deutlich höheren Zielkosten zur Verfügung stehen. Im Gebäudebereich wiederum scheinen zumindest bei einer hohen ökonomischen Bewertung elektrischer Energie derartige Marktnischen zur Verfügung zu stehen. Ein Erreichen der Kostenziele von Seiten der Hersteller dürfte hier allerdings durch die im kleinen Leistungsbe-reich sehr deutlichen Skaleneffekte der Anlagenleistungsgröße stark erschwert werden.

- Wird eine positive Marktentwicklung und entsprechend kontinuierlich sinkende Systemkosten unterstellt, lassen die wirtschaftlichen Einsatzpotenziale die durchaus signifikanten Potenziale stationärer Brennstoffzellen hinsichtlich zu erreichender energiepolitischer Ziele erkennen. So weist bei einer unterstellten Untergrenze für die langfristige Kostenentwicklung der Systeme von rd. 600 €/kW_{el} die industrielle Anwendung kumulierte wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten von bis zu 0,5 GW_{el} für Niedertemperaturbrennstoffzellen, 4 GW_{el} für Hybridsysteme und 6 GW_{el} für Hochtemperaturbrennstoffzellen auf. Diese wiederum führen hier zu kumulierten CO₂-Minderungspotenzialen, die bei unterstellter Vollversorgung des industriellen Brennstoffbedarfs mit Erdgas, also brennstoffunabhängig, und Bewertung des erzeugten Stroms anhand des derzeitigen bundesdeutschen Erzeugungsmixes Emissionsminderungen von bis zu 11 Mio. t_{CO2} durch Hochtemperaturbrennstoffzellen erreichen. Die Potenziale von Niedertemperatur- und Hybridsystemen werden dabei begrenzt durch die eingeschränkte Abwärmenutzung auf niedrigem Temperaturniveau im Vergleich zum dominierenden industriellen Prozesswärmebedarf bei Temperaturen bis rd. 500 °C.
- Im Vergleich dazu weisen Brennstoffzellen im Wohngebäudebereich bei Anlagekosten von 600 €/kW_{el} deutlich geringere wirtschaftliche Potenziale auf von bis zu 1,5 GW_{el} für Kleinstsysteme mit 1,5 kW elektrischer Leistung bzw. in Höhe von bis zu 0,9 GW_{el} für 4,5 kW_{el}-Systeme. Entsprechend liegen auch die CO₂-Minderungspotenziale mit bis zu 3 Mio. t_{CO2} durch Kleinstsysteme weit unter denen in der Industrie. Gleichzeitig aber übersteigt hier das Marktpotenzial bezogen auf die wirtschaftlich zu installierende Gesamtzahl der Anlagen die industrielle Anwendung um das bis zu vierfache und erste Anwendungen werden bereits bei höheren Investitionskosten attraktiv.

Mit Hilfe des weiterentwickelten Systemmodells, das das gesamte Energiesystem Baden-Württembergs modelliert, ist es schließlich möglich, sektoral differenziert die Einsatzpotenziale stationärer Brennstoffzellen auch in der längerfristigen Perspektive zu untersuchen. Die methodischen Grundlagen des Modells können dabei auch für die (Weiter-)Entwicklung von Modellen anderer Betrachtungsräume verwendet werden, um so die Möglichkeiten und Grenzen der Brennstoffzellentechnologie hinsichtlich gesellschaftlicher und/oder energie-wirtschaftlicher Zielsetzungen zu betrachten. Gleichzeitig lassen sich so die Marktaussichten der Technologie darstellen, um ggf. neue Partner für die weitere technische Entwicklung zu interessieren. Die im Rahmen der durchgeführten Szenariorechnungen aufgezeigten Gesichtspunkte hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung von Brennstoffzellen umfassen folgende:

- Dem Einsatz stationärer Brennstoffzellen zur individuellen Versorgung von Wohngebäuden steht die Raumwärmebereitstellung über Nah- und Fernwärmesysteme gegenüber. So ist bei einer unterstellten systemspezifisch gleichen Kostenentwicklung der verschiedenen

Brennstoffzellentechnologien die Einbindung größerer Systeme in bestehende Nah- und Fernwärmenetze dem Einsatz individueller Kleinsysteme vorzuziehen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass hinsichtlich der Kostenentwicklung deutlich höhere Anforderungen an Hausenergieversorgungssysteme gestellt werden, um gesamtwirtschaftlich trotz geringerer infrastruktureller Aufwendungen für Wärmenetze gegenüber einem durch Verbrauchs-poolung vergleichmäßigten Einsatz dezentraler Systeme attraktiv zu werden. Hintergrund dazu sind die für die öffentliche Kraft-Wärme-Kopplung sehr interessanten Hybridsysteme, die zum Teil sogar gegenüber dem industriellen Einsatz stationärer Hochtemperatur- und Niedertemperaturbrennstoffzellen gesamtwirtschaftliche Vorteile bieten können.

- Insgesamt bleibt allerdings die industrielle Energieversorgung ein sinnvoller Ausgangspunkt für die Markterschließung von Brennstoffzellen auch im systemaren Kontext. Aufgrund der teilweise vorhandenen Stromüberschusspotenziale stellen sich dabei vor allem die Papier- und chemische Industrie sowie die grundstoffschaffenden Industrie in Baden-Württemberg (Gummi- und Kunststoffwaren sowie Metallerzeugnisse) als auch langfristig interessante und stabile Marktsegmente dar. Begrenzte Einsatzmöglichkeiten bestehen darüber hinaus im Maschinenbau, in der Elektrotechnik und im Ernährungsgewerbe, so dass sich in der zeitlichen Perspektive ein forcierter Ausbau stationärer Brennstoffzellen ausgehend vom industriellen Einsatz in diesen Sektoren schrittweise über die öffentlichen Kraft-Wärme-Kopplung hin zur individuellen Hausenergieversorgung vollzieht.
- Die Struktur des Energieträgereinsatz in der Stromerzeugung Baden-Württembergs wiederum bleibt auch bei verstärktem Brennstoffzelleneinsatz weitgehend unverändert. Aufgrund der vornehmlich durch Mittellasterzeugung charakterisierten Strombereitstellung in KWK-Systemen erfolgt hier mit zunehmender Präsenz der Brennstoffzellentechnologie praktisch ausschließlich die Substitution anderer (Mittellast-)Erdgastechnologien, da die Systeme auch langfristig für die Grundlastversorgung und damit die Steinkohlesubstitution bzw. den Ersatz der wegfallenden Kernenergie ökonomisch uninteressant sind.
- Dennoch sind die gesamtwirtschaftlichen Mehraufwendungen bei forciertem Brennstoffzelleneinsatz mit deutlichen Treibhausgasemissionsminderungen verbunden. Diese sind aufgrund der vorliegenden Substitutionseffekte auf die technologischen Eigenschaften der Systeme zurückzuführen und äußern sich in Minderemissionen in Baden-Württemberg von rd. 553 gCO₂ pro Kilowattstunde in Brennstoffzellen erzeugter elektrischer Energie. Diese wiederum führen dazu, dass eine aktive Klimaschutzpolitik weitere Anreize für die Einführung stationäre Brennstoffzellen schaffen kann. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht erreicht so die Brennstoffzellentechnologie bei einem Investitionskostenniveau von rd. 850 €/kW_{el} und einem CO₂-Zertifikatspreis von rd. 120 €/tCO₂ die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den alternativen Energiewandlungs- bzw. -nutzungstechnologien und weist bis 2030 wirtschaftliche Ausbaupotenziale in Baden-Württemberg in Höhe von rd. 2,7

GW_{el} auf. Die damit erreichbare technologisch bedingte Treibhausgasreduzierung in Höhe von 8,1 Mio. t_{CO_2} stellt gleichzeitig mit den größten Teil an der durch CO_2 -Bepreisung erreichbare Treibhausgasreduzierung in Baden-Württemberg von 75,1 Mio. t im Jahr 2000 auf rd. 58,5 Mio. t bis 2030 dar.

Welche Empfehlung ergibt sich aus dem Forschungsergebnis für die Praxis

Im Fall stationärer Brennstoffzellen besteht die Situation, dass die am Markt etablierten Techniken ökonomische und technische „Barrieren“ darstellen, die von der Technologie zu überwinden sind, bevor eine Marktakzeptanz erfolgen kann. Es gilt also, das sogenannte „first user“-Problem zu überwinden, das sich aus der oben dargestellten Konkurrenzsituation ergibt. Die neue Technologie muss, um für den Anwender interessant zu sein, in zumindest einer Eigenschaft deutliche Vorteile gegenüber den etablierten Techniken versprechen, insbesondere dann, wenn sie in anderen (z. B. ökonomischen) Eigenschaften aufgrund ihres geringen Entwicklungsstandes noch unterlegen ist. Es kann sonst dazu kommen, dass zwar jeder potentielle Anwender Vorteile davon hätte, wenn alle die neue Technologie einsetzen würden, jedoch ist keiner bereit, den ersten Schritt bzw. den Aufwand und die Unsicherheit bei diesem ersten Schritt zu übernehmen. Gleichzeitig zeigt das Phänomen der Lern- bzw. Erfahrungskurven, dass vor allem zum Erreichen der gestellten ökonomischen Anforderungen ein gewisses Marktvolumen für stationäre Brennstoffzellen zwingend notwendig ist.

Erfahrungsgemäß birgt die Massenproduktion eines der größten Senkungspotentiale für die Kosten eines Produktes. Dazu sind allerdings Nischenmärkte erforderlich, in denen (noch) ökonomische Nachteile durch andere finanzielle oder technische Vorteile kompensiert werden können, so dass erste Schritte in Richtung einer günstigen Serienfertigung möglich werden. Um weiterhin die Technologie möglichst schnell auf der Erfahrungskurve voranzubringen, ist es dabei wichtig, dass diese Anwendungsnischen nicht nur dazu dienen dürfen, erste Anlagen lediglich zu demonstrieren. Sie müssen vielmehr durch aktives Feedback die Weiterentwicklung der Systeme forcieren und durch einen möglichst praxisnahen Charakter den Nutzen der neuen Technik auch für andere Anwenderkreise aufzeigen.

Schließlich gilt es, alle möglichen Lern- und Kostenreduktionspotenziale zu erschließen. Dies betrifft vor allem Potenziale, die nicht direkt im Produkt selbst zu finden sind, da hier in der Regel bereits vor Markteinstieg alle konstruktiven Möglichkeiten ausgeschöpft werden. Vielmehr müssen vorgelagerte Kostensenkungspotenziale erschlossen werden, die im Fall der Brennstoffzelle einerseits im Materialpfad, andererseits aber auch im Bereich peripherer Komponenten bestehen. So verfügt die Brennstoffzellentechnologie anders als eine bereits etablierte Technik noch über keine wettbewerblichen Zuliefer- und Partnerstrukturen, die infolge des Konkurrenzdrucks substantiell zu einer Kostenreduktion beitragen. Vielmehr stützen sich erste Systeme auf quasi-monopolistische Strukturen, die durch zuneh-

mende Attraktivität des neu entstehenden Marktsegmentes und damit durch Eintritt neuer Marktteilnehmer aufgebrochen werden müssen. Es gilt also, den notwendigen Lernprozess am Produkt zu initiieren, Anwendungsnischen zu finden und gegebenenfalls eine Marktentwicklung zu beschleunigen. Ansatzpunkte hierfür werden im Folgenden näher diskutiert.

1.1.1 Exemplarischer Einsatz stationärer Brennstoffzellen

Im Rahmen der derzeit stattfindenden marktvorbereitenden Entwicklung kommt dem exemplarischen Einsatz stationärer Brennstoffzellensysteme in interessanten Anwendungsnischen eine besondere Bedeutung zu. Über die reine Funktionsdemonstration der Anlagen hinaus gilt es damit erste wenn auch begrenzte Teilmärkte im Energiesystem zu erschließen, um so erste Schritte in Richtung einer Serienproduktion der Anlagen zu ermöglichen.

Ansatzpunkte für derartige Nischenanwendungen mit ökonomischem Mehrwert für die Systeme lassen sich direkt aus den technischen Charakteristika stationärer Brennstoffzellen ableiten und wie folgt charakterisieren:

1. **Die Erschließung zusätzlicher „Einnahmequellen“ durch Nutzung entstehender Nebenprodukte.** Im Fall mit Erdgas betriebener Brennstoffzellen betrifft dies die stoffliche Nutzung des praktisch schadstofffreien CO₂-Abluftstroms aufgrund des „kalten“ Verbrennungscharakters der Energieumwandlung. Einsatzmöglichkeiten ergeben sich hier beispielsweise in der Getränkeindustrie oder für die CO₂-Düngung in Gewächshäusern.
2. **Die Verringerung von Investitionen und Steigerung des Umwandlungswirkungsgrades durch Vermeiden peripherer Komponenten.** Dies umfasst den direkten Einsatz des in Brennstoffzellen erzeugten Gleichstroms zum Beispiel in galvanischen Produktionsprozessen, in der Aluminiumelektrolyse oder für EDV-Anwendungen bzw. Rechenzentren. Der mögliche Verzicht auf eine Wechselrichterkomponente auf Seiten des Brennstoffzellensystems sowie die Gutschrift einer entfallenden Gleichrichtung öffentlich bezogenen Stroms ermöglicht hier geringere Investitionsanforderungen an die Systeme bei gleichzeitig geringeren Verlusten bzw. höheren Wandlungswirkungsgraden.
3. **Die Nutzung möglichst preisgünstiger Brennstoffe.** Zu nennen sind hier vor allem der Einsatz von „Abfall-Wasserstoff“ als idealer Brennstoff für Brennstoffzellen aus der industriellen Produktion vornehmlich der chemischen Industrie und die Nutzung reformierten Biogases beispielsweise in Kläranlagen.

Der Demonstration dieser begrenzten Einsatzfelder bzw. Märkte wären hinsichtlich der Erschließung zukünftiger Massenmärkte zweckmäßigerweise exemplarische Anwendungen in interessanten Einsatzfeldern des „allgemeinen“ Marktes zur Seite zu stellen. Der in Rahmen dieser Arbeit durchgeführte ökonomische Vergleich zeigt dabei besondere Potenziale in

- der Papierindustrie und
- der chemischen Industrie

auf. Diese lassen auch über die Objekteigenversorgung hinaus zum Teil deutliche Überschussstrompotenziale und damit CO₂-Minderungspotenziale erwarten.

1.1.2 Weitergehende Markterschließung

Die erste Demonstration interessanter Anwendungsfelder und ggf. deren schrittweise Erschließung wird allerdings nicht genügen, um für stationäre Brennstoffzellen solche Kostendegressionen zu erzielen, die bereits kurzfristig eine allgemeine Marktdurchdringung ermöglichen. Ähnlich wie für die Entwicklung der Windenergie wird daher auch für die Einführung von Brennstoffzellen eine zusätzliche Förderung notwendig sein, die über eine allgemeine Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung hinaus gehen muss.

Die Entwicklung im Bereich der Windenergienutzung zeigt, dass die Längerfristigkeit der Förderung und die Reduktion der finanziellen Risiken wichtige Gesichtspunkte für eine erfolgsversprechende Förderung darstellen. Als eher problematisch zu sehen ist eine ggf. hohe, aber nur kurzfristig angelegte Unterstützung, wie dies beispielsweise im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogramms der Bundesregierung für die Brennstoffzellenentwicklung erfolgt ist. Zwar können so kurzfristig essentielle und umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsaufgaben initiiert werden, der baldige Wegfall der Unterstützung führt durch resultierende finanzielle Schwierigkeiten der Fördernehmer dann allerdings häufig zum Verlust vieler Ergebnisse. Eine langfristig angelegte, ggf. auch weniger stark dotierte Förderung ermöglicht hingegen eine längerfristige Risikominimierung beim Einsatz stationärer Brennstoffzellen und damit eine kontinuierliche Marktentwicklung und technische Verbesserung.

Wesentlich ist auch, dass von politischer Seite verlässliche Rahmenbedingungen eine klare Einschätzung des Wertes vermiedener Treibhausgasemissionen ermöglichen. Dies kann, wie die Szenarienrechnungen im Rahmen dieser Arbeit gezeigt haben, auch einen wesentlichen Beitrag zur erfolgreichen Markteinführung der Brennstoffzelle leisten.

Einen weiteren Aspekt zur Förderung stationärer Brennstoffzellen stellt die Entwicklung und Applikation standardisierter Genehmigungsverfahren dar. Wie die bisherigen Erfahrungen im Rahmen der Demonstrationsprojekte zeigen, sind die Betreiber hier mit regional sehr unterschiedlichen Vorgehensweisen konfrontiert, zurückzuführen auf z. T. noch nicht ausreichende technische Erfahrungen der entsprechenden Behörden. Eine Standardisierung und ggf. technologiespezifische Vereinfachung der erforderlichen Genehmigungen stellt somit eine kostengünstige Möglichkeit der Förderung von Brennstoffzellen dar, da sich ein hoher Aufwand bei Planung und Genehmigung auch in den Projektkosten widerspiegelt.

1.1.3 Stimulanz der Ausbildung von Zulieferstrukturen

Bereits vor Erschließung von Massenmärkten und der damit entstehenden Massenproduktion stationärer Brennstoffzellen kommt dem Aufbau geeigneter Zulieferstrukturen für die Her-

stellung der Systeme eine besondere Bedeutung zur Erzielung substanzieller Kostenreduktionen zu. Zwar ermöglicht es eine zunehmende Präsenz der neuen Technik aufgrund der technologiespezifischen Förderung und exemplarischen Anwendung in einzelnen Teilmärkten den tatsächlichen Wert der Technologie und das potentielle Marktvolumen immer besser abzuschätzen. Allerdings stellt diese Vorgehensweise einen eher langwierigen Prozess dar.

Hauptschwierigkeit dabei ist, dass aufgrund der zunächst sehr kleinen Stückzahlen Investitionen in Produktionsanlagen nur sehr zögerlich erfolgen, da das Investitionsrisiko derzeit in der Regel (noch) als zu hoch angesehen wird. Ansatzpunkt für die aktive Unterstützung der Ausbildung neuer Zulieferstrukturen, die sich substanziell an der Produktentwicklung und Kostenreduktion beteiligen, bildet somit zum Beispiel die teilweise Übernahme ökonomischer Risiken in Verbindung mit der Investition in die Produktion von beispielsweise peripheren Systemkomponenten für stationäre Brennstoffzellen. Dies könnte in eine allgemeine Mittelstandsinitiative eingebettet erfolgen, da gerade aufgrund der relativ geringen Stückzahlen der Mittelstand hier eine besondere Rolle spielen wird.

1.1.4 Weitere Gesichtspunkte

Hinsichtlich aller möglichen Förderungen und unterstützenden Maßnahmen ist schließlich festzuhalten, dass eine eindeutige Festlegung auf eine bestimmte Anwendung für Brennstoffzellen bzw. auf eine bestimmte Brennstoffzellentechnologie nicht nur nicht möglich, sondern auch nicht zweckmäßig ist. Vielmehr profitiert die Brennstoffzellentechnologie von ihrer Diversität, die ihren Einsatz in praktisch allen energiewirtschaftlich relevanten Bereichen interessant erscheinen lässt mit jeweils anwendungsspezifischen Vor- und Nachteilen. Hinzu kommt, dass durch diese Diversität Synergieeffekte zwischen einzelnen Teilmärkten des Energiesystems möglich werden, die mittel- bis langfristig mit ökonomischen Vorteilen und weiteren Kostenreduktionspotenzialen verbunden sein können. Eine Vorfestlegung ist daher möglichst zu vermeiden. Letztendlich muss der Markt und damit die Anwendung selbst entscheiden, welche der Systeme sich in welchen Bereichen des Energiesystems durchsetzen.

1.2 Empfehlungen für weitergehende Untersuchungen

Wie die vorliegende Studie zeigt, kommt der ökonomischen Bewertung des in stationären Brennstoffzellenanlagen erzeugten Stroms eine besondere Bedeutung zu. Eine abschließende Beurteilung der durch eine verstärkte dezentrale Einspeisung elektrischer Energie vermiedenen Kosten bzw. eventuell auch erforderlichen Mehraufwendungen für den Netzbetrieb ist allerdings bislang noch nicht erfolgt und war im Rahmen der hier durchgeführten Betrachtungen auch nicht möglich. Die in der derzeitigen Fassung der Verbändevereinbarung getroffenen Regeln für die Vergütung dezentral eingespeisten Stroms spiegeln entsprechend nur bedingt dessen tatsächliche Auswirkungen wider. Neben Effekten auf die Netzlast insgesamt und damit die erforderlichen Netzdienstleistungen durch eine Vielzahl dezentraler Einheiten

sind hier vor allem netztechnische Fragestellungen zu analysieren hinsichtlich dem Netzan-schluss dezentraler Anlagen sowie der Netzauslegung und –sicherheit.

In diesem Zusammenhang ist auch die mögliche Vernetzung dezentraler Erzeugungseinheiten zu „verteilten Systemen“ bzw. „virtuellen Kraftwerken“ eine näher zu untersuchen-de Option. Vor allem hinsichtlich der aktiven Beteiligung dezentraler Einheiten an Netzdienstleistungen (Primär- und Sekundärregelung, Lastvergleichmäßigung) kann eine derarti-ge Poolbildung dezentraler Anlagen deutliche ökonomische Auswirkungen zeigen. Hierzu erforderlich wäre eine weitere Verfeinerung der in dieser Arbeit durchgeführten differenzier-ten Bedarfsanalyse. So wäre für die Industrie eine räumliche Differenzierung der Wärmebe-darfsstrukturen zu erarbeiten als Basis detaillierter Lastflussrechnungen hinsichtlich netz-technischer Fragen. Im Gebäudebereich wiederum wäre eine aktualisierte Datenbasis bezüg-lich der vorliegenden individuellen Lastprofile wünschenswert, da diese bei unterstellter wei-ter Verbreitung von Kleinstsystemen für die Kraft-Wärme-Kopplung ebenfalls signifikanten Einfluss auf den Netzbetrieb nehmen. Auf einer solchen Basis wäre für den Gebäudebereich auch eine weiterreichendere Einschätzung der zweckmäßigen Gestaltung der Strompreise und Vergütungssätze für eingespeiste elektrische Energie von Seiten der Versorger möglich.

Aus energiewirtschaftlicher Sicht ergeben sich schließlich noch offene Fragen hin-sichtlich der in Baden-Württemberg vorhandenen Potenziale alternativer Brennstoffe für sta-tionäre Brennstoffzellen, insbesondere bezüglich der Nutzung regenerativer Energieträger vor allem in Form von Biomasse und Biogas aber auch der Wasserstofferzeugung aus nicht fossilen Energien. Darüber hinaus wäre eine detaillierte Abschätzung der bestehenden Einsatzpotenziale stationärer Brennstoffzellen in den angesprochenen spezifischen Anwen-dungsnischen wünschenswert, um deren möglichen Einfluss auf die Markteinführung und zukünftige Entwicklung dieser Technologie besser einschätzen zu können.