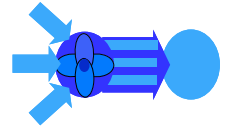


GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**SÖF**  **Sozial-  
ökologische  
Forschung**



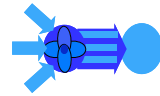
Jochen Markard

# **Innovationssystemanalyse Stationäre Brennstoffzellentechnologie**

Bericht für AP 510  
im Rahmen des BMBF-Projektes  
„Integrierte Mikrosysteme der Versorgung, Dynamik,  
Nachhaltigkeit und Gestaltung von Transformationsprozessen  
in netzgebundenen Versorgungssystemen“

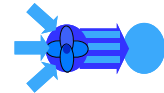
Dübendorf  
Oktober 2006

Cirus - Innovation Research in Utility Sectors  
Eawag  
Überlandstraße 133  
CH-8600 Dübendorf



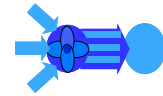
## **Übersicht**

Stationäre Brennstoffzellen zur Erzeugung von Strom und Wärme haben in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Zahlreiche Forschungseinrichtungen, Hersteller, Zulieferer, Energieversorgungsunternehmen und auch politische Akteure haben sich mit der Technologie intensiv befasst bzw. deren Entwicklung gefördert. Ziel dieser Studie ist es, das technologische Innovationssystem, das sich in Deutschland um stationäre Brennstoffzelle herum entwickelt hat, darzustellen und hinsichtlich seiner zukünftigen Entwicklungsoptionen zu analysieren. In einem ersten Schritt, der Basisanalyse, referiert die Studie den Entwicklungsstand der Innovation und identifiziert die involvierten Akteure, Institutionen und Netzwerke mit Fokus auf Deutschland. In der anschließenden Umfeldanalyse wird untersucht, welche Faktoren und Prozesse außerhalb des Innovationssystems, die technologische Entwicklung beeinflussen. Hierzu zählen exogenen Faktoren wie etwa Energiepreise (Landschaftsebene), die Wirkung bestehender sozio-technischer Regime im Bereich der Strom- und Wärmeversorgung sowie komplementäre und konkurrierende Innovationsprozesse. In einem dritten Schritt, Variationsanalyse genannt, werden die zukünftigen Entwicklungsspielräume in technischer und organisatorischer Hinsicht analysiert. Dabei geht es unter anderem um die Frage, ob bestimmte Akteure bzw. Akteurgruppen für die Entwicklung bestimmter Anwendungsbereichen bzw. Marktnischen eher in Frage kommen als andere. Der vierte Schritt, die Szenarioanalyse, stellt dar, welche Visionen und Zukunftserwartungen mit der stationären Brennstoffzelle verbunden sind. Darüber hinaus werden für das Jahr 2020 vier Szenarien auf der Makroebene (Umfeld) und der Mikroebene (Innovationssystem) ausgearbeitet. Die Transitionsanalyse entwirft und diskutiert schließlich potenzielle Entwicklungspfade und Einflussfaktoren von der heutigen Situation hin zu den vier Szenario-Endpunkten.



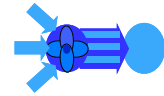
## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Theoretischer Hintergrund der Untersuchung.....	3
3	Basisanalyse .....	4
3.1	Funktion und Typen von Brennstoffzellen .....	5
3.2	Innovationseigenschaften .....	6
3.3	Verbreitung, Marktnischen und Entwicklungstrends.....	8
3.4	Akteure und Innovationsnetzwerke.....	13
3.5	Institutionelle Rahmenbedingungen .....	16
3.6	Innovationssystem stationäre Brennstoffzelle .....	20
4	Umfeldanalyse.....	21
4.1	Landschaftsanalyse .....	22
4.2	Regimeanalyse .....	24
4.3	Regimeveränderungen .....	26
4.4	Komplementäre Innovationen.....	28
4.5	Konkurrierende Innovationen.....	29
5	Variationsanalyse .....	30
5.1	Sozio-technische Variation: Anwendungsbereiche.....	30
5.2	Organisatorische Variation: Rollenmodelle.....	35
5.3	Zusammenhänge zwischen Anwendungsbereichen und Rollenmodellen .....	40
6	Szenarioanalyse.....	42
6.1	Visionen .....	42
6.2	Vorherrschende Erwartungen .....	43
6.3	Makro-Szenarien: Veränderungen auf der Regime-Ebene .....	45
6.4	Mikro-Szenarien: Veränderungen im Innovationssystem stationäre Brennstoffzellen.....	49
7	Transformationsanalyse .....	54
7.1	Einflussfaktoren und ihre Wirkung auf das Innovationssystem .....	54
7.2	Entwicklungspfade und Realisierungsbedingungen .....	58
8	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	62
8.1	Unternehmensebene .....	62
8.2	Politikebene.....	63
8.3	Ausblick und weiterer Untersuchungsbedarf .....	65
9	Literatur .....	67



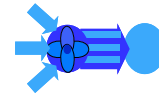
## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1:	Anzahl der weltweit produzierten stationären Brennstoffzellen im Leistungsbereich 0.5-10kW (Quelle: Adamson & Jollie 2004) .....	9
Abbildung 2:	Anteile von Organisationen mit unterschiedlichen Aufgabenbereichen (Geiger 2003).....	10
Abbildung 3:	Hauptakteure und deren zentrale Aufgaben im Bereich stationäre Brennstoffzellen .....	13
Abbildung 4:	Förderung von Wasserstoff und Brennstoffzellen im Vergleich (Weider <i>et al.</i> 2003) .....	17
Abbildung 5:	Basisdimensionen und sozio-technische Varianten im Überblick .....	31
Abbildung 6:	Charakteristika des Anwendungsbereichs USV .....	31
Abbildung 7:	Charakteristika des Anwendungsbereichs Mikro-KWK .....	33
Abbildung 8:	Charakteristika des Anwendungsbereichs Mini-KWK .....	34
Abbildung 9:	Charakteristika des Anwendungsbereichs Kraftwerke .....	35
Abbildung 10:	Rollenmodelle Strom- und Wärmemarkt sowie ihre Kombination im Fall stationärer Brennstoffzellen .....	36
Abbildung 11:	Mögliche Veränderungen infolge einer Übertragung des Rollenmodells 'Strommarkt' auf die Brennstoffzelle .....	38
Abbildung 12:	Mögliche Veränderungen infolge einer Übertragung des Rollenmodells 'Wärmemarkt' auf die Brennstoffzelle .....	39
Abbildung 13:	Marktanteile verschiedener Technologien im Wärmemarkt, Szenario A (2025).....	50
Abbildung 14:	Marktanteile verschiedener Technologien im Wärmemarkt, Szenario B (2025).....	51
Abbildung 15:	Marktanteile verschiedener Technologien im Wärmemarkt, Szenario C (2025).....	52
Abbildung 16:	Grafische Darstellung von Entwicklungspfaden und Einflussfaktoren .....	61
Abbildung 17:	Set von Fördermaßnahmen und deren zeitliche Phasierung .....	65



## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Kennzahlen der vier häufigsten Brennstoffzellen-Typen für den stationären Betrieb.....	6
Tabelle 2:	Verfügbarkeit von BZ-Typen für unterschiedliche Leistungsklassen .....	12
Tabelle 3:	Laufende Wasserstoff- und Brennstoffzellenprojekte mit Unterstützung verschiedener Ministerien (Bezugszeitraum 2004/05) .....	18
Tabelle 4:	Vergleich der Auswirkung verschiedener Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Anwendungsbereiche.....	35
Tabelle 5:	Vergleich der Wirkung unterschiedlicher Faktoren auf die Realisierung der Rollenmodelle .....	40
Tabelle 6:	Zusammenhänge zwischen technischer und organisatorischer Variation .....	41
Tabelle 7:	Qualitative Abschätzung der Veränderungen auf der Regimeebene.....	48
Tabelle 8:	Entwicklung der vier Marktnischen für stationäre Brennstoffzellen in Abhängigkeit von Szenario A-D.....	53
Tabelle 9:	Pfadbestimmende Einflussfaktoren auf den Innovationsprozess stationärer BZ .....	55
Tabelle 10:	Kurzportraits von Fördermaßnahmen für stationäre Brennstoffzellen .....	64



## **1 Einleitung**

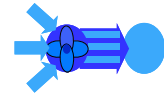
Die Brennstoffzelle ist eine High-Tech-Innovation zur effizienten Energieumwandlung, die in den letzten Jahren vor allem in der Automobilindustrie, aber auch auf dem Gebiet der Strom- und Wärmeversorgung das Interesse zahlreicher Firmen, Kunden, Forschungseinrichtungen und politischer Institutionen auf sich gezogen hat. Hauptgrund hierfür sind hohe Potenziale hinsichtlich der technischen Leistungsfähigkeit und viel versprechende Umwelteigenschaften. Eine besondere Aufmerksamkeit kommt den Brennstoffzellen aber auch deswegen zu, weil ihre Verbreitung sowohl im Bereich der Fahrzeugantriebe als auch in der Energieversorgung mit weit reichenden Veränderungen einhergehen würde.

Im Allgemeinen unterscheidet man drei Anwendungsfelder, in denen Brennstoffzellen zurzeit erprobt werden: den stationären Einsatz zur dezentralen Energieversorgung von Gebäuden, Betrieben und sonstigen Einrichtungen, den mobilen Einsatz zum Antrieb von Fahrzeugen sowie portable Anwendungen, zu denen etwa die Stromversorgung von Laptops zählt. Darüber hinaus gibt es in der Raumfahrt und im militärischen Bereich zahlreiche Spezialanwendungen für Brennstoffzellen.

Die nachfolgende Untersuchung ist auf Brennstoffzellen (BZ) im stationären Einsatz beschränkt und konzentriert sich zudem auf die Entwicklungen in Deutschland, dem Land mit den weitaus umfangreichsten Innovationsaktivitäten im Bereich Brennstoffzelle in Europa. Der Leistungsbereich stationärer Brennstoffzellen reicht von einzelnen Geräten mit 0,5 kW maximaler elektrischer Ausgangsleistung bis hin zu Großanlagen mit mehreren Modulen, die derzeit Gesamtleistungen über ein Megawatt erreichen. Stationäre Brennstoffzellen befinden sich in einer frühen Entwicklungsphase, d.h. es gibt eine Vielzahl technischer Varianten, die in Pilotprojekten und Feldtests erprobt werden. Sowohl von ihrer Lebensdauer als auch von den Kosten her sind die meisten Anlagen noch ein gutes Stück von einer breiten Markteinführung entfernt.

Innovationsprozesse sind grundsätzlich durch große Unsicherheiten gekennzeichnet, d.h. zukünftige Entwicklungen sind meist schwer prognostizierbar. Das gilt insbesondere für radikale Innovationen und Technologien in einem frühen Entwicklungsstadium. Auf dem Gebiet der Stromversorgung stellt die Brennstoffzelle eine radikale Innovation dar, weil sie nicht nur auf einer völlig neuen Umwandlungstechnologie beruht, sondern dezentral und verbrauchsnahe in Form kleiner Anlagen eingesetzt wird. Dies steht in einem deutlichen Gegensatz zur konventionellen Stromerzeugung in zentralen Großkraftwerken. Dementsprechend stehen der Entwicklung und Diffusion von stationären Brennstoffzellen hohe Hemmnisse in Form etablierter Technologien, Standards und Strukturen entgegen (Markard & Truffer submitted). In der Stromversorgung aber auch im Wärme- und Gassektor haben sich technologische Regimes gebildet, die die weitere Entwicklung stark beeinflussen und radikalen Veränderungen entgegenwirken.

Vor diesem Hintergrund ist es für Forschungseinrichtungen, Brennstoffzellenhersteller, politische Akteure, zukünftige Nutzer sowie für die in Vertrieb und Anwendung aktiven Unternehmen von zentraler Bedeutung, die mit der Brennstoffzellentechnologie



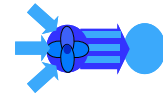
verbundenen Herausforderungen möglichst umfassend zu analysieren und zu bewerten.

Das Ziel der nachfolgenden Innovationssystemanalyse (ISA) ist es, hier einen Beitrag zu leisten und ein umfassendes Bild vom derzeitigen Entwicklungsstand und den zukünftigen Optionen zu entwerfen. Dabei sollen potenzielle Entwicklungspfade und Szenarien analysiert und zentrale Einflussfaktoren identifiziert werden. Die Analyse soll letztlich als eine Grundlage für die Entwicklung unternehmerischer und politischer Strategien auf dem Gebiet der stationären Brennstoffzellentechnologie dienen.

Die ISA gliedert sich in fünf Schritte: die Basisanalyse, die Umfeldanalyse, die Variationsanalyse, die Szenarioanalyse und die Transitionsanalyse. Die Basisanalyse gibt den heutigen Stand der technologischen und wirtschaftlichen Entwicklung, der beteiligten Akteure und Innovationsnetzwerke sowie der institutionellen Rahmenbedingungen wieder. In einem zweiten Schritt wird das Umfeld der betreffenden Innovation untersucht. Dies umfasst allgemeine Entwicklungen auf der sog. Landschaftsebene, eine Analyse der bestehenden technischen Regime sowie die Betrachtung von komplementären und konkurrierenden Innovationen. Die Variationsanalyse zeigt anschließend die Entwicklungsspielräume in technischer und organisatorischer Hinsicht auf und untersucht, ob bestimmte Akteure bzw. Akteurgruppen für die Entwicklung bestimmter Anwendungsbereichen bzw. Marktnischen eher in Frage kommen als andere. In der Szenarioanalyse werden verschiedene Zukunftsoptionen konkret ausgearbeitet und einander gegenübergestellt. Dabei wird sowohl die Nischen- als auch die Regimeebene betrachtet. Die Transitionsanalyse beschäftigt sich schließlich mit der Frage, wie mögliche Entwicklungspfade in Richtung der potenziellen Anwendungsbereiche aussehen könnten und welche Faktoren maßgeblich sind, damit der eine oder ein anderer Pfad beschritten wird.

Eine Innovationssystemanalyse kann grundsätzlich autonom durchgeführt werden. Im vorliegenden Fall ist sie jedoch Teil einer umfassenderen Methodik (Sustainability Foresight) zur Untersuchung der langfristigen Transformation von Versorgungssektoren und zur Entwicklung nachhaltigerer Strukturen (Voß *et al.* 2006b). Diese Methodik wird im Rahmen des vom BmBF geförderten Projektes „Integrierte Mikrosysteme der Versorgung“ (IMV) entwickelt und auf die vier Sektoren Strom-, Gas- und Wasserversorgung sowie Telekommunikation angewendet. Ziel des IMV-Projektes ist es, gemeinsam mit Partnern aus der Praxis mögliche zukünftige Entwicklungspfade der Versorgungssysteme und die damit verbundenen wirtschaftlichen, politischen, technischen, sozialen und ökologischen Herausforderungen zu identifizieren, um die Entwicklung nachhaltiger Handlungsstrategien zu ermöglichen ([www.mikrosysteme.org](http://www.mikrosysteme.org)).

Die ISA stellt eine Weiterentwicklung von bestehenden Konzepten zur Untersuchung von Innovationen dar. So wurde etwa im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Universität Oslo ein mehrstufiges Verfahren vorgeschlagen, mit dem radikale Innovationen analysiert und Aktionen zur Förderung und Markteinführung abgeleitet werden können (Hofman 2003, 53). Dabei wird insbesondere auf die Bedeutung der Integration in die bestehenden Strukturen oder vielmehr auf die Notwendigkeit einer Veränderung derselben hingewiesen. Das Verfahren basiert auf 6 Schritten, die man etwa wie folgt



in Schlagworte fassen kann: Innovationsfeldanalyse, Regimeanalyse, Regimevorschau, Regimevergleich, Einflussfaktoranalyse, Aktionsplan.

Ähnliche Ideen und Komponenten finden sich in einer Studie des IÖW, Berlin zu den Diffusionsbedingungen von Brennstoffzellen (Hirschl & Hoffmann 2003). Diese Studie verfolgt das Ziel, Forschungsbedürfnisse zu identifizieren, d.h. sie strukturiert das Innovationsfeld (Basisanalyse, Akteure & Strategien, Zielgruppen & Akzeptanz, politische Instrumente, Bewertungen, Szenarien, Bildung), aber es werden nicht die eigentlichen Analysen durchgeführt.

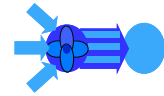
## 2 Theoretischer Hintergrund der Untersuchung

Die Innovationssystemanalyse basiert im Wesentlichen auf dem Gedankengut der evolutionären Ökonomie und der Techniksoziologie. Zentral für die vorliegende Studie ist insbesondere der Begriff des Innovationssystems. Das Innovationssystem wird als Set von Akteuren, Institutionen und deren Beziehungen zueinander aufgefasst, die die Entwicklung und Verbreitung eines bestimmten Produkts voranbringen (vgl. Carlsson *et al.* 2002, Carlsson & Stankiewicz 1991). Zu den Akteuren gehören typischerweise zahlreiche Unternehmen, die unterschiedliche Rollen im Innovationsprozess spielen, aber auch Kunden, Forschungsinstitute, Kapitalgeber, Interessenverbände, Agenturen, Regierungsbehörden etc. Als Institutionen werden gesetzliche Regelungen und Vorschriften, technische und soziale Normen sowie Programme zur Finanzierung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten bezeichnet. Mitunter wird der Begriff der Institutionen auch weiter gefasst, z. B. wenn der Einfluss von Kapitalmärkten oder von bestimmten Elementen des Bildungssystems auf den Innovationsprozess betrachtet wird. Unter Beziehungen versteht man schließlich verschiedene Arten und Kanäle der Interaktion von Akteuren und Institutionen (vertragliche Beziehungen, verschiedene Formen der Kooperation, gesetzliche Bindungen, Kommunikationskanäle, allgemeine Wirkungen bzw. Wechselwirkungen etc.).

Das Innovationssystem-Konzept hat den Vorteil, dass es der Komplexität von Innovationsprozessen gerecht wird und zugleich eine differenzierte Analyse von Akteuren (einschließlich deren Rollen und Strategien), Institutionen und Netzwerken ermöglicht. Die produkt- bzw. technologieorientierte Betrachtung erlaubt darüber hinaus eine Konzentration auf spezifische Innovationen, wobei die Abgrenzung bzw. Definition des Innovationssystems gleichzeitig flexibel vorgenommen werden kann in Abhängigkeit der Untersuchungsziele.

Ebenfalls kennzeichnend für die nachfolgende Analyse ist die Unterscheidung verschiedener Ebenen (vgl. u.a. Geels 2002). Dabei werden Entwicklungen in Nischen (Mikroebene), in sozio-technischen Regimes (Mesoebene) und auf der Ebene Landschaft (Makroebene) sowie deren Wechselwirkungen betrachtet.

Die Nische ist ein geschützter Raum, in dem Experimente und Lernprozesse mit Technologien oder Produkten ablaufen können, die noch in einem frühen Entwicklungsstadium stehen und daher den etablierten Technologien unterlegen sind (vgl.



Hoogma *et al.* 2002). Man spricht von einer *technologischen Nische*<sup>1</sup>, wenn die Innovation aufgrund bestimmter Rahmenbedingungen eingesetzt wird - etwa wenn ein Unternehmen oder staatliche Stellen Mittel für Pilot- und Demonstrationsprojekte bereitstellen. Demgegenüber ist eine *Marktnische* dadurch gekennzeichnet, dass es spezielle Anwendungen gibt, in denen die Innovation bereits mit etablierten Technologien konkurrieren kann.

Sozio-technische Regimes sind bestehende Strukturen, die auf Innovationen wirken, indem sie kleine, kontinuierliche Verbesserungen etablierter Technologien fördern und die Entwicklung von grundsätzlich neuen bzw. radikalen Technologien behindern. Regimes setzen sich zusammen aus zahlreichen Komponenten, zu denen u. a. der Wissensbestand, vorherrschende Lehrmeinungen und Überzeugungen, technische und soziale Normen, Erwartungen und Institutionen gehören (z.B. van den Ende & Kemp 1999). Im Fall der Stromversorgung kann man beispielsweise vom Regime der zentralen Elektrizitätszeugung sprechen (vgl. 4.2).

Innovative, nicht regimekompatible Technologien können am ehesten dort ihre Stärken ausspielen, wo das vorherrschende Regime Schwächen hat - im Fall der Stromerzeugung etwa bei der Versorgung entlegener Verbrauchsstellen außerhalb des bestehenden Netzes oder bei einem Ausfall der herkömmlichen Versorgung. An den Punkten, an denen Schwächen des dominanten Regimes und Stärken der alternativen Technologien aufeinander treffen, können sich Marktnischen bilden. Wenn sich dort dann eine Innovation deutlich weiter entwickelt und verbessert, kann dies dazu führen, dass sich das dominante Regime verändert (anpasst) oder dass sich nach und nach ein neues, konkurrierendes Regime entwickelt, welches das „alte“ (partiell oder vollständig) substituiert.

Auf der Landschaftsebene werden schließlich übergreifende Ereignisse und Entwicklungen betrachtet, die nicht alleine von einem sozio-technischen Regime abhängig sind. Hierzu zählen etwa konjunkturelle Einflüsse, demographische Trends oder die Entwicklung von Energiepreisen. Einflüsse seitens der Landschaftsebene wirken sowohl auf die Regime- als auch auf die Nischenebene, werden ihrerseits aber nur mittel- bis langfristig durch Innovationsprozesse beeinflusst.

In der Gesamtschau können die Landschaft und auch die Regimes als Umfeld des Innovationssystems betrachtet werden, welches seinerseits wiederum eine oder mehrere Nischen umfassen kann.

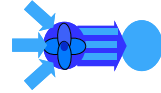
### 3 Basisanalyse

Die Basisanalyse dient der Identifizierung der wesentlichen Merkmale des betreffenden Innovationssystems.<sup>2</sup> Dazu gehört, dass die zu untersuchende Innovation zunächst definiert und in ihrer Funktion beschrieben wird und ihre Innovationseigenschaften

---

<sup>1</sup> Im Folgenden sprechen wir hier auch allgemeiner von 'Anwendungsbereichen'.

<sup>2</sup> Im Grunde ermöglicht die Basisanalyse überhaupt erst festzulegen, was genau anschließend als Innovationssystem bezeichnet wird und damit den Kern der Untersuchung darstellt.



dargestellt werden. Die Basisanalyse erfasst neben dem Stand der technologischen Entwicklung auch die derzeitige Verbreitung der Innovation und die Marktentwicklung, sofern vorhanden. Darüber hinaus werden die involvierten Akteure, bestehende Innovationsnetzwerke sowie die institutionellen Rahmenbedingungen betrachtet.

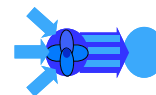
### 3.1 Funktion und Typen von Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind Geräte, die die in einem Brennstoff (z.B. Wasserstoff, Erdgas, Methanol) gespeicherte Energie auf chemischem Weg in Elektrizität und Wärme umwandeln. Das Kernelement einer Brennstoffzelle ist ein ionenleitendes Material, der Elektrolyt, der zwischen zwei Elektroden eingebettet ist. Im Betrieb wird der Anode Wasserstoff zugeführt und dort durch einen Katalysator (z.B. Platin) in Protonen und Elektronen aufgespaltet. Die Elektronen fließen durch einen externen Widerstand als Strom'verbraucher', während die Protonen den Elektrolyten durchdringen und sich an der Kathode mit den Elektronen und von außen zugeführtem Sauerstoff zu Wasser verbinden (vgl. etwa Joon 1998, Carrette *et al.* 2001). Als Abgase bilden sich in Abhängigkeit des Brennstoffzellentyps und des eingesetzten Brennstoffs vor allem Wasserdampf, Kohlendioxid, Schwefeloxide und Kohlenwasserstoffe.

Bei den Brennstoffzellen lassen sich verschiedene Technologietypen unterscheiden in Abhängigkeit der als Elektrolyt eingesetzten Materialien. Je nach Elektrolyt variieren die Betriebstemperatur, die eingesetzten Katalysatormaterialien, die Anforderungen an die Reinheit des Wasserstoffs, die Lebensdauer aber auch Kosten und mögliche Anwendungen. Die technischen und ökonomischen Eigenschaften der vier häufigsten Brennstoffzellentypen für die stationäre Stromerzeugung sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Man unterscheidet generell Niedertemperatur-Brennstoffzellen (PEMFC und PAFC) und Hochtemperatur-Brennstoffzellen (MCFC bzw. DFC und SOFC). Niedertemperatur-Brennstoffzellen sind schneller betriebsbereit als Hochtemperaturzellen, stellen jedoch hohe Anforderungen an die Reinheit des Brennstoffes. Sie benötigen einen externen Reformer, in dem das Erdgas so aufbereitet wird, dass es der Brennstoffzelle in Form von hochreinem Wasserstoff zugeführt werden kann. Niedertemperaturzellen haben daher geringere elektrische Gesamtwirkungsgrade. Aufgrund des geringen Temperaturniveaus ist zudem die Verwendung der Wärme auf das Heizen von Räumen beschränkt.

Hochtemperatur-Brennstoffzellen stellen geringere Anforderungen an den Brennstoff und die Trennung des Wasserstoffs findet direkt in der Zelle statt (internal reforming process, vgl. Joon 1998). Sie erlauben eine Nutzung der Wärme in industriellen Prozessen und erreichen insbesondere dann wesentlich höhere Stromwirkungsgrade, wenn die Abwärme in einer nachgeschalteten Turbine ebenfalls zur Stromerzeugung genutzt wird. Bei solchen Technologie-Kombination besteht die Erwartung, mit Anlagen im Megawattbereich mittelfristig Stromwirkungsgrade von 70-80% zu erreichen (Baker & Adamson 2005).


**Tabelle 1: Kennzahlen der vier häufigsten Brennstoffzellen-Typen für den stationären Betrieb**

	<b>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell PEMFC</b>	<b>Phosphoric Acid Fuel Cell PAFC</b>	<b>Molten Carbonate Fuel Cell MCFC</b>	<b>Solid Oxide Fuel Cell SOFC</b>
Betriebstemperatur <sup>1)</sup>	60 – 80°C	160 – 220°C	620 – 660°C	800 – 1000°C
Wirkungsgrad elektr. <sup>1)</sup>	≤40%	≤40% <sup>2)</sup>	bis zu 65% <sup>2)</sup>	bis zu 70% <sup>2)</sup>
Brennstoff <sup>1)</sup>	Erdgas oder Methanol (reformiert), Wasserstoff	Erdgas oder Kohlegas (reformiert), Wasserstoff	Erdgas, Kohlegas, Wasserstoff	Erdgas, Kohlegas, Methan, Wasserstoff
Entwicklungsstatus <sup>1)</sup>	Demonstrationsanlagen	Kommerzielle Anlagen (mehr als 270 verkauft)	Demonstrationsanlagen	Demonstrationsanlagen, Feldtests
Heute realisierte Leistungsgrößen <sup>3)</sup>	1-10, 50, 65, 150 kW <sub>el</sub>	1, 40, 100, 200 kW <sub>el</sub>	40, 100-500 kW <sub>el</sub> , 1-3 MW <sub>el</sub>	1-10, 80, 100-200, 350 kW <sub>el</sub>
Lebensdauer Zellstapel <sup>4)</sup>	5 - 10.000 h	20 - 50.000 h	ca. 40.000 h	5 - 10.000 h
Besonderheiten	empfindlich gegenüber Kohlenmonoxid	empfindlich gegenüber Kohlenmonoxid		
Realisierte Anwendungen bzw. Potenziale	Mehrfamilienhäuser, Nahwärmenetze, Gewerbebetriebe	Nahwärmenetze, Gewerbe und Industrie	Gewerbe und Industrie	Haushalte und Gewerbe
Hersteller (Auswahl) <sup>5)</sup>	Ballard, Plug Power / Vaillant, Denora, Dais-Analytic, Idatech, Toshiba / UTC	UTC Fuel Cells (früher: IFC / ONSI), Toshiba, Fuji	MTU / FCE, Hitachi, Mitsubishi, MC-Power	Siemens Westinghouse, Sulzer Hexis, Mitsubishi, Honeywell
Herstellungskosten <sup>6)</sup>	2-5.000 €/kW Ziel: 500€/kW	3.000 €/kW Ziel: 1.500-2.000 €/kW	5-10.000 €/kW	10-30.000 €/kW Ziel: 1.500 €/kW

<sup>1)</sup> Daten nach George & Hassmann 2001, andere Autoren nennen z. T. abweichende Daten bzgl. Temperatur oder Wirkungsgrad. Charakteristisch für den jeweiligen BZ-Typ ist der elektrische Wirkungsgrad; der Gesamtwirkungsgrad der Anlagen ist auch von der konkreten Anwendung (Konfiguration Gesamtsystem, Betriebsmodus etc.) abhängig. Er liegt im Allgemeinen zwischen 80 und 90%.

<sup>2)</sup> Mit zunehmender Betriebsdauer sinkt der Wirkungsgrad sowohl bei der PAFC als auch bei der MCFC ab. Der elektrische Wirkungsgrad einer PAFC kann bis zu 47% erreichen, wenn sie unter Druck betrieben wird. Die hohen Wirkungsgrade der MCFC und SOFC können in einem kombinierten Einsatz mit Gas- und Dampfturbinen in größeren Anlagen erreicht werden (Joon 1998).

<sup>3)</sup> Baker & Adamson 2005

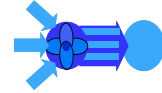
<sup>4)</sup> Vgl. Baker & Jollie 2004 und Baker & Adamson 2005. Peripherie-Komponenten haben meist eine deutlich längere Lebensdauer. Die Zielwerte für einen kommerziellen Einsatz der Zellstapel liegen in der Regel zwischen 50 und 80 Tsd. Stunden.

<sup>5)</sup> Siehe auch Tabelle der Brennstoffzellen-Hersteller im Anhang

<sup>6)</sup> Herstellerangaben und Kosten von Pilotanlagen

### 3.2 Innovationseigenschaften

Konventionelle Stromerzeugungstechnologien wie etwa Gasturbinen oder Gasmotoren wandeln die im Erdgas enthaltene chemische Energie zunächst in Bewegungsenergie und anschließend in elektrische Energie um. Brennstoffzellen basieren demgegenüber auf einer direkten Umwandlung der chemischen Primärenergie in Elektrizität, wodurch sich verschiedene Vorteile, aber auch einige Nachteile im Vergleich zu konventionellen Technologien ergeben. Positive und negative Merkmale bilden zusammen ein Set von Innovationseigenschaften, mit dem zugleich das Verhältnis zwischen Innovation und



etablierten Technologien bzw. technologischen Regimes<sup>3</sup> beleuchtet wird. Dementsprechend haben die Innovationseigenschaften einen entscheidenden Einfluss auf künftige Anwendungen und die entsprechenden Entwicklungspfade der Technologie. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Innovationseigenschaften fortlaufend verändern, da die technische Weiterentwicklung darauf abzielt, die Vorteile weiter auszubauen und die Nachteile zu verringern.

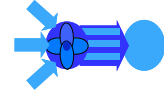
Zu den positiven Eigenschaften von Brennstoffzellen gehört, dass sie keine bewegten Maschinenteile haben und daher in mechanischer Hinsicht verschleiß- und wartungsarm sowie leise im Betrieb sind. Werden Brennstoffzellen zur gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt (Kraft-Wärme-Kopplung, KWK), so erreichen sie einen Gesamtwirkungsgrad, der dem von konventionellen KWK-Anlagen entspricht. Bei einer Optimierung rein auf die Stromerzeugung können Hochtemperatur-BZ einen elektrischen Wirkungsgrad erzielen, der vergleichbar ist mit dem moderner GuD-Kraftwerke (>50%). Niedertemperatur-BZ sind vom maximalen elektrischen Wirkungsgrad her vergleichbar mit modernen Dampfkraftwerken (>40%).<sup>4</sup> Ein wichtiger Vorteil der BZ ist, dass hohe elektrische Wirkungsgrade auch in sehr kleinen Einheiten und auch im Teillastbetrieb realisierbar sind, was bei den konventionellen Kraftwerkstechnologien oft nicht der Fall ist. Brennstoffzellen können darüber hinaus modular konstruiert und dementsprechend in einer großen Leistungsbandbreite eingesetzt werden. Damit stellen Brennstoffzellen eine Schlüsseltechnologie zur dezentralen Energieversorgung von Gebäuden dar. In ökologischer Hinsicht liegt schließlich ihr Vorteil vor allem in einem extrem niedrigen Stickoxid- und Kohlenmonoxidausstoß im Vergleich zu konventionellen Technologien (Bauen & Hart 2000).

Brennstoffzellen befinden sich heute in einer frühen technologischen Entwicklungsphase am Übergang von Laboranlagen zu Geräten, die im Rahmen von Pilotversuchen und Feldtests in der Praxis eingesetzt werden. Dementsprechend groß ist die Zahl der „Kinderkrankheiten“ und Herausforderungen, die einer weiteren Verbreitung noch im Wege stehen. Zu den größten Herausforderungen zählen derzeit insbesondere die Herstellungskosten, die im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken zum Teil noch um eine Größenordnung höher liegen. Darüber hinaus stellen BZ erhebliche Anforderungen an die Materialien (vor allem im Hochtemperaturbereich) und haben aufgrund der Degradation der Elektrolyten bislang nur eine sehr begrenzte Lebensdauer (Joon 1998). Für den stationären Betrieb geht man davon aus, dass der Brennstoffzellen-Stack kommerzieller Anlagen eine Lebensdauer von mindestens 40.000 Stunden erreichen muss (Carrette *et al.* 2001, 31). Brennstoffzellen sind vom Aufbau her komplex und haben den Charakter einer Hochtechnologie, d.h. für die Herstellung der einzelnen Komponenten sind zahlreiche weitere, anspruchsvolle Technologien erforderlich.

---

<sup>3</sup> Vgl. hierzu auch Abschnitt 4.2.

<sup>4</sup> Diese Aussagen gelten nur für stromoptimierte BZ-Anlagen. Heute sind viele stationäre BZ im KWK-Betrieb eingesetzt. In diesem Fall liegt der elektrische Wirkungsgrad um oder unter 30% bei kleinen Geräten und um oder über 40% bei Anlagen in der Leistungsklasse 200-250 kW.



Die Brennstoffzelle repräsentiert eine *radikale Innovation*, da sich das Prinzip der Energieumwandlung grundlegend von den bislang vorherrschenden Verbrennungsverfahren unterscheidet. Dies gilt für den Bereich der Stromversorgung wie für den Wärmemarkt. Im Stromsektor kommt jedoch noch eine zweite radikale Veränderung hinzu, weil man Brennstoffzellen in der Regel dezentral am Ort des Energiebedarfs einsetzt und damit gleichzeitig Strom- und Wärmeproduktion ausnutzt. Die dezentrale Stromproduktion unterscheidet sich grundlegend vom vorherrschenden technologischen Regime in der Stromversorgung, das u. a. von zentralen Großkraftwerken, einer entsprechenden Netztopologie und dem Bild vom „Strom aus der Steckdose“, mit dessen Erzeugung die Endverbraucher nichts zu tun hat, geprägt ist (vgl. hierzu ausführlich Abschnitt 4.1). Mit einer weit reichenden Diffusion von Brennstoffzellen wäre demgegenüber ein alternatives System der Stromversorgung verbunden: ein Netzwerk mit einer Vielzahl kleiner Stromerzeugungsanlagen, deren Betrieb so koordiniert und auf den Energiebedarf abgestimmt ist, dass sie als virtuelle Kraftwerke ähnlich funktionieren würden wie konventionelle Großkraftwerke (s. auch Abschnitte 4.4 und 6.1).

### **3.3 Verbreitung, Marktnischen und Entwicklungstrends**

Generell befindet sich die Diffusion von Brennstoffzellen in einer frühen Phase, die von einzelnen Pionierkunden (early adoptors) geprägt ist. Hinsichtlich der technologischen Entwicklung haben die meisten BZ-Typen das Stadium von Pilot- und Demonstrationsanlagen erreicht. Zum Teil werden auch bereits kleinere Vorserien produziert. Einzig die PAFC-Technologie (vgl. Tabelle 1) ist im stationären Bereich seit mehr als 10 Jahren kommerziell am Markt verfügbar und vergleichsweise ausgereift. Obwohl weltweit heute einige hundert PAFC-Anlagen installiert sind, sind diese bislang nicht konkurrenzfähig mit konventionellen (motorbetriebenen) dezentralen Blockheizkraftwerken (BHKWs).

#### *Internationale Verbreitung stationärer Brennstoffzellen*

Weltweit waren Ende 2004 etwa 2400 kleine<sup>5</sup> und knapp 700 große<sup>6</sup> Brennstoffzellen im stationären Einsatz (Adamson & Jollie 2004/Baker & Jollie 2004). Bei kleinen BZ waren in den vergangenen Jahren jeweils hohe Steigerungsraten von bis zu 100% zu verzeichnen. 2004 gab es erstmals einen Rückgang von 25% auf 600 neu installierte Einheiten (vgl. Abbildung 1 sowie nachstehendes Zitat).

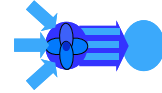
#### **David Jollie, Editor of Fuel Cell Today, 16.12.2004**

“In 2003, we were able to report on a year of good progress in the fuel cell industry. 2004 has been perhaps more difficult. On the positive side, we have seen a very helpful political environment. Climate change, energy security and "green" issues in general have all been on politicians' agendas and there has been high level interest in Europe, Japan, Korea, North America and elsewhere. However, the market growth, at least in commercial terms has been slower than might have been hoped with relatively few new products or even limited releases.”

---

<sup>5</sup> Leistungsbereich von 0,5 bis 10 kW

<sup>6</sup> Leistungsbereich größer 10 kW



Der Nachfragerückgang bei den kleinen Brennstoffzellengeräten wird vor allem auf zwei Faktoren zurückgeführt. Zum einen haben verschiedene Hersteller eine „neue Generation“ von Geräten in 2005 angekündigt, so dass potenzielle Adoptoren ihre Investitionen noch zurückhalten und zum anderen sind in Japan zwei größere, staatliche Förderprogramme ausgelaufen, die erst in 2005 wieder in eine neue Runde gehen (Adamson & Jollie 2004).

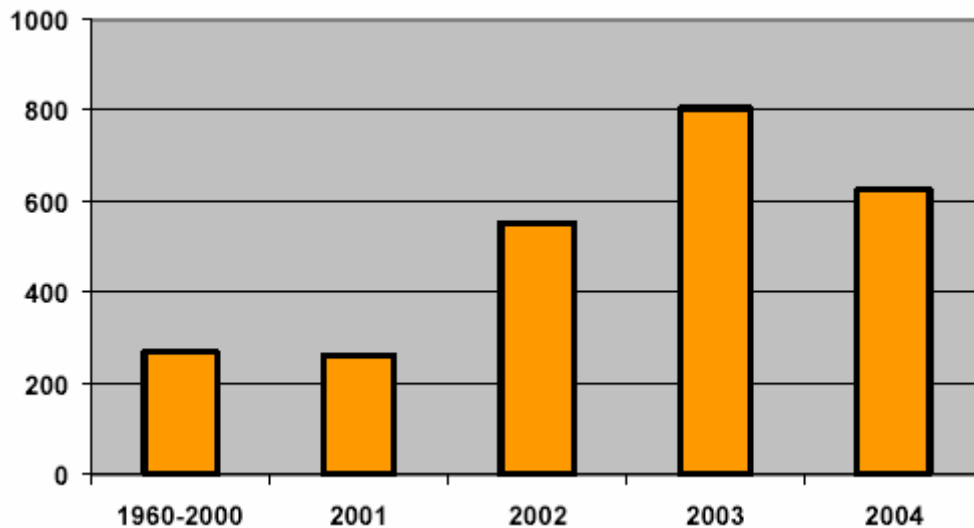


Abbildung 1: Anzahl der weltweit produzierten stationären Brennstoffzellen im Leistungsbereich 0.5-10kW (Quelle: Adamson & Jollie 2004)

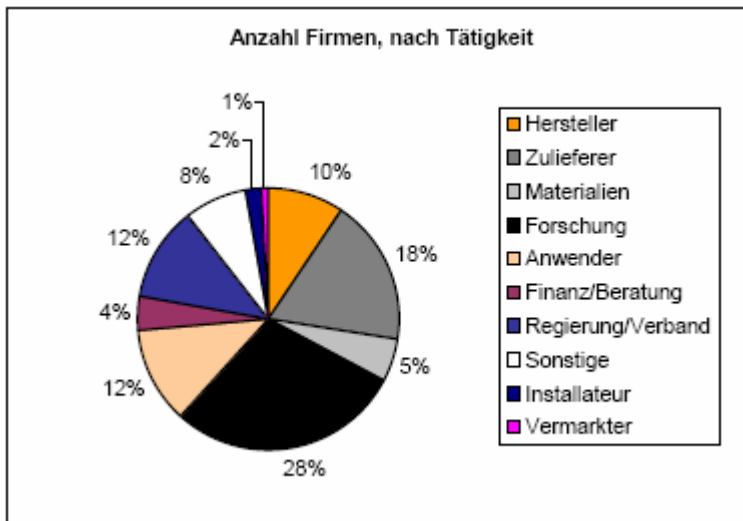
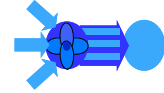
Bei den großen Brennstoffzellen ist die Anzahl der jährlich produzierten Anlagen wesentlich geringer und bewegt sich seit Anfang der 90er Jahre auf einem in etwa gleich bleibenden Niveau zwischen 20 und 60 Neuanlagen pro Jahr.

Technologisch wird das Segment der kleinen BZ-Geräte nahezu ausschließlich von PEM und von SOFC Brennstoffzellen beherrscht. Dabei entfallen auf PEM Anlagen mehr als  $\frac{3}{4}$  des Marktanteils, wobei jedoch zu beachten ist, dass in den letzten Jahren die Zahl der Hersteller im Bereich der SOFC Technologie stärker zugenommen hat (Adamson & Jollie 2004). Das Segment der großen BZ-Anlagen wird demgegenüber von PAFC und MCFC Geräten dominiert, gefolgt von PEM und SOFC.

#### *Pilotprojekte und Innovationsaktivitäten in Deutschland*

Deutschland verfügt über die größte Brennstoffzellenindustrie Europas. In 2003 etwa waren in Deutschland etwa 350 Firmen bzw. Organisationen mit ca. 3.000 Mitarbeiter im Bereich Brennstoffzellen<sup>7</sup> tätig (Geiger 2003). Diese Zahlen machen auch deutlich, dass es sich in den meisten Fällen um sehr kleine Firmen handelt. Hersteller- und Zulieferfirmen machen mit über 50% der Beschäftigten etwa einen Drittel der Organisationen aus, daneben sind Universitäten oder Forschungsinstitute sehr stark vertreten, vgl. Abbildung 2.

<sup>7</sup> Diese Zahlen beziehen sich auf alle Anwendungsfelder, d.h. nicht nur auf stationäre Brennstoffzellen.



**Abbildung 2: Anteile von Organisationen mit unterschiedlichen Aufgabenbereichen (Geiger 2003)<sup>8</sup>**

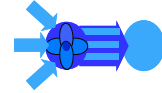
Ungefähr 40% der Organisationen arbeiten schon mehr als 10 Jahre an Brennstoffzellen, manche bereits seit 40 Jahren wie z.B. die Firma Siemens. Fast die Hälfte aller Organisationen beschäftigt sich mit stationären Anwendungen, davon etwas mehr mit kleinen Brennstoffzellengeräten (24%) als mit großen Anlagen (20%).

Viele der weltweiten Demonstrationsprojekte haben ihren Ursprung in Deutschland und mehr als 70% der aktuellen Brennstoffzellen-Projekte in Europa finden in Deutschland statt. In Deutschland gibt es zahlreiche Entwicklungsprojekte, Feldtests sowie Pilot- oder Demonstrationsanlagen, von denen nachfolgend einige vorgestellt werden (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.4).

Zahlreiche Pilotprojekte werden von den großen Energieversorgern wie RWE, EON und EnBW durchgeführt, wobei häufig eine Zusammenarbeit mit Regionalversorgungsunternehmen und / oder Industriepartnern stattfindet. So erprobt etwa die RWE Energie AG in ihrer öffentlichen Forschungsstation, dem „Brennstoffzellen-Pavillon“, seit 2001 fünf verschiedene Gerätetypen und -größen. Gleichzeitig verfolgt die Beteiligungsgesellschaft RWE Fuel Cells GmbH in Kooperation mit BZ-Herstellern seit 2002 verschiedene Test- und Entwicklungsprojekte mit großen MCFC-Anlagen und kleinen PEM-Heizgeräten.

Bei der EnBW Energie Baden-Württemberg AG laufen ebenfalls mehrere BZ-Projekte mit unterschiedlichen Typen und Größen. So wurden zwei Anlagen im Leistungsbereich um 200 kW in Betrieb genommen, eine in einem Thermalbad eine andere bei einem Industrieunternehmen. Ein internationales Konsortium unter Federführung der EnBW, gefördert von der EU und dem US Department of Energy, plante zudem eine 1-

<sup>8</sup> Die Gruppe der „Hersteller“ beinhaltet alle Organisationen die Brennstoffzellen-Systeme herstellen; „Zulieferer“ und „Materialien“ bezeichnen Unternehmen welche Komponenten, wie beispielsweise Bipolarplatten produzieren. Die Gruppe „Forschung“ beinhaltet sowohl Universitäten als auch Forschungsinstitute. „Sonstige“ umfasst Unternehmen im Bereich Infrastruktur, Ausrüstungs- und Teststandhersteller. Die Gruppe der „Anwender“ beinhaltet hauptsächlich Versorgungsunternehmen.



MW-SOFC-Demonstrationsanlage - das größte Brennstoffzellenkraftwerk in Europa mit angeschlossener Kraft-Wärme-Kupplung. Das Großprojekt musste jedoch Ende 2002 eingestellt werden, da keine passende Gasturbine auf dem Markt verfügbar war.

EON koordiniert ebenfalls eine ganze Reihe von Aktivitäten, wobei das Spektrum von großen MCFC oder SOFC-Anlagen bis hin zu Kleingeräten für Ein- und Mehrfamilienhäuser reicht. Und die Bewag (Berliner Städtische Elektrizitätswerke AG) eröffnete 2000 in Zusammenarbeit mit weiteren Energieversorgern den „Innovationspark Brennstoffzelle“ mit einer 250<sup>o</sup>kW-PEM-Demonstrationsanlage von Alstom-Ballard mit einer umfassenden Ausstellung über Wasserstoff und Brennstoffzellen.

Zahlreiche Innovationsaktivitäten konzentrieren sich auch auf Kleinanlagen für Wohnhäuser, so genannte Brennstoffzellen-Heizgeräte. In einem breit angelegten Feldtest betreiben EnBW, EWE (Oldenburg), EWR (Worms), EON, RWE und die Verbundnetz Gas AG je eine größere Zahl baugleicher 1 kW<sub>el</sub> SOFC-Brennstoffzellen von Sulzer-Hexis bei Privatkunden in Einfamilienhäusern. Insgesamt sind heute mehr als 100 dieser Brennstoffzellen im Einsatz.

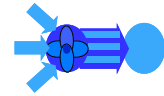
Ein ähnlicher, durch das 5. Forschungsrahmenprogramm der EU geförderter Feldversuch „Virtual Fuel Cell Power Plant“, basiert auf 4,6 kW<sub>el</sub> PEM-Brennstoffzellen von Vaillant / PlugPower. Hier wurden mit Schwerpunkt in Norddeutschland und den Niederlanden insgesamt 31 Geräte installiert. Ein wichtiges Projektziel ist die zentrale Steuerung und Überwachung der Einheiten, um Erkenntnisse über die Machbarkeit von virtuellen Kraftwerken zu erhalten. Seitens der Energiewirtschaft sind die niederländische Gasunie und EON (über die Tochtergesellschaft Ruhrgas) an dem Projekt beteiligt.

#### *Marktnische unterbrechungsfreie Stromversorgung*

Eine heute v. a. in den USA und in Japan bereits etablierte Marktnische für stationäre Brennstoffzellen ist die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV). USV-Geräte können über mehrere Stunden eine lokale Notstromversorgung gewährleisten, wenn die Netzversorgung ausfällt. Ein derartiges Backup spielt beispielsweise für Krankenhäuser, im Bereich der Telekommunikation oder der Wasserversorgung, bei zentralen EDV-Einrichtungen oder bei Leitzentralen von Kraftwerken oder Industrieanlagen eine wichtige Rolle. Gewerbliche und industrielle USV-Anlagen bewegen sich oft in einem Leistungsbereich von einigen 100 kW<sub>el</sub> bis über 1 MW<sub>el</sub>. Bei kleineren Leistungen sind Brennstoffzellen im USV-Bereich von den Gesamtkosten her heute z. T. schon vergleichbar mit etablierten Geräten auf der Basis von Batterien.<sup>9</sup> Im Bereich der USV ergeben sich günstige Anwendungsbedingungen, weil die hohen Kosten der Brennstoffzellen und ihre geringe Lebensdauer (entspricht kurzen Laufzeiten) nicht so sehr ins Gewicht fallen.

---

<sup>9</sup> Plugpower nennt etwa 15-20 Tsd. \$ als Investitionskosten inkl. Wartung über 10 Jahre für eine 5 kW Brennstoffzelle im Vergleich zu einem entsprechenden Batteriesystem, das ohne Wartung 11-15 Tsd. \$ kostet und nach ca. 5 Jahren ersetzt werden muss (Plugpower 2004).



Während längere Zeit vor allem die ausgereifte PAFC Technologie mit Anlagen im 200 kW Segment diese Anwendungen dominierte, ist neuerdings eine deutliche Zunahme von kleinen brennstoffzellenbasierten USV-Geräten zu beobachten. Zahlreiche Hersteller bieten heute Geräte zwischen 1-10 kW<sub>el</sub> an - siehe etwa Plug Power „GenCore“ 5 kW<sub>el</sub> (www.plugpower.com). In 2005-06 wollen vier weitere Firmen in Japan 1 kW<sub>el</sub> PEM-Brennstoffzellen für Privatkunden auf den Markt bringen, die im Netzparallelbetrieb arbeiten, aber auch eine Notstromversorgung aufrecht erhalten können (Adamson & Jollie 2004). Aber auch die Entwicklung von USV-Anlagen in einem mittleren Leistungsbereich um 50 kW wird vorangetrieben (z. B. von IdaTech, vgl. Baker & Adamson 2005).

Auch in Europa tut sich einiges im Bereich der USV-Geräte. So wurden 2005 an der Hannover Messe verschiedene Neuentwicklungen vorgestellt: Rittal lancierte eine 5 kW-PEM-Brennstoffzellenanlage (IdaTech) als 48 V Gleichstrom-Notversorgung für den Einsatz bei Mobilfunkantennen und die AEG SVS Power Supply Systems GmbH präsentierte ebenfalls ein Produkt für 48-Volt-Anwendungen mit einer PEM-Brennstoffzelle. Die Firma SFC Smart Fuel Cell bietet zudem kleine 12°V-USV-Geräte auf DMFC-Basis an.

*Entwicklungstrends*

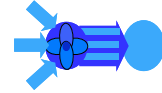
Generell ist festzuhalten, dass sich bis heute sowohl hinsichtlich des BZ-Typs als auch hinsichtlich der Leistung der stationären Anlagen noch keine dominanten Designs herausgebildet haben, vgl. Tabelle 2. Bei den kleinen Anlagen konkurrieren vor allem SOFCs und PEMFCs, bei den großen Anlagen sind es sogar alle vier Typen, wobei zuletzt eine deutliche Zunahme der Entwicklungen im Bereich von MCFCs zu beobachten war (Baker & Adamson 2005). Die Leistung der Kleinanlagen liegt vielfach zwischen 1 und 10 kW<sub>el</sub>. Hier zeichnet sich ein möglicher Trend in Richtung der 1 kW-Klasse ab (Adamson & Jollie 2004). Bei den Großgeräten liegen Entwicklungsschwerpunkt um 200 kW<sub>el</sub> und 1 MW<sub>el</sub>. Während es längere Zeit nur wenig Projekte um 50 kW<sub>el</sub> gab, hat sich das in 2004-5 gerade auch im Zusammenhang mit dem steigenden Interesse an USV-Anlagen geändert.

Da es sich bei den meisten Brennstoffzellen derzeit um Beta-Test bzw. Vorseriengeräte handelt, wäre es verfrüht, auf der Basis dieser Trends bzw. Schwerpunkte bereits zukünftige Designstandards identifizieren zu wollen.

**Tabelle 2: Verfügbarkeit von BZ-Typen für unterschiedliche Leistungsklassen**

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Anlagen < 10 kW	X			X
Anlagen > 10 kW	X	X	X (!)	X

Hinsichtlich der Frage des Brennstoffs dominiert Erdgas seit Jahren die verschiedenen BZ-Anwendungen. Dennoch ist auch hier noch keine Standardisierung erkennbar, im Gegenteil. In 2004 und 2005 war insbesondere bei den großen Brennstoffzellen ein



deutlicher Trend hin zu einer größeren Vielfalt an Brennstoffen zu verzeichnen, darunter Biogas, Kohlegas, Methanol und Kerosin (Baker & Jollie 2004).

### 3.4 Akteure und Innovationsnetzwerke

Mit der Entwicklung und dem Einsatz von stationären Brennstoffzellen befasst sich eine Vielzahl unterschiedlicher Akteure (vgl. Abbildung 2, S. 10). Die Hauptakteure lassen sich grob in vier Gruppen unterteilen: Forschungseinrichtungen, BZ-Hersteller und deren Zulieferer, Energieversorgungsunternehmen sowie Installateure und Handwerksbetriebe. Die jeweiligen Akteure übernehmen dabei spezifische Aufgaben und kooperieren eng miteinander. Abbildung 1 zeigt in vereinfachter Form am Beispiel von Brennstoffzellenheizgeräten für Wohngebäude, wie heute Zusammenarbeit und Aufgabenteilung entlang der Wertschöpfungskette organisiert sind.

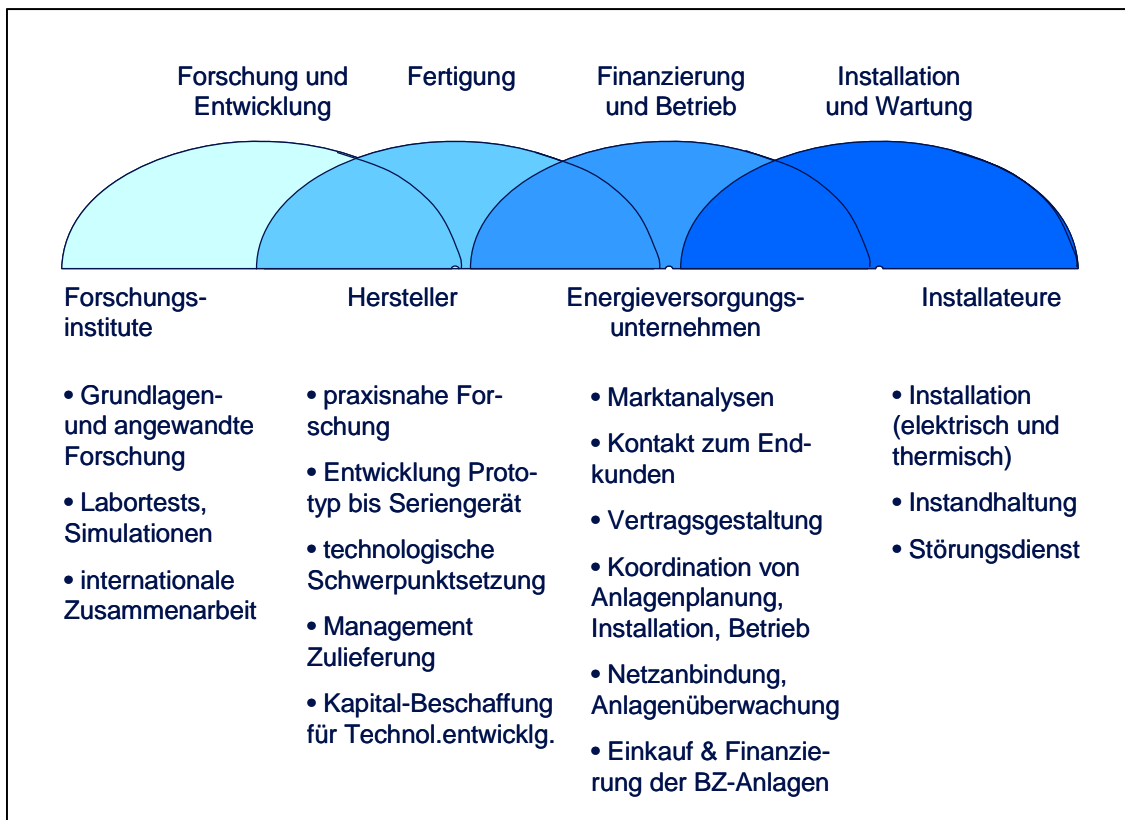
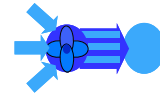


Abbildung 3: Hauptakteure und deren zentrale Aufgaben im Bereich stationäre Brennstoffzellen

Neben den Hauptakteuren spielen auch eine Reihe weiterer Akteurgruppen, zu denen Behörden und öffentliche Geldgeber (Bund, EU), Risikokapitalgeber (Venture Capital Firmen), Branchenverbände oder Umweltverbände gehören, im Bereich stationäre Brennstoffzellen eine Rolle. Sie treten etwa als Promotoren oder Finanziere in Aktion. Darüber hinaus kommt auch den Kunden eine wichtige Aufgabe zu, da sie ein Feedback darüber abgeben können, inwieweit die neue Technologie ihren Bedürfnissen und den Erwartungen gerecht wird bzw. wie man allenfalls bestimmte Eigenschaften verbessern könnte. Bei stationären Brennstoffzellen lassen sich verschiedene Kundensegmente unterscheiden: Privatleute (Hauseigentümer), Wohnungsbau-gesellschaften, Gewerbe- und Industriekunden sowie öffentliche Einrichtungen.



Im derzeitigen Stadium von Pilotprojekten und kleineren Vorserienanwendungen bilden meist Gerätehersteller und Energieversorger den organisatorischen Kern der Innovationsaktivitäten. Gegenüber den Kunden tritt der Energieversorger als Vertragspartner und in vielen Fällen als Contractor auf, d.h. das Unternehmen finanziert, errichtet und betreibt die Brennstoffzelle und stellt den Kunden die Komplettbelieferung mit Wärme und Strom in Rechnung.<sup>10</sup> Darüber hinaus kommen die Kunden z. T. noch mit dem Gerätehersteller oder einem Handwerksbetrieb in Kontakt – etwa bei der Installation oder im Fall von Störungen.

#### *Kooperationen und Innovationsnetzwerke*

Kooperationen und die Zusammenarbeit in Netzwerken ermöglichen es den beteiligten Organisationen, Informationen bzw. Erfahrungen auszutauschen und Innovationsaufgaben zu teilen. Durch Kooperationen und eine entsprechende Aufgabenteilung kann sich etwa ein Gerätehersteller auf seine Kernkompetenzen konzentrieren und muss nicht parallel zur Technikentwicklung noch den Kontakt zu Endkunden oder Kompetenzen im Bereich Service, Störungsdienst und Contracting aufbauen. Die Aufgabenteilung ist insbesondere in frühen Innovationsphasen erforderlich, um Risiken zu senken und flexibel auf neue technologische oder marktbezogene Entwicklungen reagieren zu können. Gleichzeitig ist auch der Informationsaustausch von zentraler Bedeutung für den Innovationserfolg insgesamt, auch wenn es z. T. zuwiderlaufende Interessen unter konkurrierenden Firmen gibt.

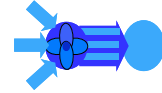
Kooperationen sind häufig bilateral angelegt und formal vereinbart. Im Bereich stationärer Brennstoffzellen finden sich viele Kooperationsformen, die auch aus anderen Bereichen bekannt sind: Joint-Ventures, Kapitalbeteiligungen, Vertriebsvereinbarungen, Entwicklungsvereinbarungen, projekt-basierte Formen der Zusammenarbeit, Forschungsgemeinschaften etc. Netzwerke sind demgegenüber oft weniger formal, schließen viele Partner mit ein und unterliegen einer höheren Fluktuation. Neben informellen Netzwerken, die auf persönlichen Kontakten beruhen und bei denen die Interaktion zwischen den Personen meist keinen festen Regeln folgt, gibt es bei den stationären Brennstoffzellen auch „formalere“ Innovationsnetzwerke wie Arbeitsgruppen oder Bündnisse, die sich z. B. durch einen definierten Teilnehmerkreis oder gemeinsame Ziele auszeichnen.<sup>11</sup>

Ein solches Innovationsnetzwerk ist etwa die „Initiative Brennstoffzelle“, zu der sich in Deutschland zahlreiche Elektrizitäts- und Gasversorger, BZ-Hersteller sowie die Deutsche Energie-Agentur zusammengeschlossen haben. Ziel dieses Netzwerkes ist es, die technologische Entwicklung und Markteinführung von kleinen, erdgasbetriebenen Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung voranzutreiben. Die Initiative betreibt u. a. eine eigene Homepage als Informationsplattform und gibt einen

---

<sup>10</sup> Contractingverträge haben meist eine Laufzeit von 5 oder 10 Jahren, um die mit der Investition verbundenen Risiken des Contractors abzufangen.

<sup>11</sup> Je formaler der Zusammenschluss, umso schwerer fällt die Unterscheidung zwischen Netzwerk und Organisation (i.S. eines Akteurs mit einer bestimmten Strategie). So stehen etwa Interessenverbände oder Innungen an diesem Übergang zwischen Netzwerken und Organisationen.



elektronischen Newsletter sowie gemeinsame Pressemitteilungen heraus. Das Bündnis engagiert sich auch bei der Entwicklung von Geräten und Komponenten, bei Demonstrationsprojekten und Feldversuchen, beim Aufbau von Contracting-Modellen, bei der Schaffung einheitlicher Normen und Standards.

Ein größeres, jedoch eher temporäres Lobby-Netzwerk repräsentiert das Brennstoffzellen-Bündnis Deutschland (BZB) aus 20 verschiedenen Verbänden und Initiativen im Bereich Brennstoffzellen in Deutschland. Hier besteht das gemeinsame Ziel in der Erarbeitung einer Markteinführungsstrategie, um sich dem internationalen Wettbewerb mit verstärkter industrieller und politischer Flankierung zu stellen.

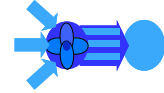
Zahlreiche weitere Innovationsnetzwerke sind im Zuge von öffentlichen Forschungs- und Entwicklungsprogrammen entstanden (vgl. Abschnitt 3.5). In Deutschland bestehen insbesondere auf Länderebene verschiedene solcher Netzwerke unter Beteiligung von Behörden, Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Verbänden. Aber auch Projekte, wie sie unter Kapitel 3.3 erwähnt wurden (z.B. das EU-Projekt „Virtual Fuel Cell Power Plant“), gehen mit der Bildung projektbezogener, z. T. internationaler Netzwerke einher.

Neben Netzwerken, die von öffentlicher Seite initiiert wurden, gibt es auch private, firmenbezogene Netzwerke. So lädt etwa Sulzer-Hexis, als Hersteller von SOFC basierten BZ-Heizgeräten seine Vertriebspartner, zu denen in erster Linie Elektrizitäts- und Gasversorgungsunternehmen gehören, regelmäßig zu einem gemeinsamen Erfahrungsaustausch ein.

Schließlich bestehen auch im Bereich Wasserstoff ähnliche Initiativen und Netzwerke, welche ihren Schwerpunkt auf die Förderung von Wasserstoff als Energieträger legen, dabei jedoch meist ebenfalls die „Wasserstofftechnologie“ Brennstoffzelle fördern. Diese Netzwerke sind damit eher an der Grenze bzw. im Umfeld des Innovationsystems stationäre Brennstoffzellen anzusiedeln.

#### *Unterschiedliche Rollen und Strategien*

Jenseits der allgemeinen Betrachtung auf der Ebene von Akteurguppen und Netzwerken ist zu berücksichtigen, dass die involvierten Unternehmen individuelle Innovationsstrategien verfolgen und damit einen unterschiedlichen Einfluss auf die Entwicklung der Innovation haben. Eine Untersuchung der Strategien am Beispiel von Elektrizitätsunternehmen in Deutschland konnte etwa drei verschiedene Typen von Innovationsstrategien identifizieren (Markard 2004). Auf Marktführerschaft ausgerichtete Unternehmen verfolgen dabei das Ziel, eine zentrale Position im Innovationsgeschehen und im späteren Markt für Brennstoffzellen einzunehmen. Sie wenden große personelle und finanzielle Ressourcen für ihre Innovationsprojekte auf und konzentrieren sich dabei auf bestimmte Anwendungsbereiche und BZ-Typen. Lernorientierte Strategien basieren demgegenüber auf einem breiter angelegten Innovationsportfolio mit verschiedenen BZ-Typen in unterschiedlichen Leistungsklassen. Die Unternehmen wollen vor allem Erfahrungen sammeln und die mit der BZ-Technologie verbunden Chancen und Risiken aus erster Hand kennen lernen, um auf zukünftige Entwicklungen vorbereitet zu sein. Es werden vergleichsweise weniger hohe Ressourcen aufgewendet. Schließlich gibt es auch Unternehmen, die in erster Linie



eine imageorientierte Innovationsstrategie verfolgen. Hier ist vor allem das Ziel, sich als innovativ und kundenorientiert in der Öffentlichkeit darzustellen, ohne dass man dabei schon auf einen späteren Markterfolg der Brennstoffzelle setzt. Dementsprechend werden meist nur einzelne Innovationsaktivitäten mit geringen Ressourcen durchgeführt.

In Abhängigkeit ihrer strategischen Ausrichtung leisten die Unternehmen unterschiedlich hohe Beiträge zur Entwicklung der Technologie bzw. zur Stärkung des Innovationssystems (Markard *et al.* 2003). Auf Marktführerschaft ausgerichtete und lernorientierte Strategien bringen dabei in höherem Maße neues Wissen hervor oder stellen umfangreiche Ressourcen für den Innovationsprozess zur Verfügung (*ibid.*). Vor diesem Hintergrund lassen sich den einzelnen Akteuren unterschiedliche Rollen zuschreiben. Dabei kommt insbesondere sogenannten „prime movers“ (vgl. Jacobsson & Johnson 2000) bzw. Unternehmen, die eine Strategie der Marktführerschaft verfolgen, eine hohe Bedeutung zu, weil sie einen entscheidenden Einfluss auf die Richtung der Innovationsentwicklung nehmen können.

### **3.5 Institutionelle Rahmenbedingungen**

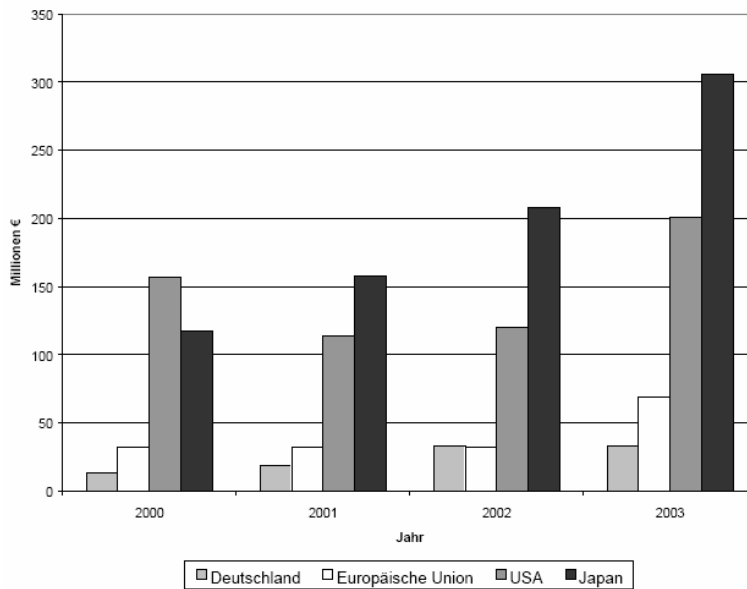
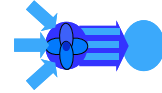
#### *Förderung von F&E-Projekten international<sup>12</sup>*

Stationäre Brennstoffzellen können heute – von einigen Ausnahmen wie den USV-Anwendungen abgesehen – noch nicht wirtschaftlich betrieben werden. Daher ist die weitere Entwicklung von staatlichen Fördermaßnahmen und privaten Risiko-Investitionen abhängig. Das Ausmaß der staatlichen Förderung ist sehr unterschiedlich. Vor allem in den USA und Japan gibt es breit angelegte Forschungs- und Markteinführungsprogramme, was sicher auch eine Erklärung für die große Zahl von Unternehmen ist, die dort als Hersteller aktiv sind. In der Europäischen Union läuft ein wesentlicher Teil der Projekt- und Forschungsförderung über die Forschungsrahmenprogramme. Dabei ist zu beachten, dass die meisten Fördermaßnahmen für Brennstoffzellen einen Schwerpunkt bei den mobilen Anwendungen setzen und stationäre Anwendungen bislang eher ein Schattendasein in der Förderlandschaft führen (Adamson & Jollie 2004).

Generell sind in den letzten Jahren sind die Fördersummen für Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Programme weltweit erheblich gesteigert worden, wobei Deutschland und die Europäische Union immer noch einen Bruchteil der absoluten Fördervolumen der USA und Japans erreichen.

---

<sup>12</sup> Methodisch zählt dieser Bereich sicher nur noch am Rande zu den Institutionen des hier betrachteten Innovationssystems für stationäre Brennstoffzellen in Deutschland.



**Abbildung 4: Förderung von Wasserstoff und Brennstoffzellen im Vergleich (Weider *et al.* 2003)**

In der EU wurde 2003 eine „Roadmap“ zur Erreichung einer Wasserstoffwirtschaft bis Mitte des Jahrhunderts erarbeitet und zur Koordination der europäischen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten die „European Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform“ ins Leben gerufen. Die USA verfolgen ebenfalls das Ziel einer längerfristigen Umstellung auf eine Wasserstoffwirtschaft, während in Deutschland bisher vorwiegend die Förderung der Brennstoffzellentechnologie im Vordergrund stand.

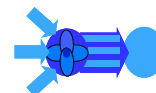
#### *Förderung von F&E-Projekten in Deutschland*

Im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogrammes (ZIP) der Bundesregierung flossen zwischen 2001 und 2003 etwa 40 Mio. Euro in die Förderung stationärer Brennstoffzellen geflossen sind (Feldtests, Entwicklung von Fertigungstechnologien, Normung sowie die Aus- und Weiterbildung). Gleichzeitig wurde das BERTA<sup>13</sup> Netzwerk ins Leben gerufen, in dem sich verschiedenen Arbeitsgruppen um die Umsetzung der geförderten Projekte kümmerten.

Abgesehen von der im internationalen Vergleich geringen absoluten Höhe der Fördermittel fehlt in Deutschland bislang eine kohärente Gesamtstrategie zu Brennstoffzellenförderung. In 2004 wurde daher die „Nationale Koordinierungsstelle Jülich für Wasserstoff und Brennstoffzellen“ (NKJ) an der Schnittstelle zwischen den nationalen, europäischen und internationalen Wasserstoff- und Brennstoffzellenaktivitäten gegründet. Die NKJ unterstützt u. a. den Anfang 2005 gegründeten Strategiekreis HYBERT (Hydrogen- und Brennstoffzellen Expertenrat), ein Expertengremium zur Beratung und Information der involvierten Ministerien.

Insgesamt engagieren sich in Deutschland vier verschiedene Ministerien unterschiedlich stark im übergreifenden Bereich Brennstoffzellen-Technologie und Wasserstoff

<sup>13</sup> Brennstoffzellen: Entwicklung und Erprobung für stationäre, mobile und portable Anwendungen



(vgl. Tabelle). Neben grundlagenorientierten Projekten werden von den Ministerien auch praxisnahe Brennstoffzellenprojekte unterstützt, wobei Zuwendungen für Projekte rund um stationäre Anwendungen rund die Hälfte des Etats ausmachen.

**Tabelle 3: Laufende Wasserstoff- und Brennstoffzellenprojekte mit Unterstützung verschiedener Ministerien (Bezugszeitraum 2004/05)**

Ministerium	Anzahl Projekte	Summe (Mio. Euro)
Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit BMWA	74	92,0
Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF	30	8,6
Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft BMVEL	7	2,1
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen BMVBW	1	5,0
<b>Total</b>		<b>107,7</b>

Nennenswerte F&E-Mittel für Brennstoffzellen kommen aber auch aus verschiedenen Stiftungen und Forschungsgemeinschaften. Projekte mit Zuwendungen von mehreren Millionen Euro finanzieren in Deutschland die Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (je ca. 2,5 Mio. Euro). Unter dem Dach der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V. forschen das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und die Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ) an Brennstoffzellen, und die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) finanziert ebenfalls einzelne Brennstoffzellenprojekte.

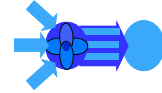
#### *Intermediäre Institutionen sowie Bildungseinrichtungen*

Aus dem BERTA-Arbeitskreis Aus- und Weiterbildung hat sich das Brennstoffzellen-Bildungsnetzwerk ([www.bz-bildung.de](http://www.bz-bildung.de)) gebildet, welches die bundesweite Koordination und Bündelung der Weiterbildungsaktivitäten im Bereich Brennstoffzellen zum Ziel hat. Weiterbildungszentren in Jülich und Ulm richten sich vor allem an Multiplikatoren und Entscheidungsträger aus den Bereichen Industrie, Handwerk und Hochschule.

Im Rahmen der verschiedenen Förderprogramme und Innovationsaktivitäten sind auch zahlreiche intermediäre Institutionen wie etwa die "Koordinierungsstelle Brennstoffzelle" entstanden. Diese begleitet und koordiniert die Brennstoffzellen-Aktivitäten des Handwerks u. a. im Rahmen des Forums „Netzwerk Brennstoffzelle im Handwerk“, das sich seit 2002 regelmäßig trifft.

#### *Gesetzliche Rahmenbedingungen: Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz und EEG Novelle*

Eine gesetzliche Maßnahme der Bundesregierung zur Förderung von Brennstoffzellen stellt das seit April 2002 in Kraft getretene Gesetz zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWKG) dar. Laut Gesetzestext (§1 Abs. 2 KWKG) soll u. a. die Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie als Mittel zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen genutzt werden (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz 2002). Dabei wird der Strom aus Brennstoffzellen bei der Einspeisung ins öffentliche Netz für einen Zeitraum von zehn Jahren ab



Aufnahme des Dauerbetriebs der Anlage zusätzlich zum marktüblichen Preis mit einem Bonus von 5,11 €/kWh vergütet.<sup>14</sup>

Noch höhere Fördersätze erhalten Brennstoffzellen, wenn sie nicht mit Erdgas, sondern mit Deponie-, Klär-, Gruben oder Biogas betrieben werden. In diesem Fall erfolgt die Einspeisevergütung für den erzeugten Strom aus dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und beträgt je nach Energieträger zwischen 6,65 und 11,5 €/kWh zzgl. einem Bonus in Höhe von 2,0 €/kWh für die Nutzung der BZ-technologie (EEG 2004).

#### *Förderung in den Bundesländern*

Generell konzentrieren sich die Brennstoffzellenaktivitäten stark auf den süddeutschen Raum, Hessen und Nordrhein-Westfalen (ca.  $\frac{3}{4}$  der Unternehmen und nahezu 90% aller Angestellten der Brennstoffzellen-Industrie, vgl. Geiger 2003).

Die überwiegende Zahl der Bundesländer hat mittlerweile aber Landesinitiativen bzw. Kompetenz-Netzwerke im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen gegründet. Das Ziel ist es, Partner aus Industrie und Wissenschaft zusammenbringen und Projekte zu Forschung, Entwicklung, Demonstration und Markteinführung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie anzustoßen. Ein Beispiel ist das "Kompetenz-Netzwerk Brennstoffzelle NRW", welches in 2000 als Gemeinschaftsaktion des Energie- und des Wissenschaftsministeriums im Rahmen der Landesinitiative Zukunftsenergien NRW gegründet wurde. In diesem Netzwerk arbeiten heute mehr als 300 Mitglieder aus Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Zur Unterstützung des Wissenstransfers hat man mehrere Arbeitskreise eingerichtet, betreibt eine Kooperationsbörse für die Mitglieder und bietet einen Kompetenz-Atlas Brennstoffzelle und Wasserstoff an.

Ähnlich angelegt sind die „Brennstoffzellen-Initiative Baden-Württemberg“ (seit 2001) oder die „wiba – Wasserstoff-Initiative Bayern“ (seit 1996). Neu hinzugekommen sind die „Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Initiative Hessen“ (seit 2002), die „Wasserstofftechnologie-Initiative Mecklenburg-Vorpommern e.V.“ (2002) oder jüngst die „Initiative Brennstoffzelle Rheinland-Pfalz“ (2004) sowie die „Landesinitiative Brennstoffzelle Niedersachsen“ (2004).

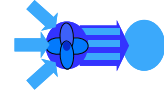
Daneben gibt es auch zeitlich befristete Projekte wie das "Technologietransfer-Verbundprojekt PEM-Brennstoffzelle Sachsen" (2003-2006), das u. a. mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) unterstützt wird. In den neuen Bundesländern ist darüber hinaus die Arbeits- und Forschungsgemeinschaft Brennstoffzellen entstanden, deren Ziel die Förderung der Brennstoffzellenentwicklung in Ost-Deutschland darstellt. Dieses Netzwerk arbeitet ohne öffentliche Fördermittel.

#### *Technische Normen*

Die Prozeduren zur Festlegung brennstoffzellen-spezifischer internationaler Normen und Standards gestalten sich langwierig und sind durch vielfältige Auseinandersetzungen um Interessen, Einfluss und technische Dominanz geprägt (Pehnt &

---

<sup>14</sup> Gilt für Anlagen, die zwischen 2002 und 2010 in Betrieb genommen wurden.



Ramesohl 2003: 49). Zudem besteht wie bei vielen Innovationen ein Zielkonflikt zwischen einer frühen Standardisierung, welche den Weg zum Massenmarkt ebnen könnte und der Notwendigkeit, auf der Suche nach besten Lösungen ein hohes Maß an technischer Flexibilität zu erhalten.

Für die Zulassung zu Feldtests und zur Markteinführung auf dem europäischen Binnenmarkt haben BZ-Hersteller ihre Geräte und Anlagen bisher nach der europäischen Gasgeräte-Richtlinie (90/396/EEC) zertifizieren lassen, welche die maßgeblichen Forderungen für Gasverbrauchseinrichtungen festlegt. Dies umfasst auch die Einhaltung der Niedervolt-, elektromagnetischen und Maschinenrichtlinien.<sup>15</sup> Die Anforderungen für die Zulassung von Brennstoffzellensystemen in der Haustechnik wurden für den Raum Deutschland ab Mitte 1999 erarbeitet. Grundlage für die Aktivitäten des DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches) bildete der Entscheid des GADAC (Gas Appliance Directive Advisory Committee), dass „Brennstoffzellenheizgeräte“ als Gasgeräte im Sinne der EG-Gasgeräte-Richtlinie zu betrachten sind. Im Rahmen eines europaweiten Projektes<sup>16</sup> werden derzeit unter Koordination der DVGW die Grundlagen für die europäische Normung von Brennstoffzellen-Heizanlagen erarbeitet.

Die CE-Zertifizierung als Nachweis der Betriebssicherheit, Umweltverträglichkeit und effizienten Energienutzung haben Sulzer Hexis und Vaillant für ihre vorkommerziellen Brennstoffzellenheizgeräte bereits 2001 durchführen lassen, ebenso MTU für ihre 250°kW-MCFC-Anlage „HotModule“. Solche Zertifizierungen sind für die Hersteller mit erheblichen Kosten verbunden und werden deshalb jeweils für eine größere Anzahl Einheiten vorgenommen. Modifikationen von Komponenten, Konstruktionsprinzipien o. ä. erfordern jeweils eine neue Zertifizierung, weshalb Verbesserungen immer erst in eine nächste Gerätegeneration integriert werden können. Dies stellt ein Hindernis für die kontinuierliche Optimierung der Technologie dar (Pehnt & Ramesohl 2003: 49).

Sowohl auf europäischer wie auf internationaler Ebene bestehen heute Bestrebungen, Standards für die Sicherheit von stationären Brennstoffzellensystemen festzulegen. Das europäische Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) arbeitet gerade an einem Standard für Brennstoffzellen-Gasheizungen und die International Electrotechnical Commission hat in 2005 eine neue Arbeitsgruppe zur Normung von Brennstoffzellenkraftwerken ins Leben gerufen.

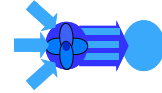
### **3.6 Innovationssystem stationäre Brennstoffzelle**

Das „Innovationssystem stationäre Brennstoffzelle“ umfasst Unternehmen (Hersteller, Zulieferer, Versorgungsunternehmen, Installateure), Interessenverbände, politische

---

<sup>15</sup> Die Richtlinie legt die wesentlichen Sicherheitsanforderungen an Gasgeräte sowie die Bedingungen zum Führen der CE-Kennzeichnung fest. Die CE-Kennzeichnung (EU-Konformitätszeichen) stellt auf dem europäischen Binnenmarkt seit dem 1.1.1996 die alleinige Zulassung für Gasgeräte dar ([www.ovgw.at](http://www.ovgw.at)).

<sup>16</sup> Erarbeitung der Grundlagen für die europäische Normung von Brennstoffzellen-Heizanlagen für die häusliche Energieversorgung (ENBA), im Rahmen eines ZIP-Verbundprojektes auch vom BMWA gefördert ([www.nkj-ptj.de](http://www.nkj-ptj.de)).



Akteure und Institutionen, die das Ziel verfolgen, stationäre Brennstoffzellen zu entwickeln und am Markt einzuführen, siehe auch Abbildung 3. Zum Innovationssystem gehören neben den Akteure und Institutionen auch deren Beziehungen untereinander (Lieferbeziehungen, Kooperationen, Kapitalbeteiligungen, Joint Ventures etc.).

Die Abgrenzung eines so definierten IS fällt nicht immer leicht. Automobilhersteller, die den Einsatz von mobilen BZ vorantreiben, können beispielsweise die Entwicklung bei den stationären Brennstoffzellen stark beeinflussen, auch wenn sie im Folgenden tendenziell nicht als Element des Innovationssystems betrachtet werden. Ähnlich zwiespältig ist die Betrachtung von Forschungsinstituten oder Unternehmen, die sich nur am Rande mit stationären BZ befassen. Hier müsste im Einzelfall (je nach dem konkreten Ziel der Analyse) entscheiden, ob man einen Akteur als Bestandteil des Innovationssystems betrachtet oder nicht. Sicherlich hilfreich ist es, von einem dreistufigen Modell eines Innovationssystems auszugehen: einem Kern mit zentralen Akteuren und Institutionen, einem erweiterten Kreis von mittelbar Beteiligten und einem äußeren Bereich bzw. Systemumfeld.

In ähnlicher Weise wird die Betrachtung des Innovationssystems in räumlicher Hinsicht eingeschränkt, indem in erster Linie die Strukturen und Entwicklungen in Deutschland betrachtet werden. Für die exemplarische Betrachtung konkreter sozio-technischer Regime und die Identifikation von zukünftigen Marktnischen, Realisierungsbedingungen und Entwicklungspfaden ist diese Schwerpunktsetzung sicher zulässig. Mit Blick auf die allgemeine technologische Entwicklung der Brennstoffzellen greift ein nationaler Blickwinkel aber sicher zu kurz.<sup>17</sup>

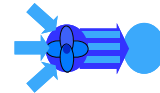
#### 4 Umfeldanalyse

Dieser zweite Teil der Innovationssystemanalyse widmet sich dem Umfeld, in das die Innovation eingebettet ist bzw. in dem sie sich entwickelt. Auf der Landschafts- oder Makroebene werden zunächst allgemeine wirtschaftliche, politische und soziale Faktoren daraufhin untersucht, wie sie den Innovationsprozess beeinflussen. Anschließend geht es auf der Regimeebene um die Analyse des engeren Innovationsumfeldes, d.h. um die Identifizierung von technologischen Regimes in den von der Innovation berührten Wirtschaftssektoren. Es ist darzustellen, in welcher Beziehung die Innovation zu den bestehenden sozio-technischen Regimes steht, d.h. wie eine potenziell Diffusion die Regime-Eigenschaften verändern könnte und wie umgekehrt die Regimestrukturen die Diffusion behindern. Dabei ist auch zu untersuchen, wie stark die maßgeblichen Regime sind und welchen generellen Veränderungen sie ggf. unterworfen sind. Als dritten Schritt beinhaltet die Umfeldanalyse eine Betrachtung von komplementären und konkurrierenden Innovationen.

Im konkreten Fall der stationären Brennstoffzellen ist der Innovationsprozess eng mit den bestehenden Strukturen und zukünftigen Entwicklungen in drei Sektoren Strom-,

---

<sup>17</sup> Deswegen war die Basisanalyse auch auf die weltweite BZ-Entwicklung ausgerichtet.



Wärme- und Gasversorgung verknüpft.<sup>18</sup> Das bedeutet, dass diese drei Sektoren das primäre Suchfeld für die Umfeldanalyse aufspannen.

#### 4.1 Landschaftsanalyse

Auf der Landschaftsebene geht es um allgemeine Entwicklungen, die einen Einfluss auf das Innovationsgeschehen erwarten lassen, ihrerseits aber weitgehend unabhängig von der Innovation sind. Hierzu zählen im Fall der stationären Brennstoffzellen insbesondere die Entwicklung der Preise für Öl bzw. Gas und Strom, die zeitlich fortgeschrittene Liberalisierung des Strom- und Gasmarktes verbunden mit weit reichenden organisatorischen und kapitalbezogenen Umschichtungen, steigende Umweltaforderungen und der deutsche Atomenergieausstieg. Darüber hinaus wirken auf dieser Ebene zahlreiche nicht-technologiespezifische Faktoren (konjunkturelle Entwicklung, privater Wohlstand, demografischer Wandel, Konsumbedürfnisse und Werte, allgemeine Forschungs- und Innovationspolitik etc.).

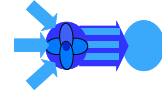
##### *Energiepreise*

Die vergangenen Jahre sind durch einen markanten Anstieg der Öl- und Gaspreise gekennzeichnet. Während der Rohölpreis in den 90er Jahren noch zwischen 15 und 20 \$ pro Barrel betrug, lag das Niveau in 2000 bereits bei 30 \$. Nach einem starken Anstieg seit Anfang 2004 liegt der Ölpreis derzeit bei 60\$ und hat sich damit binnen kurzer Frist abermals verdoppelt. Prognosen gehen davon aus, dass diese Preisniveau auch mittelfristig bestimmend sein wird oder sogar noch weiter steigen wird. Generell befördern derartige Preissteigerungen Innovationseffekte im Bereich effizienterer Technologien und bei Energiequellen aus, die als Substitut dienen. So können etwa steigende Heizölpreise Hausbesitzer dazu veranlassen, ihre Heizungsanlage zu modernisieren, (partiell oder vollständig) auf erneuerbare Energien (z. B. solare Wärme, Holzheizung, Wärmepumpe) umzusteigen oder ihren Wärmebedarf (verbesserte Isolation etc.) zu senken. Es ist zu erwarten, dass in diesem Zug generell ein größeres Interesse an alternativen Technologien geweckt wird und damit auch für Brennstoffzellen positive Effekte ausgelöst werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die erhöhte Nachfrage nach technologischen Alternativen zeitlich nicht kongruent ist mit einer grundsätzlichen technologischen Reife der Brennstoffzelle: Das bedeutet, dass sich das „Nachfragefenster“ schon wieder geschlossen hat, bevor die BZ-Technologie davon profitieren kann.

Ein Anstieg des Erdgaspreises hat eine ambivalente Wirkung in Bezug auf die Nutzung von Brennstoffzellen. Zum einen werden positive Impulse in Richtung hocheffizienter Technologien ausgelöst, zum anderen wird eine gasbasierte Technologie wie die Brennstoffzelle unattraktiver - insbesondere in Konkurrenz zu erneuerbaren Energien. Auf kurze bis mittlere Frist, d. h. solange die BZ-Technologie noch in einem frühen Stadium der Entwicklung steht ist jedoch zu beachten, dass die Brennstoffkosten eher

---

<sup>18</sup> Diese drei Sektoren sind keineswegs klar voneinander zu trennen. So kann insbesondere die Gasversorgung etwa als vorgelagerte Wertschöpfungsstufe für die Strom- und Wärmeversorgung aufgefasst werden.



wenig ins Gewicht fallen im Vergleich zu den Gesamtkosten beim Betrieb von Brennstoffzellen.

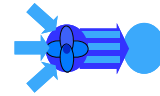
Ähnlich wie beim Öl ist auch auf dem deutschen Elektrizitätsmarkt in den kommenden Jahren tendenziell mit steigenden Preisen zu rechnen, da im Zuge der Liberalisierung die ehemals vorhandenen Überkapazitäten auf der Erzeugungsseite weitgehend abgebaut wurden und in naher Zukunft daher neue Kraftwerke gebaut und finanziert werden müssen, die dann mit ihren Vollkosten in den einzelnen Versorgungsunternehmen zu Buche schlagen. Ähnlich wie steigende Ölpreise, schaffen auch steigende Strompreise ein innovationsfreundliches Klima für alternative, hocheffiziente Umwandlungstechnologien wie die Brennstoffzelle.

#### *Liberalisierung und Wettbewerb*

Die Liberalisierung hat zu einem grundlegenden Wandel im Stromsektor geführt und zeigt zunehmend auch Auswirkungen bei der Gasversorgung (Bürger & Bauknecht 2003; Dronnikov *et al.* 2003). Konkret haben sich im Stromsektor organisatorische Strukturen und Verflechtungen, unternehmerische Strategien und auch die grundlegenden „Logiken“, nach denen Investitionen getätigt werden, verändert (vgl. auch Abschnitt 4.3). Auf der organisatorischen Ebene ist es zu einem (bislang partiellen) Unbundling der zentralen Wertschöpfungsbereiche Produktion, Transport & Verteilung sowie Verkauf gekommen. Gleichzeitig sind aufgrund zahlreicher Fusionen, Firmenübernahmen und Kapitalbeteiligungen neue unternehmerische Verflechtungen entstanden, die dem Wettbewerb z. T. entgegenwirken. Aus regulierten Monopolen haben sich mit anderen Worten liberalisierte Oligopolstrukturen entwickelt, die auch in den Bereich der Gasversorgung hinein reichen. Vor diesem Hintergrund bleibt abzuwarten, wie viel der durch die Liberalisierung im Stromsektor ursprünglich ausgelösten Wettbewerbsdynamik auf längere Sicht aufrecht erhalten werden kann. Auch mit Blick auf den deutschen Gasmarkt ist es offen, inwiefern sich ein starker Wettbewerb entwickeln wird.

Die Wettbewerbsintensität steht wiederum in einem engen Zusammenhang mit den unternehmerischen Strategien - etwa in Bezug auf neue Produkte und Dienstleistungen: Im Zuge der Liberalisierung konnten bei den Energieversorgungsunternehmen (EVUs) neuartige und verschieden ausgerichtete Innovationsstrategien identifiziert werden, die auf ein zunehmend innovativeres Umfeld schließen lassen konnten (Markard 2004). Gleichwohl sind hier in der letzten Zeit zunehmend auch Gegenbewegungen zu erkennen, so dass auch in diesem Punkt offen ist, wie sich die Landschaft in Zukunft entwickelt. In Bezug auf die Brennstoffzelle ist hervorzuheben, dass innovationsorientierte Strategien von EVUs einen erheblichen Beitrag für die Technologie- und Marktentwicklung leisten können (ibid).

Die veränderten Prinzipien von Investitionen in neue Erzeugungsanlagen schließlich haben bislang international einen Trend in Richtung Gaskraftwerke ausgelöst, der in Deutschland jedoch bislang nicht sehr ausgeprägt war. Hintergrund der neuen Investitionslogik ist es, große Investitionsvolumina und lange Planungs- und Bauzeiten von Kraftwerken nach Möglichkeit zu reduzieren. Mit diesen veränderten Prämissen kann u. U. auch ein Trend in Richtung Dezentralisierung einhergehen. Dabei ist jedoch



zu beachten, dass zwischen den Leistungen „kleinerer Großkraftwerke“ und großer BZ-Anlagen immer noch zwei Größenordnungen liegen.

#### *Umweltanforderungen und Umweltbewusstsein*

In den vergangenen Jahren sind schließlich auch die Umweltschutzanforderungen sowie politischen Ziele und Maßnahmen zur Förderung erneuerbarer Energien und energieeffizienter Technologien stetig gestiegen. So wurde auf europäischer Ebene in 2005 der Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten eingeführt (2003/87/EG 2003). Es ist davon auszugehen, dass aus dieser Entwicklung und anderen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. zur Senkung des Energieverbrauchs positive Innovationseffekte erwachsen. Damit hat sich ein Umfeld etabliert und stabilisiert, in dem ökologische Innovationen politisch, gesellschaftlich und letztlich auch unternehmerisch auf eine hohe Akzeptanz stoßen und z. T. auch gezielt gefördert werden.

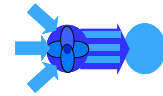
Mit Blick auf die privaten Verbraucher ist darüber hinaus denkbar, dass das derzeit bereits grundsätzlich vorhandene Umweltbewusstsein in den nächsten Jahren weiter steigt (etwa aufgrund einer Zunahme der öffentlichen Diskussion über den Klimawandel). Ähnliches gilt auch für Geschäftskunden, d. h. für die ökologische Positionierung von Unternehmen jeglicher Branchen. Sollte es zu solch einer Entwicklung kommen, hätte dies einen positiven Einfluss auf die Nachfrage nach umweltfreundlichen Energieversorgungsalternativen.

#### **4.2 Regimeanalyse**

Die Regimeanalyse geht der Frage nach, welche sozio-technischen Regimes in welcher Weise für die Anwendung und Verbreitung der Brennstoffzellen-Technologie relevant sind. Im Stromsektor geht es dabei um das Regime der zentralen Elektrizitätserzeugung, das mit der dezentralen BZ-Technologie nicht leicht vereinbar ist. Der Wärmesektor ist zwar durch ein dezentral geprägtes Erzeugungsregime gekennzeichnet, aber auch hier wirken etablierte Strukturen innovationshemmend. Im Bau- und Gebäudebereich gibt es schließlich ebenfalls verschiedene Regelungen, die die gemeinsame Strom- und Wärmeproduktion behindern.

##### *Stromversorgung: zentrale Erzeugung in Großkraftwerken*

Die Stromerzeugung erfolgt heute überwiegend in zentralen Großkraftwerken in einem Leistungsbereich um 1.000 MW, die wegen ihres Flächenbedarfs und ihrer Emissionen meist weit vom Ort des Stromverbrauchs entfernt liegen. Als Basistechnologien der Stromerzeugung haben sich - soweit verfügbar - die Wasserkraft, aber auch Dampf- und Gasturbinen auf der Basis von fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdöl und Erdgas) sowie die Kernenergie etabliert. Die Übertragung der Energie von den Kraftwerken in die Verbrauchszentren sowie die weitere Verteilung bis hin zu den Endkonsumenten erfolgt über ein aufwändiges, sehr weit ausgebautes Leitungsnetz. Kraftwerke und Stromnetz bewirken besondere Trägheiten im Hinblick auf potenzielle Veränderungen, da sie auf eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten ausgelegt sind und große Mengen an Kapital binden. Das großtechnische System der zentralen Stromerzeugung umfasst aber nicht nur technische Komponenten, sondern auch organisatorische

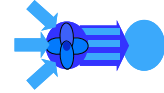


Strukturen, die etwa dadurch geprägt sind, dass die Mehrzahl der großen Kraftwerke und Anlagen von großen Stromversorgungsunternehmen finanziert und betrieben werden, während kleinere EVUs in der Regel nicht über eigene Erzeugungskapazitäten verfügen.

Unter dem Regime versteht man die geltenden Vorschriften und Gesetze, Normen und Standards, eingespielte Betriebs- und Organisationsabläufe sowie vorherrschende Lehrmeinungen, Erwartungen und Praktiken, die dem oben beschriebenen technischen System zugrunde liegen bzw. dessen reibungsloses Funktionieren überhaupt erst ermöglichen. Der Regimebegriff umfasst damit nicht nur Regelwerke in schriftlicher Form, sondern auch ungeschriebene Regeln, Praktiken und Denkweisen, die in ihrer Gesamtheit eine bestimmte sozio-technische Konfigurationen fördern und Alternativen behindern - insbesondere wenn diese stark vom bestehenden System abweichen. Eine dezentrale Technologie wie die Brennstoffzelle „passt“ daher nicht gut in die vorherrschenden Strukturen der Stromversorgung. Aus Sicht der Kraftwerksbetreiber mag sie kleinteilig und unausgereift erscheinen, aus Sicht der Netzbetreiber schlecht integrierbar, aus Sicht des Stromvertriebs nicht profitabel etc. Und schließlich ist es weder für private noch für gewerbliche Kunden nicht nahe liegend, dass sie selber nun Strom produzieren sollen, 'obwohl dieser doch eigentlich aus der Leitung kommt'.

– Exkurs –

In der zentralen Versorgung spiegeln sich auch bestimmte Denkweisen und Organisationsstile wider. In einem Vergleich der Entwicklung des Elektrizitätsversorgungssystems in Frankreich und Dänemark zeigt sich, dass die Organisationsstile und Strukturen im Stromsektor z.T. ein Abbild von Politikstilen und gesellschaftlichen Prinzipien sind (Hadjilambros 2000). So bot ein Land wie Frankreich mit sehr zentralistischen Strukturen im politischen und behördlichen Bereich einen fruchtbaren Boden für eine ebenfalls zentrale Organisation der Elektrizitätsversorgung. Dies hat dazu geführt, dass dort nahezu die gesamte nationale Stromversorgung in einer einzigen, staatlichen Gesellschaft organisiert ist. Darüber hinaus konnte sich die Kernkraft im Wechselspiel zwischen Politik, staatlicher Elektrizitätswirtschaft und einer bedingungslosen Techniküberzeugung von Ingenieuren zur beherrschenden Technologie in der nationalen Stromerzeugung entwickeln (a.a.O.). Demgegenüber führten in Dänemark stärker dezentralisierte Verwaltungsstrukturen zu einer dezentraleren Marktstruktur auf der Anbieterseite der Elektrizitätsversorgung. Zusammen mit einem sehr stark an demokratischen Grundprinzipien orientiertem Politikstil konnte sich dort ein gesellschaftlicher Widerstand gegen die Kernkraft durchsetzen, der letztlich zu wesentlich dezentraleren Erzeugungsstrukturen und genossenschaftlichen Organisationen geführt hat.



### *Wärmeversorgung: konservatives Handwerk*

Ganz anders als die Stromerzeugung ist die Wärmeerzeugung heute überwiegend<sup>19</sup> verbrauchsnahe organisiert, d.h. Energieträger wie Öl oder Gas, vereinzelt auch Holz oder Solarstrahlung, werden im betreffenden Gebäude in Wärme umgewandelt. Auch hier gibt es technologisch bedingte Trägheiten, da die Heizkessel eine Lebensdauer von ca. 20 Jahren aufweisen und die gebäudeinternen Leitungssysteme und Heizkörper noch wesentlich darüber hinausgehen. Im Bereich der Wärmeversorgung sind verschiedene Akteurguppen tätig: Heizungsanlagenhersteller, Handwerksbetriebe, die meist die Neuinstallation und Wartung übernehmen sowie Ingenieurbüros, die bei größeren Wärmeversorgungseinrichtungen die Planung durchführen. Insbesondere die lokalen Installateure haben einen wichtigen Einfluss auf die Entscheidung der Kunden im Fall eines Ersatzes der alten Heizungsanlage. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass eine Innovationen wie die Brennwertechnik, die effizienter und zugleich wirtschaftlicher als die herkömmliche Verbrennungstechnik ist, sehr lange Zeit für die Diffusion benötigte, da Installateure und Handwerksbetriebe skeptisch und / oder wenig informiert waren und den Kunden daher die Brennwertechnik nicht empfohlen haben.

Technologisch weist die Brennstoffzelle in Bezug auf die dezentrale Wärmeversorgung eine höhere Kompatibilität als bei der Stromversorgung auf. Als dezentrale Technologie ist sie grundsätzlich geeignet, herkömmliche Heizungsanlagen zu ersetzen bzw. in diese integriert zu werden. Hindernisse sind von Seiten eines wenig innovationsfreudigen Handwerks, aber auch von den Kunden zu erwarten, von denen zunächst nur Pioniere und Technikbegeisterte die zusätzlichen Kosten und Risiken einer neuen Technologie auf sich nehmen wollen.

### **4.3 Regimeveränderungen**

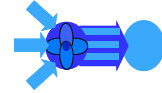
Sozio-technische Systeme und die mit ihnen verbundenen Regimestrukturen verändern sich über die Zeit. Veränderungen können „von oben“ durch Ereignisse und Entwicklungen auf der Landschaftsebene angestoßen werden oder auch „von unten“ kommen, wenn Nischen wachsen und die betreffenden Innovationen sukzessive die etablierten Technologien ersetzen. Dieser Abschnitt geht der Frage nach, inwiefern heute bereits in den vorherrschenden Systemen bzw. Regimes Veränderungen ablaufen oder Schwächen erkennbar sind, die Hinweise auf zukünftige Veränderungen geben.

#### *Stromversorgungssystem*

Die lange Zeit vorherrschenden organisatorischen Strukturen der Elektrizitätsversorgung sind infolge der Marktliberalisierung einem grundlegenden Wandel unterworfen: bestehende Unternehmen und Newcomer konkurrieren miteinander, neue Institutionen wie unabhängige Netzbetreiber oder Strombörsen entstehen, zahlreiche gesetzliche

---

<sup>19</sup> Eine Ausnahme bildet die Fernwärmeversorgung, die in einigen städtischen Regionen eine hohe Verbreitung erlangt hat. Lokale Nahwärmesysteme, die in den letzten Jahren bei verschiedenen Neubauprojekten von Wohnsiedlungen entstanden sind, nehmen eine Zwischenstellung zwischen der dezentralen und der zentralen Wärmeversorgung ein.



Bestimmungen verändern sich und etablierte Unternehmensstrukturen brechen auf (vgl. Abschnitt 4.1). Dadurch entstehen z. T. neue Freiräume für Innovationen - etwa wenn Versorgungsunternehmen versuchen, über innovative Dienstleistungsangebote neue Kunden zu gewinnen oder neue Märkte zu erschließen (Markard *et al.* 2004).

Die organisatorischen Veränderungen erfassen auch die technologische Ebene. So haben sich in den letzten Jahren etwa erdgasgefeuerte Kraftwerke auf Basis der Gas- und Dampfturbinen-Technologie (GuD) international stark verbreitet (Winkel 2002). Dadurch findet einerseits eine Verlagerung bei den für die Stromerzeugung wichtigen Primärenergieträgern in Richtung Erdgas statt. Andererseits eröffnet sich auch ein technologisches Potenzial zur Dezentralisierung, da GuD-Anlagen auch in kleinerem Maßstab (einige Dutzend MW) wirtschaftlich betrieben sowie flexibel und schnell gebaut werden können.<sup>20</sup>

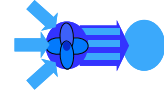
Weiteres Potenzial zur Veränderung des heutigen Regimes der zentralen Erzeugung birgt die Tatsache, dass gerade in Deutschland der Kraftwerkspark zurzeit überwiegend aus älteren Kraftwerken besteht, die in den kommenden Jahren ersetzt werden müssen (Bürger & Bauknecht 2003, S. 11). Der Ersatzbedarf für bestehende Kraftwerke wird in Deutschland noch durch den Beschluss, aus der Atomkraftnutzung auszusteigen, verstärkt. Man geht davon aus, dass zwischen 2010 und 2025 bis zu 60 GW oder 80% der bestehenden Kraftwerksleistung neu errichtet werden müssen (Enquete-Kommission 2002).

Das Regime der zentralen Versorgung wird in Deutschland aber auch durch gesetzliche Regelungen wie das Erneuerbare-Energien-Gesetz oder das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz geschwächt, da diese gezielt Technologien bzw. Energiesysteme fördern, die nicht regime-kompatibel, aber unter Umweltaspekten vorteilhaft sind (vgl. 3.5). In diesem Zusammenhang ist auch hervorzuheben, dass regime-schwächende Einflüsse nicht allein auf technischen oder ökonomischen Faktoren basieren, sondern auch eine gesellschaftliche Dimension haben. So ist etwa davon auszugehen, dass der jahrelange öffentliche Diskurs über Umweltthemen (Nutzung erneuerbarer Energien, Atomausstieg, Energieeffizienz) auch auf der Nachfrageseite zu einem veränderten Bewusstsein geführt hat. Demzufolge nimmt auch die generelle Akzeptanz alternativer, dezentraler Erzeugungstechnologien zu. Diese Veränderung gilt sowohl für die Strom- als auch für die Wärmeversorgung.

Schließlich ist auch in Bezug auf die Versorgungsqualität und insbesondere die Versorgungssicherheit international zu beobachten, dass die Zuverlässigkeit der allgemeinen Stromversorgung abgenommen hat und weit reichende Blackouts z. T. gehäuft auftreten. Eine Ursache für diese Entwicklung liegt darin, dass im Zuge der Marktliberalisierung eine Zurückhaltung bei Investitionen erfolgt, die sich auf mittlere Frist negativ auf die Versorgungsqualität auswirkt. Für die dezentrale, verbrauchsnahe Stromerzeugung ist eine Abnahme der allgemeinen Versorgungssicherheit ein wichtiger treibender Faktor.

---

<sup>20</sup> Bislang ist allerdings offen, inwiefern die GuD-Technologie tatsächlich zu einer Dezentralisierung der Stromerzeugung führt, da in vielen Fällen



### *Wärmeversorgungssystem*

Auch im Bereich der Raumheizung sind in den letzten Jahren verstärkt neue Technologien auf dem Vormarsch. Dazu zählen etwa der erdgasgefeuerte Brennwertkessel, eine eher inkrementelle Innovation, die Wärmepumpe, solarthermische Anlagen und Holzheizungen. Viele dieser Technologien wurden bzw. werden durch Zuschüsse der öffentlichen Hand, durch Informationskampagnen, durch Ausbildungsprogramme, die Bildung von Netzwerken und Transferstellen etc. unterstützt.

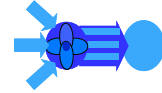
Im Wärmeversorgungssektor sind in der Folge zahlreiche neue Handwerksbetriebe entstanden, die das Spektrum der Angebote deutlich erweitert und damit die ursprünglichen Grenzen des Regimes erweitert haben. Gleichzeitig ist auch davon auszugehen, dass auch etablierte Installateure nach und nach aufgeschlossener werden für alternativer Technologien, diesbezüglich neue Kompetenzen aufbauen und den Kunden letztlich eine breitere Angebotspalette präsentieren.

#### **4.4 Komplementäre Innovationen**

In diesem Abschnitt geht es darum, Innovationsprozesse in anderen Bereichen zu identifizieren, die sich positiv auf die Entwicklung stationärer Brennstoffzelle auswirken. Hierzu zählen etwa Fortschritte bei der BZ-Technologie im portablen und mobilen Einsatz, bei anderen dezentralen Energieerzeugungstechnologien sowie bei Informations- und Telekommunikationstechnologien (IuK).

Die Entwicklungen auf dem Gebiet der stationären Brennstoffzelle haben in der Vergangenheit stark von den Fortschritten bei den mobilen und portablen Anwendungen profitiert. Insbesondere im Transportsektor werden seit Jahren umfangreiche finanzielle und personelle Ressourcen für Forschung und Entwicklung von Brennstoffzellen aufgewendet, wobei insbesondere die PEM BZ-Technologie dort eine wichtige Rolle spielt. Der stationäre Bereich profitiert von dieser Entwicklung nicht nur hinsichtlich der PEM Technologie, sondern auch in Bezug auf die Entwicklung von Fertigungstechnologien und Peripheriekomponenten (Reformer, Brennstoffspeicher, Steuerung etc.). Ähnlich gelagerte Synergien sind aus dem Bereich der portablen Anwendungen zu erwarten, in dem eine breitere Markteinführung und Verbreitung zeitlich am nächsten liegen (Baker *et al.* 2005). Die Diffusion portabler BZ dürfte auch positive Effekte mit Blick auf die Bekanntheit, die Akzeptanz und den alltäglichen Umgang mit dieser Technologie haben. Generell ist hervorzuheben, dass die ausgelösten Synergieeffekte sehr oft nicht-technischer Natur sind. So hat insbesondere die Entwicklung von mobilen BZ in den letzten Jahren eine große Aufmerksamkeit in der Fachwelt und in der breiten Öffentlichkeit erzielt, ein positives Image der Technologie hervorgebracht und viel versprechende Zukunftserwartungen geweckt (Ruef 2005).

Auch seitens anderer dezentraler Technologien sind Synergieeffekte zu erwarten. Diese wirken sich teilweise auf Regimeebene aus - etwa bei der Anpassung geltender Netzanschlussvorschriften und anderer Normen oder der Einführung technologieübergreifender Förderinstrumente (s.o., Abschnitt 4.3). Zum Teil ergeben sich aber



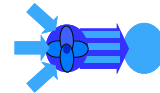
auch direkt Auswirkungen auf das Innovationssystem. Hierzu zählt etwa die Weiterentwicklung von technischen Komponenten zur Regelung, Netzeinspeisung etc.

Mit Blick auf IuK-Technologien ist schließlich auch zu erwarten, dass eine weitere Erhöhung der Datenübertragungs- und -verarbeitungskapazitäten in den Bereichen Regelung und Anlagensteuerung dazu führt, dass die Vernetzung und automatische Koordination einer großen Zahl dezentraler Energieerzeugungseinheiten sowohl technisch als auch wirtschaftlich leicht zu realisieren ist. Damit können Synergiepotenziale, die sich mit dem Leitbild der „virtuellen Kraftwerke“ verbinden (vgl. Abschnitt 6.1), erschlossen werden.

#### **4.5 Konkurrierende Innovationen**

Neben den komplementären Innovationen gibt es auch verschiedene Innovationsprozesse, die sich hemmend auf die Entwicklung stationärer Brennstoffzellen auswirken. Konkurrierende Innovationen sind auf verschiedenen Ebenen zu finden: auf der Ebene der etablierten, zentralen Kraftwerke (v. a. inkrementelle Verbesserungen, aber auch weitere Verbesserung neuerer Technologien wie Gasturbinen), auf der Ebene der semi-dezentralen Technologien (Windkraft, Geothermie, Wellenkraft etc.) und auf der Ebene der dezentralen Strom- bzw. Wärmeerzeugung. Die dezentralen Technologien kann man als direkte Konkurrenz auffassen - sie werden nachfolgend ausführlicher behandelt. Schließlich gibt es noch eine vierte Ebene von hemmenden Innovationen. Dazu gehört ein breites Spektrum von Maßnahmen und Produkten (z. B. Verhaltensänderungen, energiesparende Baustandards, innovative Materialien, „intelligente“ Steuerungen, neue Technologien etc.), die vor allem eine Reduktion des Wärmebedarfs bewirken und damit auch die Potenziale für die Kraft-Wärme-Kopplung einschränken.

Andere dezentrale Strom- und Wärmeerzeugungstechnologien wie konventionelle Gasmotor-Blockheizkraftwerke, konventionelle Heizungskessel oder Wärmepumpen konkurrieren direkt mit Brennstoffzellen im Bereich der Energieversorgung von Gebäuden. In Bezug auf die Kraft-Wärme-Kopplung stellen insbesondere Blockheizkraftwerke eine weitgehend ausgereifte Technologie dar, bei der sich Weiterentwicklungen und Verbesserungen zu Lasten der Brennstoffzelle auswirken können. In einem frühen, mit der BZ vergleichbaren Entwicklungsstadium befinden sich zudem Mikrogasturbinen oder Stirling-Motoren - ebenfalls beides Technologien zur dezentralen Strom- und Wärmeerzeugung. Darüber hinaus zählen aber auch thermische und photoelektrische Solaranlagen zu den neuen Konkurrenzinnovationen, deren weitere Verbreitung sich nachteilig auf den Einsatz von Brennstoffzellen auswirken kann.



## 5 Variationsanalyse

Das Ziel dieses Untersuchungsschrittes ist es, die Variationsmöglichkeiten des Innovationssystems auszuloten, um auf diese Weise ein besseres Verständnis für den Spielraum zukünftiger Entwicklungen zu erhalten. Dabei werden zwei verschiedene Dimensionen der Variation betrachtet. Zum einen geht es darum, grundsätzliche Anwendungsbereiche im Sinne von sozio-technischen Varianten zu identifizieren. Zum anderen geht es um die Organisation der zahlreichen Aufgaben entlang der Wertschöpfungskette. Auch hier sind verschiedene Konstellationen der Zusammenarbeit der zentralen Akteurguppen denkbar (Rollenmodelle).

Die so identifizierten Entwicklungsvarianten werden in einem weiteren Arbeitsschritt auf die Frage hin untersucht, welche Einflussfaktoren für ihre Realisierung maßgeblich sind. Abschließend wird betrachtet, inwiefern bestimmte *Kombinationen* von sozio-technischen und organisatorischen Varianten für die zukünftige Entwicklung des Innovationssystems nahe liegen.

### 5.1 Sozio-technische Variation: Anwendungsbereiche

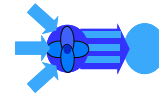
Stationäre Brennstoffzellen weisen in ihrem derzeitigen Entwicklungsstand eine hohe technologische Variationsbreite auf, d.h. verschiedene BZ-Typen (Technologievarianten) werden in ganz unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt. Jeder Anwendungsbereich zeichnet sich durch bestimmte technische<sup>21</sup> Eigenschaften aus, wobei wir im Folgenden Basisdimensionen wie Brennstoffzellentyp, Brennstoff, Betriebsmodus und -dauer sowie Anlagengröße unterscheiden. Die Analyse konzentriert sich auf zentrale Anwendungsbereiche, die in erster Linie durch die Funktion bzw. den Verwendungskontext der Brennstoffzelle charakterisiert sind, woraus sich dann wiederum bestimmte Konstellationen von technischen Eigenschaften ergeben.

Statt von Anwendungsbereichen kann alternativ auch von potenziellen Marktnischen gesprochen werden. Dadurch rücken insbesondere auch potenzielle Kunden in den Blickpunkt. Die Frage ob und inwiefern ein Anwendungsbereich in Zukunft am Markt von Bedeutung sein wird, kann kaum beantwortet werden. Die Variationsanalyse zielt daher darauf ab, die wesentlichen Merkmale der Anwendungsbereiche im Sinne eines Szenarios zu beschreiben und auf diese Weise Rückschlüsse zu ziehen, welche Faktoren die Entwicklung der jeweiligen Bereiche besonders beeinflussen.

Die nachfolgende Abbildung stellt die im Fall der stationären Brennstoffzelle als wichtig erachteten sozio-technischen Varianten in der Übersicht dar. Dabei ist jede Zeile für sich zu betrachten, d.h. dass beispielsweise der Eintrag, der bei BZ-Typ an erster Stelle aufgeführt ist nicht notwendigerweise mit der erstgenannten Brennstoffvariante zusammenhängt u.s.w.

---

<sup>21</sup> Hier liegt der Fokus der Betrachtung auf den technischen Merkmalen der Anwendungsbereiche, auch wenn generell davon auszugehen ist, dass im Zuge der weiteren Verbreitung von Brennstoffzellen z. T. auch nicht-technische Eigenschaften (kundenspezifische Nutzungsformen, Werthaltungen, symbolische Bedeutung der Technologie etc.) eine stärkere Bedeutung erlangen.



BZ-Typ	PAFC	PEMFC	SOFC	MCFC
Brennstoff	Wasserstoff	Erdgas	Methanol	Biogas
Betriebsmodus	Nur Stromerzeugung		KWK-Betrieb	
Laufzeit / Betriebsdauer	Temporär	Intervall	Dauerbetrieb	
Anlagengröße	Klein (< 15 kW)	Mittel (50-250 kW)	Groß (> 1 MW)	
Kundensegment	Privatkunden	Betriebe / öff. Einrichtungen	Industrie	Stromwirtschaft

Abbildung 5: Basisdimensionen und sozio-technische Varianten im Überblick

### Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Im Anwendungsbereich unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) sichern stationäre Brennstoffzellen lokal und temporär die Stromversorgung, falls die Versorgung über das zentrale Stromnetz ausfällt. BZ-Geräte sind je nach Auslegung in der Lage, einen Ausfall der zentralen Versorgung für einige Stunden, u. U. aber auch Tage zu überbrücken. Bei den USV Brennstoffzellen handelt es sich um Kompaktanlagen, die alleine auf die temporäre Stromproduktion ausgerichtet sind. Sie sind dementsprechend nicht in das gebäudeeigene Wärmeversorgungssystem integriert. Wichtigste Parameter bei der Auslegung der Anlagen sind die Zuverlässigkeit (automatisches Anfahren, störungsfreier Betrieb), eine schnelle Verfügbarkeit, ihre Leistungsdichte (geringes Volumen bei hoher Erzeugungskapazität) sowie ihre Speicherkapazität (im Fall eines vom Gasnetz unabhängigen Betriebs). Wirkungsgrad, Lebensdauer des BZ-Stacks und Erzeugungskosten sind hingegen eher sekundär.

Als USV-Geräte kommen in erster Linie Niedertemperatur-Brennstoffzellen (meist PEM-BZ) zum Einsatz, da sie innerhalb kürzester Zeit betriebsbereit sein müssen.<sup>22</sup> Als Brennstoffe werden reiner Wasserstoff (Gasflaschen) bzw. Erdgas verwendet. USV-Brennstoffzellen werden in verschiedenen Größenklassen von Kleinanlagen (1 kW) bis hin zu mittleren Leistungsklassen eingesetzt. Zu den Kunden gehören sowohl Privathaushalte als auch Firmen und öffentliche Einrichtungen. Die Entscheidung für ein USV-Gerät fällt unabhängig davon, wie die Wärmeversorgung des Gebäudes organisiert ist.

BZ-Typ	PAFC	PEMFC	SOFC	MCFC
Brennstoff	Wasserstoff	Erdgas	Methanol	Biogas
Betriebsmodus	Nur Stromerzeugung		KWK-Betrieb	
Laufzeit / Betriebsdauer	Temporär	Intervall	Dauerbetrieb	
Anlagengröße	Klein (< 15 kW)	Mittel (50-250 kW)	Groß (> 1 MW)	
Kundensegment	Privatkunden	Betriebe / öff. Einrichtungen	Industrie	Stromwirtschaft

Abbildung 6: Charakteristika des Anwendungsbereichs USV

<sup>22</sup> Die Überbrückung von Stromausfällen im Sekundenbereich erfolgt über Hochleistungskondensatoren oder Akkumulatoren.

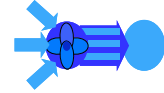


Abbildung 6 zeigt typische Ausprägungen (dunkelgrau markiert) der technischen Variationsdimensionen und der Kundensegmente für den Anwendungsbereich USV. Hellgrau markiert sind Varianten, die als weniger wahrscheinlich erachtet werden bzw. selten auftreten. Felder, die aufgrund der Verwendungssituation ausgeschlossen oder wenig nahe liegend sind, wurden nicht hervorgehoben.

Welche Bedeutung die Marktnische USV erlangen wird, hängt insbesondere davon ab, wie sich die Versorgungssicherheit im Elektrizitätssektor und auch die Ansprüche verschiedener Kunden in Zukunft entwickeln. Aufgrund der in Deutschland zurzeit hohen Versorgungssicherheit besteht eine Nachfrage nach USV-Anlagen vor allem in Spezialbereichen (Krankenhäusern, Telekommunikationsanlagen, Leitzentralen für Kraftwerke oder Industrieanlagen, Betriebsräumen für Computer-Server, militärischen Einrichtungen etc.). Im Fall einer deutlichen Zunahme von Stromausfällen ist damit zu rechnen, dass der Bedarf nach USV-Anlagen einen zunehmend größeren Kreis von gewerblichen und privaten Anwendungen erfasst. Aber auch bei einer weiterhin stabilen Stromversorgung führt die zunehmende Verbreitung von hochsensiblen Einrichtungen (EDV, Mobilfunk, Telekommunikation) zu einer steigenden Nachfrage nach USV-Geräten.

Darüber hinaus hängt die Entwicklung im Anwendungsbereich USV natürlich auch von der Weiterentwicklung der dort bereits etablierten Technologien (Batteriesysteme, Diesel- oder Gasmotoren etc.) ab.

#### *Dezentrale Energieversorgung von Wohnhäusern (Mikro-KWK)*

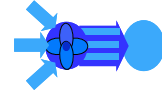
Bei der Energieversorgung von Wohnhäusern wird die Brennstoffzelle im KWK-Modus betrieben und wurde auf den Wärmebedarf (Warmwasser u. Heizung) ausgelegt; der Standard-Betrieb<sup>23</sup> erfolgt wärmegeführt. Mikro-KWK-Brennstoffzellen werden häufig in Verbindung mit konventioneller Heiztechnik (z.B. Erdgaskessel) betrieben, um die Spitzenlast während der kalten Jahreszeit abzudecken.<sup>24</sup> Der Strom wird lokal verbraucht und Überschüsse werden in das Stromnetz eingespeist. Auch wenn die BZ-Geräte nicht speziell darauf ausgelegt sind, können sie bei einem Ausfall des Stromnetzes eine Grundversorgung mit Elektrizität aufrechterhalten. Bei der Optimierung der Anlagen spielen insbesondere die Energieerzeugungskosten, die Lebensdauer der Stacks und die Energieeffizienz eine wichtige Rolle.

Im Bereich Mikro-KWK können sowohl Nieder- als auch Hochtemperatur-Brennstoffzellen eingesetzt werden, wobei sich aus technischen Gründen die Auswahl letztlich auf PEM bzw. SOFC Zellen beschränkt. Als Brennstoffe kommen im Grunde verschiedene Varianten in Frage, wobei der Einsatz von Erdgas mittelfristig dominant bleiben dürfte. Die Geräte werden im Bereich kleiner Leistungen (einige kW) eingesetzt. Die Produkte richten sich vor allem an zwei Kundensegmente: Eigentümer /

---

<sup>23</sup> Ausnahme ist der Betrieb im Verbund von virtuellen Kraftwerken. In diesem Fall übernimmt das EVU kurzfristig die stromgeführte Steuerung der Anlage.

<sup>24</sup> Im Fall von Niedrigenergiehäusern kann sich dieser Spitzenlastbedarf stark reduzieren.



Bauherren von Einfamilienhäusern sowie Wohnungsbaugesellschaften als Besitzer von Mehrfamilienhäusern, vgl. Abbildung.

BZ-Typ	PAFC	PEMFC	SOFC	MCFC
Brennstoff	Wasserstoff	Erdgas	Methanol	Biogas
Betriebsmodus	Nur Stromerzeugung		KWK-Betrieb	
Laufzeit / Betriebsdauer	Temporär	Intervall	Dauerbetrieb	
Anlagengröße	Klein (< 15 kW)	Mittel (50-250 kW)	Groß (> 1 MW)	
Kundensegment	Privatkunden	Betriebe / öff. Einrichtungen	Industrie	Stromwirtschaft

**Abbildung 7: Charakteristika des Anwendungsbereichs Mikro-KWK**

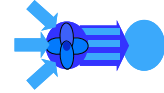
Die Diffusion von Brennstoffzellen im Bereich Mikro-KWK hängt davon ab, welche Umwelt- und Kostenvorteile sich mit anderen, dezentralen KWK-Technologien aber auch mit regenerativer Energieerzeugung erzielen lassen. Bei der dezentralen Hausenergieversorgung konkurrieren BZ im Bereich der reinen Wärmeenergieerzeugung vor allem mit konventionellen Heizkesseln (Gas, Öl), solarthermischen Anlagen und Wärmepumpen (vgl. Abschnitt 4.5). Bei der Verbreitung von BZ im Privathausbereich dürften aber nicht nur rationale Überlegungen, sondern auch Image- und Lifestyle-Aspekte der neuen Technologie zum Tragen kommen. Gleichzeitig ist auch von Bedeutung, inwiefern das Interesse der Kunden an einer im Bedarfsfall netz-unabhängigen Stromerzeugung zunehmen wird.

Allgemein hängt die Entwicklung der Marktnische Mikro-KWK stark davon ab, ob und inwieweit sich der Heizungsmarkt in einen KWK-Markt wandelt. Dabei dürften auch staatliche Förderprogramme, welche generell verschiedene Mikro-KWK-Technologien ansprechen werden, eine zentrale Rolle spielen. Von Bedeutung wird auch die Akzeptanz der Installateure und des Handwerks sein (vgl. Abschnitt 4.2).

*Dezentrale Energieversorgung von großen Gebäuden, Betrieben und öffentlichen Einrichtungen (Mini-KWK)*

Beim Anwendungsbereich Mini-KWK sind zahlreiche technische Auslegungsparameter ähnlich wie der Mikro-KWK, vgl. Abbildung 8. Die Unterschiede liegen im Wesentlichen in der BZ-Größe und den Kundensegmenten. Darüber hinaus ist die Palette der einsetzbaren BZ-Typen größer, wobei für Hochtemperatur-Geräte aufgrund ihrer höheren Effizienz tendenziell Vorteile bei diesen Anwendungen zu erwarten sind. Die Optimierung der Brennstoffzellen ist vor allem auf die Energieerzeugungskosten und eine lange Betriebsdauer ausgerichtet.

Im Bereich Mini-KWK kommen Brennstoffzellen mittlerer Größe, d.h. zwischen 50 und 250 kW<sub>el</sub> in sehr unterschiedlichen Gebäuden bzw. Objekten zum Einsatz. Dazu gehören etwa Schul- und Krankenhäuser, Schwimmbäder, Bürogebäude, Gewerbe- und Industriebetriebe etc. Dementsprechend variieren auch die technischen Anforderungen und Betriebsmodi in den Details. Generell ist davon auszugehen, dass der KWK-Betrieb wärmegeführt erfolgt, wobei aber auch denkbar ist, dass die Anlagen zur



Abdeckung von Lastspitzen beim Elektrizitätsbedarf stromgeführt betrieben werden. Schließlich wird im Bedarfsfall auch die Fähigkeit der BZ zur Erzeugung von Notstrom genutzt. Die Kundensegmente sind im Fall Mini-KWK sehr heterogen und reichen von öffentlichen Stellen bis hin zu privaten Firmen und Gesellschaften.

BZ-Typ	PAFC	PEMFC	SOFC	MCFC
Brennstoff	Wasserstoff	Erdgas	Methanol	Biogas
Betriebsmodus	Nur Stromerzeugung		KWK-Betrieb	
Laufzeit / Betriebsdauer	Temporär	Intervall / Spitzenlast	Dauerbetrieb	
Anlagengröße	Klein (< 15 kW)		Mittel (50-250 kW)	Groß (> 1 MW)
Kundensegment	Privatkunden	Wohnungsbau gesellschaften	Industrie	Stromwirtschaft

**Abbildung 8: Charakteristika des Anwendungsbereichs Mini-KWK**

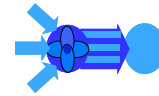
Die Brennstoffzelle konkurriert im Anwendungsbereich Mini-KWK mit Stirlingmotoren und Gasmotor-BHKWs, aber auch mit der konventionellen, d.h. getrennten Wärme- und Stromversorgung. Die Verbreitung von Brennstoffzellen in diesem Bereich hängt nicht nur von der Performance konkurrierender Technologien ab, sondern auch davon wie sehr Umweltauflagen bzw. ein umweltfreundliches Image für Gewerbebetriebe und öffentliche Einrichtungen in Zukunft eine Rolle spielen. Auch die Möglichkeit der Notstrom-Funktion stellt hier einen Vorteil für die BZ-Technologie dar.

#### *Kraftwerke zur Stromversorgung*

Schließlich ist ein vierter Anwendungsbereich für stationäre BZ auszumachen: der Einsatz von großen Modulen, die im Wesentlichen auf die Produktion von Spitzenlast in der Stromversorgung ausgelegt und optimiert sind, z. T. aber auch im KWK-Betrieb eingesetzt werden. Hier geht es um Anlagen um bzw. größer als 1 MW<sub>el</sub>.

Dieser Bereich wird von Hochtemperatur-Brennstoffzellen dominiert, die v.a. bei der reinen Stromerzeugung durch ihre hohe Energieeffizienz bestehen. Zentraler Optimierungsparameter sind auch in diesem Bereich die Erzeugungskosten. Ein wichtiger Vorteil der BZ liegt darin, dass sie sehr flexibel auf Lastschwankungen reagieren und damit als Spitzenlastkraftwerke (Intervallbetrieb) eingesetzt werden können. Als Kunden treten zum einen Elektrizitätsversorgungsunternehmen auf, zum anderen sind es Industriebetriebe, bei denen die BZ ebenfalls Lastspitzen „abfährt“, z. T. aber auch Prozessdampf liefert, vgl. Abbildung 9.

Inwiefern sich die BZ in diesem Anwendungsbereich durchsetzen kann hängt auch von der weiteren technischen und kostenseitigen Entwicklung bei Gasturbinen ab, die heute typischerweise Spitzenlasten abdecken. Aus heutiger Sicht bedarf die BZ-Technologie noch einer wesentlichen Weiterentwicklung, bevor sie sich in diesem vierten Anwendungsbereich verbreiten kann.



BZ-Typ	PAFC	PEMFC	SOFC	MCFC
Brennstoff	Wasserstoff	Erdgas	Methanol	Biogas
Betriebsmodus	Nur Stromerzeugung		KWK-Betrieb	
Laufzeit / Betriebsdauer	Temporär	Intervall	Dauerbetrieb	
Anlagengröße	Klein (< 15 kW)	Mittel (50-250 kW)	Groß (> 1 MW)	
Kundensegment	Privatkunden	Wohnungsbau gesellschaften	Industrie	Stromwirtschaft

Abbildung 9: Charakteristika des Anwendungsbereichs Kraftwerke

Die nachstehende Tabelle listet die oben im Text diskutierten Einflussfaktoren insgesamt auf und stellt im Vergleich dar, wie stark sich diese jeweils auf die vier Anwendungsbereiche auswirken.

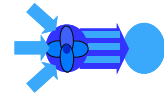
Tabelle 4: Vergleich der Auswirkung verschiedener Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Anwendungsbereiche

	USV	Mikro-KWK	Mini-KWK	Kraftwerke
Rückgang Versorgungssicherheit bzw. höherer Anspruch	++	+	+	o
Staatliche Förderung KWK-Anlagen	o	++	+	o
Brennstoffzelle als Lifestyle-Element	o	++	+	o
Zunahme Akzeptanz Installateure	o	++	+	o
Firmenimage (Umwelt) wichtig	o	o	+	+
Durchbruch Kostensenkung BZ	+	+	++	++
Verbreitung EE bei der Heizung	o	--	-	o
Fortschritt USV-Konkurrenztechnologien	--	-	-	o
Fortschritt KWK-Konkurrenztechnologien	o	-	--	-
Fortschritt bei kleinen Gasturbinen	o	o	-	--

Erklärung: ++ starker Einfluss, + mittlerer Einfluss, o kein Einfluss, - negativer Einfluss, -- stark negativer Einfluss

## 5.2 Organisatorische Variation: Rollenmodelle

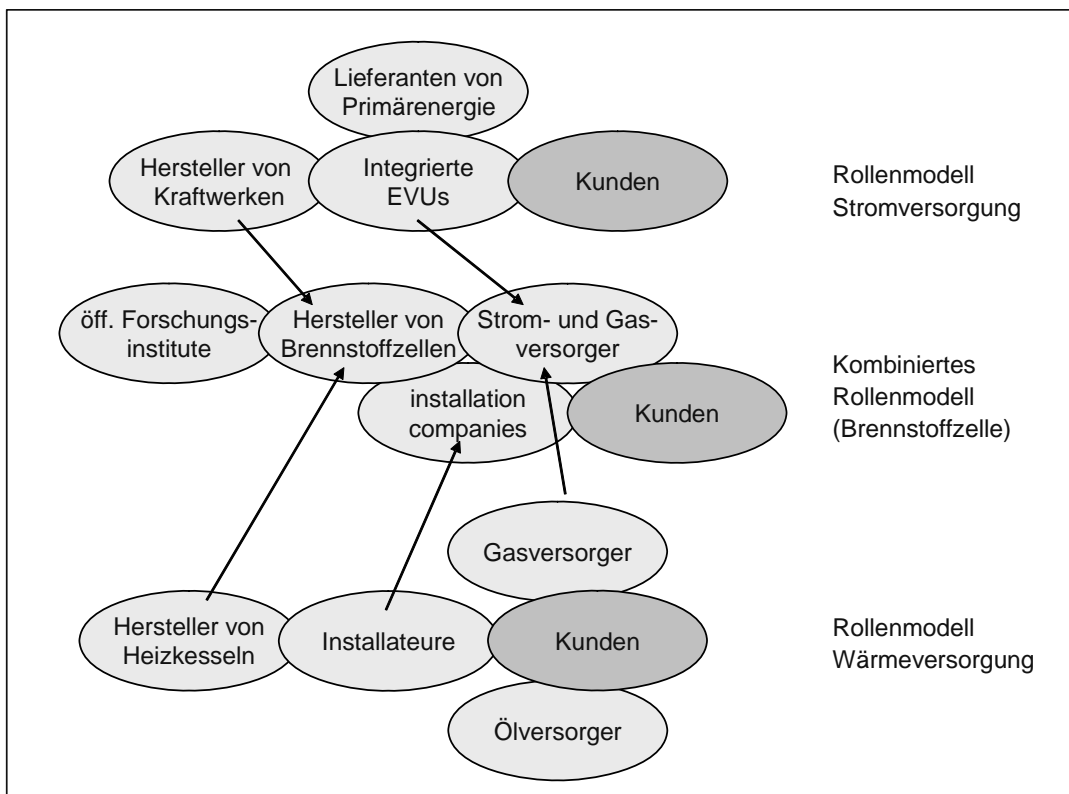
In organisatorischer Hinsicht lassen sich ebenso wie in technischer Hinsicht verschiedene Dimensionen der Variation unterscheiden. Auf der Ebene einzelner Unternehmen, geht es um die Frage, wie die Innovationsaktivitäten und -projekte intern organisiert werden (z.B. Teil des F&E Bereichs, eigenständige Geschäftseinheit, Tochtergesellschaft etc.). Auf der Ebene des Innovationssystems geht es darum, wie die Wertschöpfungskette der Innovationsaufgaben (vgl. Abbildung 3) im Einzelnen organisiert ist, d.h. ob der Innovationsprozess eher integriert ist oder auf einer ausgeprägten Aufgabenteilung zwischen verschiedenen Unternehmen basiert, welche Akteurgruppen welche Aufgaben übernehmen oder welchen Ursprung die beteiligten Unternehmen haben.



Die nachfolgende Analyse konzentriert sich auf die organisatorische Variation auf der Ebene des Innovationssystems, d.h. auf mögliche Konstellationen des Zusammenwirkens verschiedener Akteur bzw. Akteurguppen. Das Ziel ist es grundlegende Rollenmodelle zu identifizieren und daraufhin zu untersuchen, welche Einflussfaktoren für oder gegen die Realisierung des jeweiligen Rollenmodells sprechen.

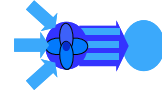
*Kombiniertes Rollenmodell*

Heute ist die Aufgabenteilung im Innovationssystem insbesondere im Segment kleiner BZ-Geräte dadurch geprägt, dass den Geräteherstellern, den Elektrizitäts- und Gasversorgungsunternehmen und auch den Installateuren zentrale Aufgaben zukommen (vgl. Abbildung 3, S. 13).<sup>25</sup> Dabei arbeiten Firmen aus dem Wärmeversorgungssektor und der Stromversorgung, deren Geschäftsaktivitäten ursprünglich weitgehend separat ablaufen, zusammen. Diese Situation kann man auch so umschreiben, dass zwei verschiedene Rollenmodelle der Versorgung, das des Strommarktes und das des Wärmemarktes, zusammentreffen und kombiniert werden, vgl. Abbildung 10 (stark vereinfachte Darstellung).



**Abbildung 10: Rollenmodelle Strom- und Wärmemarkt sowie ihre Kombination im Fall stationärer Brennstoffzellen**

<sup>25</sup> Die dargestellten Aufgaben und deren Aufteilung werden selbstverständlich von Projekt zu Projekt variieren, d.h. nicht in allen Fällen arbeiten die genannten Akteurguppen in der gleichen Weise zusammen. Zum Teil sind die einzelnen Aufgaben, die jeder Akteur wahrnimmt, verschieden, z. T. sind aber auch nicht alle Akteurguppen beteiligt.



Erläuterung zur Abbildung: Im Strommarkt nehmen (integrierte) Elektrizitätsunternehmen eine zentrale Rolle ein. Sie kaufen Primärenergieträger ein, erzeugen in Kraftwerken Elektrizität und liefern diese an die Endverbraucher. Auf dem Wärmemarkt besteht das vorherrschende Rollenmodell aus Anlagenherstellern (Fertigung der Heizungsanlagen), Installateuren (Anlagenplanung, Installation, Wartung und Störungsdienst) sowie Energielieferanten in Form von Öl- oder Gasversorgern.

Für das kombinierte Rollenmodell sprechen insbesondere die größere Flexibilität und die Aufteilung der Risiken in der frühen Phase der Entwicklung von Brennstoffzellen. Solange die Technologie viel Betriebs-Know-How und einen hohen Wartungsaufwand erfordert, werden Kunden auch eher Contracting-Angebote bevorzugen. Mit zunehmender Reife und Robustheit der Technologie, aber auch bei sinkenden Investitionskosten ist es hingegen möglich, dass die Bedeutung von Contracting-Angeboten abnimmt.<sup>26</sup>

#### *Rollenmodell 'Strommarkt'*

Eine organisatorische Variante im Vergleich zur heutigen Situation wäre eine Rollen- und Aufgabenverteilung im Bereich stationärer BZ, die in etwa den derzeitigen Verhältnissen bei der Stromversorgung entspricht. In diesem Fall nehmen EVUs eine zentrale Position im Innovationssystem ein, indem sie Kundenberatung, Planung, Finanzierung & Einkauf sowie Wartung und Betrieb der BZ organisatorisch bündeln. Damit gewinnt zugleich das Anlagen-Contracting als Produkt an Bedeutung und die lokalen Handwerksbetriebe geraten unter Druck, weil einige ihre Leistungen von den EVUs übernommen werden können, vgl. Abbildung 11. Zudem ist denkbar, dass die Energieversorger einige Aufgaben ausführen, die heute noch bei den Herstellern liegen.

---

<sup>26</sup> Hier muss betont werden, dass die Produktform (Contracting ja/nein) nicht unmittelbar mit dem Marktmodell verknüpft ist.

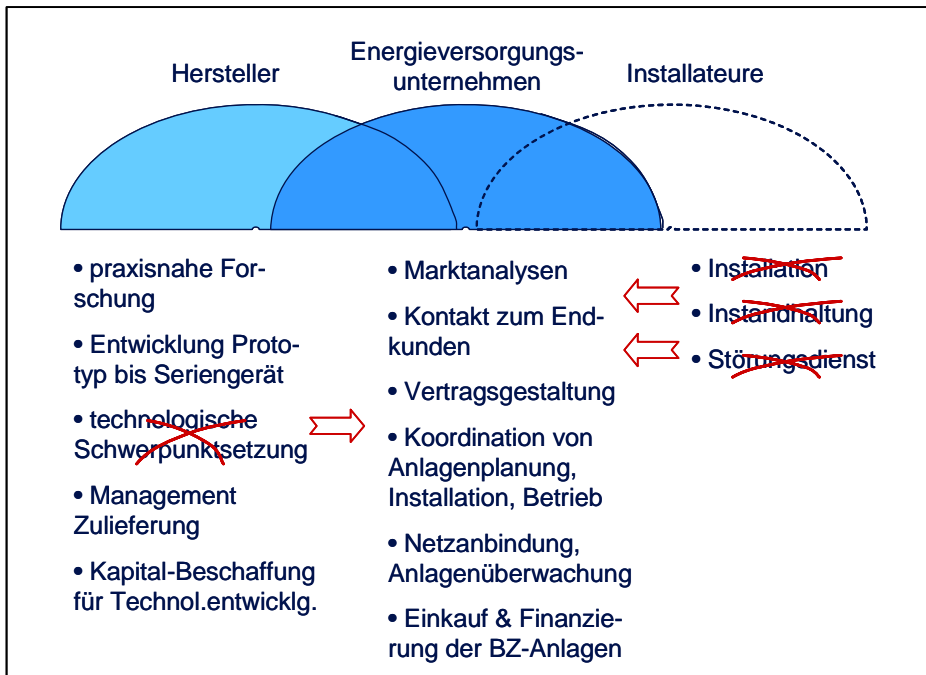
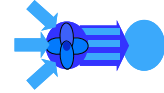


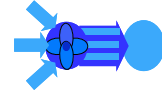
Abbildung 11: Mögliche Veränderungen infolge einer Übertragung des Rollenmodells 'Strommarkt' auf die Brennstoffzelle

Ein wichtiger Einflussfaktor zugunsten des Rollenmodells 'Strommarkt' wäre eine Zunahme des Wettbewerbs im Elektrizitätssektor - insbesondere mit Blick auf kundennahe, integrierte Energiedienstleistungen. Die ersten Erfahrungen mit der Liberalisierung haben gezeigt, dass insbesondere Preisargumente eine wichtige Rolle im Wettbewerb spielen und dass komplexe Energiedienstleistungen eher zurückhaltend von den Kunden nachgefragt werden. Diese Situation könnte sich jedoch ändern, wenn die Strom- bzw. Energiepreisen weiterhin steigen.

Darüber hinaus ist zu beobachten, dass einige Stromversorgungsunternehmen im Zuge der Marktliberalisierung Anstrengungen und strategische Neuausrichtungen in Richtung Energiedienstleistungsangebote unternommen haben. Insbesondere im Bereich Brennstoffzellen verfolgen einige EVUs bereits heute die Strategie, sich als Marktführer zu behaupten (Markard 2004). Zum einen könnten solche Pioniere andere Unternehmen dazu bewegen, Gleiches zu tun. Zum anderen zeigt dieses Beispiel auch die Möglichkeiten einer strategischen Vielfalt unabhängig von eventuell vorherrschenden Trends in Richtung eines bestimmten Marktmodells.

#### Rollenmodell 'Wärmemarkt'

Eine weitere Variante in der Konstellation von Akteuren ist dadurch gekennzeichnet, dass die Installateure und z. T. auch die Anlagenhersteller wesentliche Aufgaben übernehmen, die heute noch bei den EVUs liegen. Hierzu zählen etwa die Gesamtplanung, der Einkauf der BZ-Geräte oder auch Aufbau und Pflege von Endkundenkontakten. Bestimmend für das Wärmemarktmodell ist aber auch, dass die Endkunden eine wichtige Rolle spielen. Sie übernehmen dann wie bei konventionellen Heizungen die Finanzierung der Anlage und auch den Einkauf der Primärenergieträger (Erdgas).



Ein solches Rollenmodell reduziert die Bedeutung der EVUs im Geschäftsfeld stationäre Brennstoffzelle auf ein Minimum von Aufgaben wie Netzanbindung oder Strommessung, vgl. Abbildung 12. Zugleich könnte dieses Modell mit einer deutlich geringeren Bedeutung von Contracting-Angeboten einhergehen.

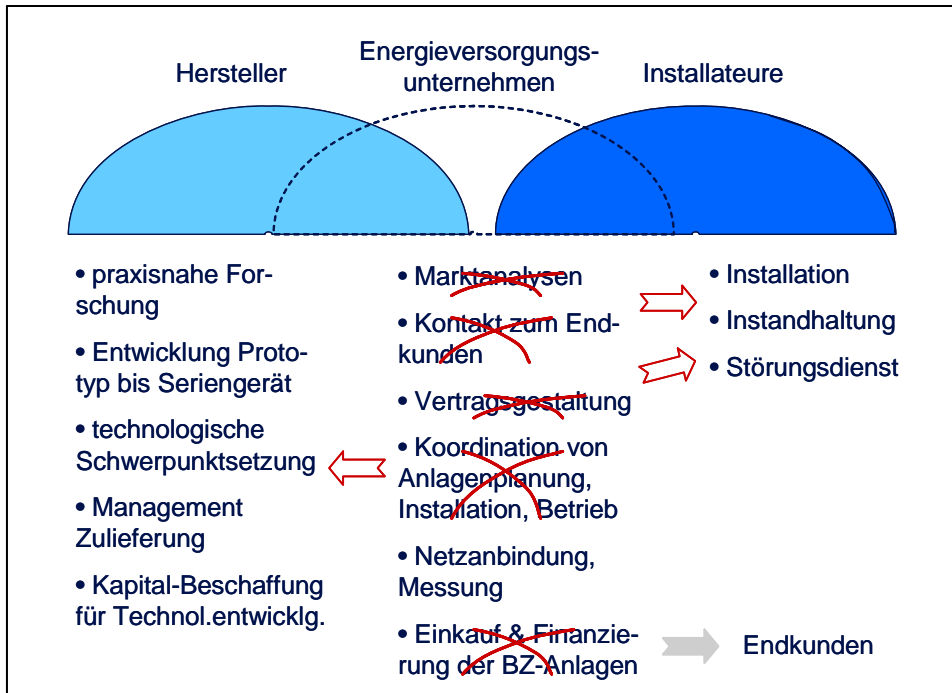
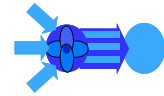


Abbildung 12: Mögliche Veränderungen infolge einer Übertragung des Rollenmodells 'Wärmemarkt' auf die Brennstoffzelle

Die Verbreitung des Rollenmodells 'Wärmemarkt' wird davon abhängen, wie robust und einfach die BZ im täglichen Betrieb sind, da es hier letztlich um einen „Kauf von der Stange“ geht. Es ist davon auszugehen, dass eine weite Verbreitung der BZ-Technologie und sinkende Investitionskosten eher dazu führen, dass die Dienstleistungspakete (insbesondere das Contracting) im Zusammenhang mit der Brennstoffzelle abnehmen.

*Rollenmodell Newcomer*

Ein viertes Rollenmodell ist durch das Auftreten von Newcomern geprägt, d. h. von Unternehmen, die bislang nicht im Wärme- oder Strommarkt tätig waren. In diesem Sinne branchenfremde Firmen sind heute nur im Bereich der Herstellung von Brennstoffzellen aktiv. Im hier betrachteten Rollenmodell werden hingegen auch andere Aufgabenfelder von Newcomern übernommen. Im Extremfall tritt ein neuer Anbieter auf dem Markt für stationäre Brennstoffzellen auf, der alle zentralen Aufgabenbereiche der Wertschöpfungskette integriert. Eine solche Positionierung könnte aus einer ursprünglichen Rolle als Hersteller heraus entwickelt oder durch ein entsprechend kapitalstarkes Unternehmen „von Null aus“ aufgebaut werden. Aus heutiger Sicht entspricht diese Entwicklung der am weitesten reichenden Veränderung der Wertschöpfungskette im Bereich Strom- und Wärmeversorgung.



Das Rollenmodell Newcomer wird möglicherweise dann eine viel versprechende Option werden, wenn die Brennstoffzelle einen hohen Verbreitungsgrad hat und entsprechend profitabel ist.

In Tabelle 5 sind die oben genannten Einflussfaktoren im Hinblick auf ihren Beitrag zur Realisierung der unterschiedlichen Rollenmodelle aufgeführt.

**Tabelle 5: Vergleich der Wirkung unterschiedlicher Faktoren auf die Realisierung der Rollenmodelle**

	Kombi	Strommarkt	Wärmemarkt	Newcomer
BZ birgt noch viele Unsicherheiten	++	o	o	o
Steigende Energiepreise	o	+	o	o
Starker Wettbewerb im Strommarkt	+	++	+	o
BZ ist technologisch robust	+	o	++	+
BZ weit verbreitet und profitabel	o	o	++	++

Erklärung: ++ starker Einfluss, + mittlerer Einfluss, o kein Einfluss, - negativer Einfluss, -- stark negativer Einfluss

### 5.3 Zusammenhänge zwischen Anwendungsbereichen und Rollenmodellen

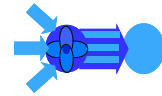
In diesem Abschnitt wird für jeden der vier Anwendungsbereiche diskutiert, inwieweit die verschiedenen Rollenmodelle mit den jeweiligen Anforderungen gut in Einklang zu bringen sind oder eher nicht nahe liegen. Tabelle 6 stellt die Resultate in der Übersicht dar.

#### Anwendungsbereich USV

Das Geschäftsfeld USV ist losgelöst von der Wärmeversorgung. Insofern ist davon auszugehen, dass weder das Wärmemarktmodell noch das Kombinationsmodell für BZ-USV-Anwendungen von Bedeutung sein werden. Konventionelle USV-Anlagen werden heute vor allem von Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau angeboten. Einige von ihnen, wie etwa Siemens oder MTU sind gleichzeitig in der Herstellung von Brennstoffzellen aktiv. Daher ist auch in Zukunft damit zu rechnen, dass Newcomer hier eine wichtige Rolle spielen. Daneben ist auch denkbar, dass EVUs im Fall einer Abnahme der allgemeinen Versorgungssicherheit mit für sie neuen Angeboten in Form von USV-Einrichtungen auf den Markt kommen, um ihre Kunden gegen Ausfälle technisch abzusichern.

#### Anwendungsbereich Mikro-KWK

Das Geschäftsfeld Mikro-KWK hat viele Ähnlichkeiten mit der heutigen Wärmeversorgung. Vor diesem Hintergrund ist nahe liegend - und auch anhand erster Reaktionen von Herstellern und Installateuren zu beobachten, dass die im Wärmemarkt etablierten Unternehmen auch in Zukunft diese Feld besetzen möchten. Das spricht zum einen für das Kombinationsmodell, auf mittlere Sicht aber auch für die Realisierung des Wärmemarktmodells.



Es ist ebenfalls denkbar, dass EVUs die Rolle der Installateure bei der Hausenergieversorgung übernehmen und dass damit das Strommarktmodell in diesem Anwendungsbereich Bedeutung erlangt. Andererseits ist das Geschäft mit Mikro-KWK-Anlagen sehr „kleinteilig“ und gleichzeitig aufwändig. Das mag gerade für große EVUs nicht profitabel genug erscheinen. Die vierte organisatorische Variante, der Einstieg von Newcomern, erscheint im Bereich Mikro-KWK wahrscheinlich, weil insbesondere der Kontakt zu der Vielzahl von Endkunden eine zentrale Ressource darstellt, die für neue Firmen nicht leicht aufzubauen sein dürfte.

*Anwendungsbereich Mini-KWK*

Bei der Mini-KWK gelten im Grunde ähnliche Zusammenhänge wie im Bereich Mikro-KWK. Es ist allerdings davon auszugehen, dass die EVUs ein höheres Interesse an einer Marktdominanz als im Fall der Mikro-KWK haben, weil die mit der Mini-KWK verbundenen Erzeugungskapazitäten insbesondere vor dem Hintergrund „virtuelle Kraftwerke“ eine Bedeutung erlangen dürften. In diesem Größen- und Leistungsbereich ist auch das Anlagencontracting attraktiver als bei Kleinanlagen. Gleichzeitig könnte der damit verbundene Kapitalbedarf eine Einstiegsbarriere für Installateure und KMUs sein. Dennoch werden dem Wärmemarkt-Modell grundsätzlich Realisierungschancen eingeräumt. Schließlich könnte auch das Newcomer-Modell hier eine Bedeutung erlangen.

*Anwendungsbereich Kraftwerke*

Das Geschäftsfeld kleiner Kraftwerke wird vermutlich eher für etablierte EVUs als für die Akteure des Wärmemarktes eine Bedeutung erlangen. Dementsprechend ist zu erwarten, dass sich ein Rollenmodell entwickelt, das dem der heutigen Strommarkt-Organisation ähnelt. Es ist jedoch auch denkbar, dass Newcomer einen Anteil im Geschäftsfeld beanspruchen werden.

*Zusammenfassung*

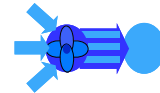
In der Gesamtschau ergibt sich folgendes Bild: Im Anwendungsbereich USV sind die Synergien im Bereich Strom- und Wärmemarkt eher gering, während sich aus der Sicht von Newcomern durchaus interessante Geschäftsfelder ergeben können, vgl. Tabelle 6.

**Tabelle 6: Zusammenhänge zwischen technischer und organisatorischer Variation**

	Kombi	Strommarkt	Wärmemarkt	Newcomer
USV	o	+	o	++
Mikro-KWK	++	+	++	o
Mini-KWK	+	++	++	+
Kraftwerke	o	++	o	+

Erklärung: ++ hohe Synergien, + Synergien vorhanden, o keine oder nur geringe Synergien

Demgegenüber sind die Varianten bzw. Synergieeffekte der zukünftigen organisatorischen Entwicklung in den Bereichen Mikro- und Mini-KWK eher vielfältig, so dass hier noch am ehesten mit Veränderungen gegenüber der heutigen Situation



(markiert durch Kreise) zu rechnen ist. Insbesondere das Wärmemarktmodell ist in beiden Anwendungsbereichen attraktiv. Bei den Kraftwerken sind erhebliche Synergien mit dem Strommarktmodell zu erwarten. Mit Blick auf verschiedene Unternehmen lässt sich festhalten, dass die EVUs (Strommarktmodell) in allen Anwendungsbereichen eine zentrale Rolle spielen können. Abgesehen vom Bereich USV tun sie dies auch bereits, so dass sich ein „organisatorischer Lock-in-Effekt“ ergeben könnte, d.h. dass durch den frühen Markteintritt Barrieren für nachfolgende Unternehmen aus anderen Geschäftsfeldern entstehen. Zudem ist mit Synergien zu rechnen, wenn ein EVU gleichzeitig in mehreren Bereichen tätig ist.

## 6 Szenarioanalyse

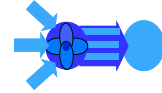
Das Ziel der Szenarioanalyse ist es, das Verständnis über die Entwicklungsoptionen des Innovationssystems stationäre Brennstoffzelle zu vertiefen. Als Einstieg wird dargestellt, welche großen Zukunftsbilder bzw. Visionen mit der BZ-Technologie verbunden sind. In einem nächsten Schritt werden heute vorherrschende Erwartungen erörtert. Mit diesen beiden Schritten werden quasi Start und Ziel der Entwicklung grob umrissen. Im anschließenden Kern der Szenarioanalyse werden vier Szenarien erarbeitet, die beschreiben, wie das Innovationssystem bzw. Geschäftsfeld in 20 Jahren aussehen könnte. Die Szenarien basieren zum einen auf den Erkenntnissen der Variationsanalyse (Stichwort: Spielräume und nahe liegende Konfigurationen) und zum anderen auf vier Makro-Szenarien, die im Rahmen des IMV Projektes erstellt wurden und gesamthaft die Entwicklung in den Versorgungssektoren betrachten.

### 6.1 Visionen

Wegen des frühen Entwicklungsstadiums der Technologie und der damit verbundenen Unsicherheiten ist der fachliche Diskurs über stationäre Brennstoffzellen, aber auch das Innovationsgeschehen stark von Erwartungen an eine zukünftige Entwicklung und von entsprechenden Visionen geprägt (Ruef 2005). Zwei Zukunftsvisionen, die Wasserstoffgesellschaft und virtuelle Kraftwerke sind dabei besonders hervorzuheben.

Der Begriff Wasserstoffgesellschaft steht für eine weitgehend regenerative Energiewirtschaft, in der Wasserstoff als Energiespeichermedium eine zentrale Rolle spielt. Wasserstoff wird mit Hilfe regenerativer Energien erzeugt (z.B. in solaren Großkraftwerken in sonnenreichen, entlegenen Gebieten) und dann als universeller Energieträger über ein Gasleitungsnetz für verschiedene Anwendungen zur Verfügung gestellt (Rifkin 2002). Die Brennstoffzelle ist in diesem Zusammenhang eine häufig genannte Schlüsseltechnologie zur Umwandlung des Wasserstoffs in Strom und Wärme - im stationären Bereich, aber auch im Transportsektor.

Als virtuelles Kraftwerk wird ein Netzwerk von kleinen Energieerzeugungseinheiten bezeichnet, die über elektronische Steuerungs- und Regelungssysteme so miteinander verbunden sind, dass sie die wesentlichen Funktionen von herkömmlichen Großkraftwerken, eine bedarfsorientierte Stromerzeugung und Netzstabilisierung, erfüllen (z. B. Pehnt *et al.* 2006, S. 13).



Die beiden Visionen sind auf unterschiedlichen Ebenen angesiedelt. Während virtuelle Kraftwerke einen Baustein im System der Stromversorgung darstellen, wird mit der Wasserstoffgesellschaft ein umfassender Gegenentwurf zur heutigen, überwiegend fossil-nuklearen Energiewirtschaft gemacht. Beide Visionen sind miteinander kompatibel und man kann virtuelle Kraftwerke als einen möglich, nicht jedoch notwendigen Schritt auf dem Weg zur Wasserstoffgesellschaft auffassen.

Weder das Konzept der virtuellen Kraftwerke, noch die Vision der Wasserstoffgesellschaft sind spezifisch auf die Brennstoffzellentechnologie zugeschnitten. Virtuelle Kraftwerke basieren auf dezentralen Stromerzeugungstechnologien im Allgemeinen und in einer Wasserstoffwirtschaft können ebenso ganz verschiedene Umwandlungstechnologien genutzt werden. Dass beide Visionen dennoch eng mit der Brennstoffzelle verkoppelt sind, liegt vermutlich daran, dass die Brennstoffzelle sehr gut mit beiden Visionen vereinbar ist. Mehr noch, sie stellt eine Technologie dar, die eine direkte Verbindung zwischen den Visionen aufbaut.

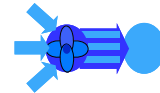
## 6.2 Vorherrschende Erwartungen

Technologische Versprechen und Erwartungen tendieren dazu, übersteigert zu werden, denn sie werden von Verfechtern der Innovation als strategisches Mittel verwendet, um – in Konkurrenz mit anderen Erwartungen – Interessen und Ressourcen zu mobilisieren (Geels & Smit 2000). Eine ähnliche Dynamik ist auch im Fall der Brennstoffzellentechnologie festzustellen.

Ende der 90er Jahre erlangte die Brennstoffzellentechnologie insbesondere als Antriebsalternative im Automobilbereich große Aufmerksamkeit in der Fachpresse und in der allgemeinen Öffentlichkeit. Der Brennstoffzellentechnologie wurde eine viel versprechende Zukunft (u.a. im Zusammenhang mit den Visionen Wasserstoffwirtschaft und Virtuelle Kraftwerke) vorausgesagt und eine Markteinführung für verschiedene Anwendungen in wenigen Jahren (ab 2003-2005) als realistisch betrachtet. Im Bereich der stationären Anwendungen konzentrierten sich die Erwartungen zunehmend auf eine kurzfristige Markteinführung von Mikro-KWK-Brennstoffzellen als „Kraftwerke im Keller“. Es entstand ein medialer Hype, der 2001 einen vorläufigen Höhepunkt erreichte (Ruef 2005). Seitdem ist die Medienaufmerksamkeit eingebrochen und es kam sowohl im mobilen wie auch im stationären Bereich zu einer Reihe von Rückschlägen, präziser ausgedrückt: die hohen Erwartungen konnten nicht erfüllt werden. Sowohl BZ-Hersteller als auch die Anbieter von Endprodukten mussten ihre Prognosen zu Fertigungszahlen oder Markteinführungsterminen nach unten korrigieren.

Heute verzichtet man daher vielfach auf konkrete Prognosen oder formuliert diese vorsichtiger. Konkret bedeutet das, dass man vor 2010 nicht mehr mit einer breiten Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie rechnet.

Trotz dieser Phase der Ernüchterung arbeiten nach wie vor eine große Zahl von Unternehmen und Forschungseinrichtungen an der Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie in allen drei Hauptanwendungsbereichen. Es kann sogar angenom-



men werden, dass der Hype um die Brennstoffzellentechnologie nicht wenige der Innovationsaktivitäten überhaupt erst angeregt hat, die nun weitergeführt werden.

Im Bereich Mikro-KWK sind ab dem Jahr 2000 alle großen Heizungshersteller des deutschen Markts in die Entwicklung von Brennstoffzellenheizgeräten eingestiegen, nachdem bis Ende der 1990er Jahre nur Sulzer Hexis und Vaillant in dem Bereich aktiv waren. Die Mehrzahl der heute zahlreichen Länderinitiativen rund um Wasserstoff und Brennstoffzellen sind ebenfalls erst in den letzten Jahren entstanden und die deutsche Förderpolitik hat mit dem ZIP ab 2001 neue Impulse bekommen (vgl. Kapitel 2.5 und 2.6). Wie dauerhaft die entstandenen Innovationsnetzwerke sich etabliert haben, wird sich weisen, gewisse institutionelle Trägheiten dürften aber einen unmittelbaren Abbruch der Innovationstätigkeit im Bereich Brennstoffzellentechnologie weiterhin verhindern.

Auch wenn vier Jahre nach dem Höhepunkt der einvernehmlich euphorischen Stimmung vermehrt skeptische Stimmen zu vernehmen sind, so ist die grundsätzlich optimistische Grundhaltung gegenüber der Zukunft der Brennstoffzellentechnologie erhalten geblieben. Es wird weiterhin von einer zukünftigen Marktfähigkeit der Brennstoffzellentechnologie im stationären Bereich ausgegangen, welche mit einer Senkung der Produktionskosten durch die Produktion großer Stückzahlen erreicht werden soll.

**Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V., 08.07.2005**

“Die Brennstoffzellenentwicklung ist in den meisten Anwendungsfeldern im Bereich der Felderprobung von Prototypen angelangt. Die letzte und größte Hürde für eine erfolgreiche Markteinführung ist das Erreichen eines Kostenlevels, vergleichbar den am Markte bereits etablierten, konventionellen Produkten. Vor dem Hintergrund, dass Brennstoffzellen bisher nur in kleinen Stückzahlen und oftmals manuell gefertigt werden sind die Hersteller davon überzeugt, dass in einer Großserienfertigung die Herstellkosten mit heutigen Materialien auf die Zielwerte gesenkt werden können.”<sup>27</sup>

Der kürzlich angekündigte Rückzug eines der Pioniere der Brennstoffzellen-Entwicklung, Sulzer-Hexis, aus dem Brennstoffzellengeschäft wird vorerst als spezifisches Entwicklungsproblem des Konzerns gewertet und nicht als generelles Scheitern der Brennstoffzellentechnologie interpretiert.

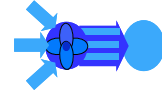
**Werner Stützel, Redaktor des VWEW-Newsletters „Treffpunkt Wasserstoff und Brennstoffzelle“, Nr. 173, 30. August 2005**

Man spricht von offensichtlichen technologischen Problemen, die man bei Sulzer Hexis nicht in den Griff bekommen habe. Etwa: "Die offene Nachverbrennung am Stack ist nicht zielführend." Verwundert zeigt man sich auch über den kurzen Atem des Konzerns. Habe man doch noch auf der Hannover-Messe 2005 das Brennstoffzellen-Heizgerät "Galileo" vorgestellt und wolle wohl aus Kostengründen nicht abwarten, wie das Produkt nun tatsächlich "läuft". (...) Es zeige sich, so wurde gegenüber der Newsletter-Redaktion betont, dass die Entwicklungsphase der Brennstoffzellen-Technologie noch nicht abgeschlossen sei und man sich deshalb nicht in die Falle von Erfolgsprognosen begeben solle, die nicht einzuhalten sind.

Die Erwartungen an die Brennstoffzellentechnologie sind also nach wie vor hoch, wenn auch pragmatischer und eher längerfristig orientiert im Vergleich zu den Zeiten des Hypes 2001.

---

<sup>27</sup> Vgl. <http://www.diebstoffzelle.de/nachrichten/ExpertenbrtenberdemHenne-EiDilemmaderBrennstoffzellen-Entwicklung.shtml>



### 6.3 Makro-Szenarien: Veränderungen auf der Regime-Ebene

Für die Betrachtung der zukünftigen Entwicklungsoptionen des Innovationssystems werden zunächst potenzielle Veränderungen im Umfeld (Makro-Ebene) betrachtet. Den Ausgangspunkt dieses Abschnittes bilden vier Szenarien zur Zukunft der Versorgungssektoren im Jahr 2025, die im Rahmen des IMV-Projektes entwickelt wurden (Jäger *et al.* 2004).

Nachfolgend werden für jedes Szenario insbesondere die Veränderungen herausgearbeitet und zusammengefasst, die für die Bereiche Strom- und Wärmeversorgung relevant sind.

Ziel des Abschnittes ist es, die zentralen Eigenschaften der zukünftigen Regimestrukturen darzustellen und insbesondere Rückschlüsse auf die jeweilige Regimestärke zu ziehen, welche wiederum zentral ist für die Entwicklungen auf der Ebene des Innovationssystems.

#### *Szenario A: Dezentralisierung der Stromversorgung und intensiver Wettbewerb*

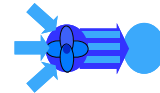
Stromversorgung: Auch wenn zentrale Kraftwerke bzw. Anlagenparks nach wie vor die Stromerzeugung dominieren, ist die Dezentralisierung weit fortgeschritten, d.h. mehr als 20% der Elektrizität werden dezentral erzeugt. Davon entfällt ein Großteil auf dezentrale, regenerative Energien, aber auch dezentrale KWK-Anlagen auf der Basis von Erdgas haben einen nennenswerten Anteil von 7,5 % an der Stromerzeugung. Der Energieträger-Mix verschiebt sich deutlich in Richtung Erdgas (45% der gesamten Stromerzeugung) und erneuerbare Energien (30%).

Die Topologie des Stromnetzes hat sich ebenfalls verändert. Bei den Verteilnetzen (v. a. Mittelspannungsbereich) wurden entsprechend des hohen Anteils dezentraler Anlagen die Leitungskapazitäten ausgebaut. Bei den Übertragungsnetzen (Hoch- und Höchstspannungsleitungen) hat ein Ausbau in Küstennähe stattgefunden, um die großen Offshore-Windparks einzubinden. Die generelle Bedeutung der Übertragungsnetze ist zurückgegangen, weil Erzeugung und Nachfrage zunehmend auf der Verteilnetzebene ausgeglichen werden. Die Trägheiten und Beharrungstendenzen des Regimes der zentralen Stromerzeugung haben sich abgeschwächt.

Der Wettbewerb auf dem Strommarkt hat stark zugenommen und eine Vielzahl kleiner und größerer Elektrizitätsunternehmen ist auf dem Markt aktiv. Die EVUs sind herausgefordert, sich über Energiedienstleistungsangebote zu differenzieren.

Wärmeversorgung: Die Wärmeversorgung basiert nun auf einer Vielzahl von fossilen und regenerativen Erzeugungs- bzw. Umwandlungstechnologien. Dazu zählen konventionelle Heizkessel (Erdgas und Öl), Holzgefeuerte Heizungen, Solarthermie-Anlagen, Wärmepumpen sowie KWK-Geräte (Gasmotoren, Stirlingmotoren, Brennstoffzellen). Gleichzeitig ist der Raumwärmebedarf durch energiesparendes Bauen deutlich zurückgegangen, so dass KWK-Geräte vielfach ohne zusätzliches Spitzelastaggregat eingesetzt werden können.

Vor diesem Hintergrund sind viele, unterschiedlich ausgerichtete Unternehmen auf dem Wärmemarkt tätig, darunter auch zahlreiche EVUs. Mittlere und größere Hand-



werksbetriebe sowie Ingenieurbüros können eine breite Palette von Anlagen planen, installieren und warten. Daher ist eine wesentlich höhere Flexibilität beim Handwerk vorhanden, wenn es darum geht, den Kunden verschiedene Erzeugungs- bzw. Umwandlungstechnologien zur Auswahl anzubieten. Gleichzeitig sind die Kunden gewohnt, wesentlich differenziertere Investitions- bzw. Technologieentscheidungen hinsichtlich ihrer Energieversorgung zu treffen. Auch die eigene Stromerzeugung hat eine gewisse Selbstverständlichkeit erlangt.

In Bezug auf das Gasnetz hat ein weiterer Ausbau stattgefunden, so dass insbesondere in Ballungsgebieten sämtliche Gebäude über einen entsprechenden Anschluss verfügen. Das Gas besteht nicht mehr nur aus fossilem Erdgas, sondern zu einem wesentlichen Anteil aus Biogas. Des Weiteren gibt es einige Neubaugebiete und städtische Viertel, in denen Wasserstoffleitungsnetze in Betrieb sind. In diesen Fällen genießt der Einsatz von Brennstoffzellen durch gesetzliche Bestimmungen und Fördermaßnahmen Priorität gegenüber anderen KWK-Technologien.

Gesamtbetrachtung: Da der Anteil von (zentralen & dezentralen) KWK-Anlagen deutlich gestiegen ist, sind die Bereiche Strom- und Wärmeversorgung stärker miteinander verkoppelt als heute. Auf die große Vielfalt an Umwandlungs- und Erzeugungstechnologien hat diese Verkoppelung jedoch keinen negativen Einfluss. Sowohl bei der Stromversorgung als auch im Wärmemarkt haben die Trägheiten abgenommen und die Versorgungssysteme sind durch eine hohe technologische Vielfalt geprägt. Im Stromsektor hat nicht nur die Dominanz der zentralen Erzeugungsstrukturen abgenommen, sondern es hat sich auch ein stabiles „Parallelregime“ rund um die dezentrale KWK etabliert.

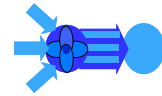
#### *Szenario B: Großtechnischer Umweltschutz und hoher Wettbewerb*

Stromversorgung: Der Anteil dezentraler Stromerzeugungsanlagen liegt in Szenario B bei 15% - niedriger als in Szenario A, gleichzeitig aber deutlich höher als heute. Wie in Szenario A spielen die erneuerbaren Energien mit 30% eine wichtige Rolle: in erster Linie durch ihre großtechnische Nutzung (z. B. Offshore-Windparks), aber auch im Bereich der dezentralen Erzeugung. Der Anteil von Erdgas am Energiemix beträgt 45% und Kohle wird noch zu 25% eingesetzt. Die Kernkraft wird nicht mehr genutzt.

Die Netzstrukturen haben sich zugunsten einer stärker dezentralen Erzeugung verändert, die „top-down Versorgung“ von den Übertragungs- in die Verteilnetze bleibt jedoch dominant.

Der Wettbewerb auf dem Strommarkt ist hoch und es treten verstärkt ausländische sowie mittelgroße inländische Unternehmen auf. Wie in Szenario A ist der Markt durch eine ausgeprägte Dienstleistungsorientierung gekennzeichnet. Der Staat treibt aktiv den Klima- und Umweltschutz voran.

Wärmeversorgung: Im Bereich der Wärmeversorgung gilt im Grunde ein ähnliches Bild wie in Szenario A. Der Anteil der Mikro-KWK-Anlagen ist jedoch geringer, dafür gibt es vermehrt Nahwärmenetze. Im Vergleich zu heute hat sich in Szenario B eine größere Bandbreite von Herstellern und Technologien etabliert. Dennoch ist die Situation nicht so innovativ und flexibel wie in Szenario A. Hinsichtlich der Akteurstrukturen sind vor



allein kleine und mittelgroße Elektrizitätsversorger mit KWK-Angeboten im kombinierten Strom- und Wärmemarkt tätig.

Die Veränderungen im Gasnetz sind vergleichbar mit denen in Szenario A, jedoch weniger ausgeprägt. So ist etwa der Biogasanteil im Gasnetz geringer und Wasserstoffnetze wurden nur in einzelnen Pilotprojekten aufgebaut - und auch dort nur zur Betankung von BZ-Fahrzeugen, noch nicht im Zusammenhang mit der Strom- bzw. Wärmeversorgung.

Gesamtbetrachtung: Auch in Szenario B sind die drei Sektoren stärker miteinander verflochten als heute. Diese Verkoppelung erreicht ein ähnliches Ausmaß wie in Szenario A; der geringere Anteil bei der dezentralen KWK wird durch einen höheren Beitrag zentraler KWK-Anlagen kompensiert. Die Trägheiten und Innovationshemmnisse haben generell abgenommen.

#### *Szenario C: Innovationsoffensive und Unternehmenskonzentration*

Stromversorgung: Die Struktur der Elektrizitätsversorgung ist durch einen moderaten Anteil dezentraler Erzeugungseinheiten (8.5%) und einen Großteil zentraler Kraftwerke auf der Basis von Kohle (50%) und Kernkraft (10%) geprägt. Insbesondere der Anteil der erneuerbaren Energien (zentral wie dezentral) ist deutlich geringer (10%) als in den Szenarien A und B; der Anteil von Erdgas am Energiemix beträgt knapp 20%. Die Netztopologie ist im Wesentlichen unverändert.

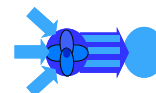
Der Wettbewerbsdruck ist hoch und der Markt wird von wenigen, international tätigen Großunternehmen beherrscht. Der Marktanteil kleiner EVUs ist gering. Neben der Unternehmenskonzentration zeichnet sich Szenario C allem durch eine breit angelegte, staatliche Innovationsoffensive aus.

Wärmeversorgung: Bei der Wärmeversorgung zeigt sich eine größere technologische Vielfalt als heute, aber die Marktanteile der neuen Technologien (Wärmepumpe, Solaranlagen, KWK-Technologien) sind eher gering. Dementsprechend sind auch die Veränderungen bei den Akteuren eher moderat. Stromversorgungsunternehmen sind nur selten auch im Bereich der Wärmeversorgung tätig. Die Bedeutung von Erdgas für die Wärmeversorgung hat zugenommen. Die Strukturen der Gasnetze haben sich im Vergleich zu heute kaum verändert.

Gesamtbetrachtung: In Szenario C sind Strom- und Wärmemarkt kaum miteinander verflochten. Die strukturellen Trägheiten sind in etwa gleich geblieben. Durch die Innovationsoffensive hat sich jedoch das Technologieportfolio, aus dem man auswählen kann, wesentlich erweitert.

#### *Szenario D: Technologische Stagnation und Oligopolstrukturen*

Stromversorgung: Die Erzeugungsstruktur wird, ähnlich wie heute, von zentralen Kraftwerken auf Braun- und Steinkohlebasis (50%), von der Kernkraft (10%) und von GuD-Anlagen (15%) beherrscht. Mit Blick auf die dezentralen Technologien findet in diesem Szenario der geringste Ausbau statt (7%). Die erneuerbaren Energien liegen wie in C bei lediglich 10%. Die Netztopologie ist weitgehend unverändert, d.h. geprägt durch die Stromerzeugung in zentralen Großkraftwerken.



Der Markt wird von einigen großen Anbietern dominiert und der Wettbewerb ist gering. Szenario D ist durch einen geringen Grad an Innovation gekennzeichnet.

Wärmeversorgung: Die Wärmeversorgung hat sich im Vergleich zu heute kaum verändert. Elektrizitätsversorger sind nur in Ausnahmefällen in der Wärmeversorgung aktiv.

Gesamtbetrachtung: Strom- und Wärmemarkt sind kaum verkoppelt. Die regimewebungenen Trägheiten haben nicht abgenommen.

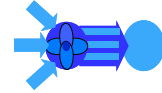
### Zusammenfassung

In der nachstehenden Tabelle werden die vier Szenarien im Vergleich dargestellt. Als Vergleichsparameter wurden verschiedene Indikatoren unter den Aspekten „innovatives Umfeld / Vielfalt“ und „Umbau bestehender Strukturen“ ausgewählt. Die Bewertung überschlägig qualitativ.

**Tabelle 7: Qualitative Abschätzung der Veränderungen auf der Regimeebene**

	Szenario A	Szenario B	Szenario C	Szenario D
<i>Stromversorgung</i>				
Grad der Dezentralisierung	++	+	0	0
Anteil der erneuerbaren Energien	++	++	0	0
Innovationstätigkeit und technologische Vielfalt	+	+	+	-
Vielfalt der Player	++	+	0	0
<i>Wärmeversorgung</i>				
Grad der Dezentralisierung	0	0	0	0
Anteil der erneuerbaren Energien	+	+	0	0
Innovationstätigkeit und technologische Vielfalt	++	+	+	0
Technologische Vielfalt	++	+	+	0
Vielfalt der Player	++	++	0	0
<i>Gesamtbewertung</i>				
Verkoppelung von Strom- und Wärmeversorgung	++	++	0	0
Abnahme Trägheiten / Zunahme des Spielraums für Innovation	++	+	+	0

Erklärung: ++ starke Zunahme im Vergleich zu heute, + mittlere Zunahme, 0 keine Veränderung, - Abnahme



#### **6.4 Mikro-Szenarien: Veränderungen im Innovationssystem stationäre Brennstoffzellen**

Unter Berücksichtigung der oben ausgeführten Verhältnisse auf der Makro-Ebene werden in diesem Abschnitt spezifischere Mikro-Szenarien für die Entwicklung des Innovationssystems erarbeitet. Dabei fließen auch die Erkenntnisse der Basis- und Umfeldanalyse sowie die in der Variationsanalyse identifizierten Zusammenhänge ein. Dementsprechend gliedert sich die Darstellung jeweils in einen kurzen allgemeinen Teil sowie Unterabschnitte zu den verschiedenen Anwendungsbereichen<sup>28</sup> und den Rollenmodellen.

##### *Szenario A: Durchbruch der BZ-Technologie in allen Anwendungsbereichen*

Überblick: Szenario A ist dadurch gekennzeichnet, dass sich stationäre Brennstoffzellen zu einer ausgereiften Technologie entwickelt haben und eine zentrale Rolle spielen, wenn es um Neubau oder Ersatz von Wärmeversorgungsanlagen in Wohngebäuden, öffentlichen Bauten, Bürohäusern oder Betrieben geht (Mikro- und Mini-KWK). Insgesamt erlangt die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung eine hohe Verbreitung; sie deckt 7,5% des Elektrizitätsbedarfs in Deutschland im Jahr 2025 (vgl. 6.3). In Szenario A hat auch die Entwicklung von BZ-Kraftwerken im Megawatt-Bereich deutliche Fortschritte gemacht und zahlreiche Anlagen sind in Betrieb. Im Markt für USV-Anlagen dominieren stationäre Brennstoffzellen die meisten Anwendungssituationen.

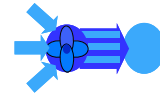
USV: Im Bereich USV sind Anlagen auf Basis von Brennstoffzellen sehr weit verbreitet. Kleingeräte für Haushalte haben Aktenkoffergröße, eine Leistung um 1 kW<sub>e</sub> und sind dank einer Wasserstoff-Patrone in der Lage, eine minimale Stromversorgung über mehrere Stunden aufrecht zu erhalten. Sie können direkt in der Wohnung betrieben werden (Plug & Play). Anlagen mittlerer Leistung (10-50 kW<sub>e</sub>) sind ebenso wie große USV Anlagen an das Gasnetz angeschlossen oder verfügen über einen H<sub>2</sub>-Hochdrucktank, der einen autonomen Betrieb bis zu mehreren Tagen ermöglicht. Für den Betrieb von USV-Geräten sind weder eine Genehmigung noch Verträge mit dem Netzbetreiber erforderlich. Die Geräte müssen lediglich den einschlägigen DIN-Vorschriften entsprechen (v. a. Sicherheitsbestimmungen, aber auch Abgaswerte). Mittlere und große Anlagen müssen zudem von Fachpersonen installiert und angeschlossen werden.

Mikro- und Mini-KWK: Mikro-KWK-BZ für Ein- und Mehrfamilienhäuser sind in drei Standardleistungsklassen (1, 3 und 5 kW<sub>e</sub>), verfügbar. Im gewerblichen Segment der semi-dezentralen Anlagen ist die Leistungsklasse weitgehend frei wählbar. Es kommen verschiedene Standardmodule kombiniert zum Einsatz.

Die Brennstoffzellen arbeiten im Netzparallelbetrieb. Die Steuerung erfolgt überwiegend dezentral wärmegeführt, d.h. in Abhängigkeit vom Wärmebedarf des Gebäudes. Zeitweise übernimmt jedoch der Stromnetzbetreiber von zentraler Stelle die Kontrolle

---

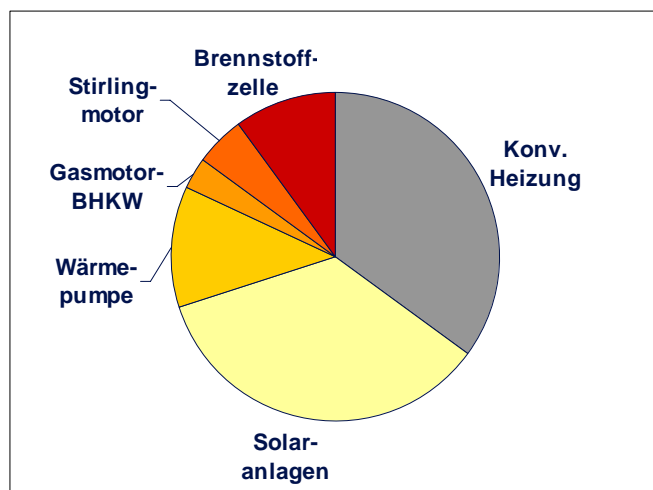
<sup>28</sup> Die Mikro- und Mini-KWK Anwendungen können dabei sogar hinsichtlich der Marktanteile quantifiziert werden, weil entsprechende Datengrundlagen auf der Ebene der Makro-Szenarien vorhanden sind.



des Gerätes, um Lücken im Stromangebot zu decken (virtuelle Kraftwerke). Sämtliche KWK-Anlagen, nicht nur Brennstoffzellen, sind zu diesem Zweck mit einheitlichen Kommunikationsmodulen ausgestattet. Die Rechte der Fernsteuerung sowie die Vergütung der Regelenergie werden in Standardverträgen geregelt. Ein dritter Betriebsmodus tritt bei einem Netzausfall auf. Dann schalten die dezentralen Aggregate auf Inselbetrieb um und sind in der Lage, eine Grundversorgung mit Elektrizität aufrechtzuerhalten.

Bezogen auf den Absatz von Heizanlagen erreichen Mikro- und Mini-KWK Geräte in 2025 einen Marktanteil von ca. 10%, d.h. pro Jahr werden etwa 150-200 Tsd. Einheiten in Deutschland verkauft. Dies betrifft sowohl den Ersatz von Heizungskesseln im Zuge von Renovierungen als auch Neubauten. Da Neubauten nahezu ausschließlich in Niedrigenergiebauweise ausgeführt werden, können in vielen Fällen reine BZ-Geräte zur Abdeckung des Wärmebedarfs (v.a. Warmwasser) installiert werden, ohne dass ein zusätzlicher Gaskessel für den Spitzenbedarf erforderlich wäre.

Stationäre BZ konkurrieren sowohl mit reinen Wärmeerzeugungstechnologien (Gasbrennwertkessel, Solarkollektoren und Wärmepumpen etc.) als auch mit anderen KWK-Technologien (Stirling-Motoren, Gasmotor-BHKWs etc.), vgl. Abbildung 13.



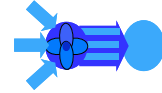
**Abbildung 13: Marktanteile verschiedener Technologien im Wärmemarkt, Szenario A (2025)**

**Kraftwerke:** Im Leistungsbereich größer 1 MW<sub>el</sub> werden verstärkt BZ zur Spitzenlast-erzeugung eingesetzt, aber die Technologie hat noch nicht in nennenswertem Umfang herkömmliche Gasturbinen oder andere KWK-Technologien verdrängt.

**Rollenmodelle:** Die BZ-Technik ist so weit ausgereift, dass der Betrieb risikoarm ist. Zudem haben sich institutionelle Strukturen herausgebildet, die die betriebliche und vertragliche Einbettung wenig aufwändig machen. BZ können daher in den meisten Anwendungsfällen von lokalen Installateurbetrieben oder Ingenieurbüros geplant, installiert und gewartet werden (Wärmemarkt-Modell). Finanzierung und Betrieb übernimmt der Endkunde. EVUs treten nur noch vereinzelt als Contracting-Anbieter auf. Sie spielen aber im Innovationssystem noch eine Rolle als Betreiber von BZ-Kraftwerken (Strommarktmodell) und als Koordinatoren von virtuellen Kraftwerken (s.o.). Das Newcomer-Modell spielt im Anwendungsbereich USV neben dem Wärmemarkt-Modell eine Rolle. Das Kombi-Modell kommt nicht mehr zum Einsatz.

*Szenario B: Verbreitung von Brennstoffzellen in mehreren Anwendungsbereichen*

**Überblick:** In Szenario B haben sich stationäre Brennstoffzellen ebenfalls zu einer ausgereiften Technologie entwickelt. Es haben sich sowohl im Bereich Mikro- und Mini-KWK als auch bei der USV stabile Marktnischen etabliert. Im Anwendungsbereich



Kraftwerke gibt es verschiedene Pilotprojekte, aber noch keine weiter gehende Verbreitung von BZ. Insgesamt erlangt die dezentrale KWK einen Anteil von 5% an der Stromproduktion (vgl. Abschnitt 6.3). Die Dezentralisierung ist damit weit vorangeschritten, jedoch weniger ausgeprägt als in Szenario A. Zentrale Großkraftwerke sind nach wie vor dominant.

USV: Die Verbreitung und der Betrieb von USV-Geräten entspricht weitgehend den Gegebenheiten in Szenario A. Im privaten Bereich erhalten die Brennstoffzellengeräte jedoch Konkurrenz durch Photovoltaikanlagen in Kombination mit Hochleistungsakkumulatoren. Im gewerblichen Bereich sind z. T. noch optimierte Gasmotoren oder Akku-Systeme im Einsatz. Diese werden aber sukzessive durch Brennstoffzellen ersetzt, da diese energieeffizient sowie abgas- und geräuscharm arbeiten.

Mikro- und Mini-KWK: Das technische Design und die Betriebsmodi von stationären BZ entsprechen Szenario A. Eine zentrale Steuerung von Brennstoffzellen und anderen dezentralen Stromerzeugungseinheiten als virtuelle Kraftwerke erfolgt vielfach, aber nicht flächendeckend und standardmäßig wie in Szenario A.

Obwohl Brennstoffzellen in Sachen Gesamtenergieeffizienz bzw. effiziente Stromerzeugung anderen KWK-Technologien überlegen sind, spielen sie weder im Anwendungsbereich Mikro-KWK noch im Bereich Mini-KWK eine herausragende Rolle, weil die Kosten immer noch relativ hoch sind. Im Mini-KWK-Betrieb sind Gas- und Stirlingmotoren die Hauptkonkurrenz für die Leistungsklasse um 40 kW<sub>el</sub>. Bei den Kleinstanlagen stehen Brennstoffzellen hingegen ohne unmittelbare Konkurrenztechnologie dar. Hier ist der Einsatz von KWK-Geräten eine sehr kleine Nische, die allein von der BZ besetzt wird.

Der Marktanteil von Brennstoffzellen im Wärmemarkt beträgt 2%, vgl. Abbildung. Stirlingmotoren liegen ebenfalls bei 2% und Gasmotor-BHKWs bei 3%.

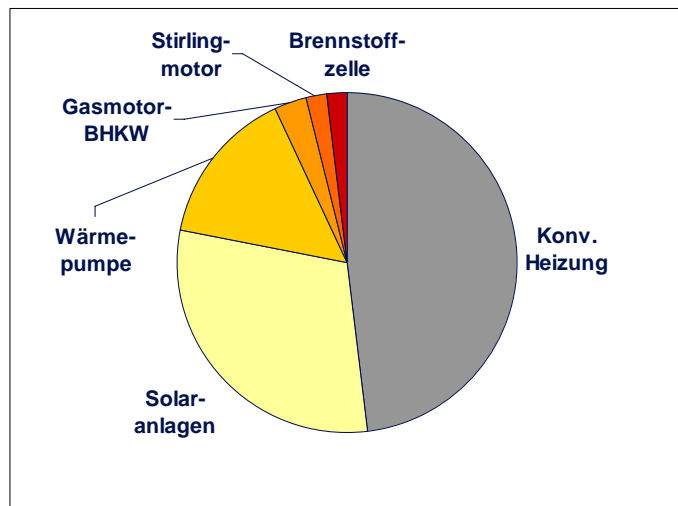
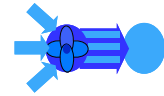


Abbildung 14: Marktanteile verschiedener Technologien im Wärmemarkt, Szenario B (2025)

Rollenmodelle: Im Privatkundenbereich läuft der Vertrieb und Einsatz von Brennstoffzellen weitgehend entkoppelt von den Geschäftstätigkeiten der EVUs. Hier wäre zwar eine Nachfrage vorhanden, aber die potenziellen Erträge sind für die EVUs nicht attraktiv genug. Hinzu kommt, dass der Wettbewerb auf dem Strommarkt nicht sehr intensiv ist. Da die Technologie grundsätzlich ausgereift ist, haben sich wie in Szenario A Installateure und Ingenieurbüros darauf eingerichtet, die Nachfrage nach BZ zu decken (Wärmemarktmodell).

Im Segment der Gewerbekunden bieten hingegen einige EVUs spezielle Versorgungsverträge mit 99,9% Absicherung an, um sich gegenüber der Konkurrenz am Markt zu



differenzieren. Dabei werden Backup-Systeme auf der Basis von BZ eingesetzt, die im Auftrag und auf Kosten der EVUs bei den Kunden installiert werden (Strommarktmodell). Gleichzeitig sind aber auch Newcomer auf dem Markt für USV-Anlagen aktiv.

*Szenario C: Durchbruch der Brennstoffzelle in den Bereichen USV und Kraftwerke*

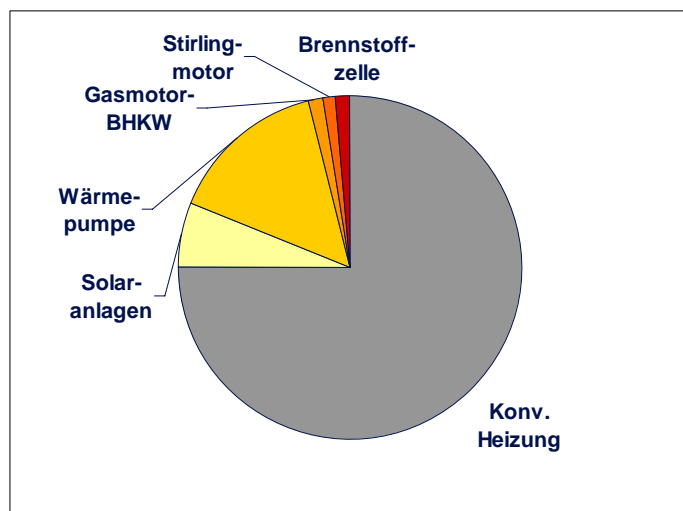
**Überblick:** Aufgrund einer konzentrierten Innovations- und Technologiepolitik handelt es sich bei der Brennstoffzelle im stationären Betrieb dennoch um eine ausgereifte Technologie. Sie hat einerseits eine stabile Marktnische im Bereich der USV-Systeme etabliert und arbeitet andererseits als hocheffiziente Erzeugungstechnologie, die in großen, industriellen Anlagen (1-20 MW) herkömmliche Gasturbinen im KWK-Betrieb ersetzt. Darüber hinaus sind auch im Segment Mini-KWK in begrenztem Umfang Brennstoffzellen im Einsatz. Im Bereich Mikro-KWK haben sich stationäre BZ hingegen nicht durchgesetzt. Dezentrale KWK-Technologien haben sich in Szenario C nur begrenzt verbreitet. Ihr Anteil an der Stromerzeugung beträgt 3,5%.

**USV:** Die Verhältnisse entsprechen im Wesentlichen den Bedingungen von Szenario A und B. Aufgrund der technologischen Fortschritte ist die BZ die führende Technologie in dieser Nische.

**Mini-KWK:** Im industriellen Bereich sind hauptsächlich SOFC und MCFC-Anlagen in Betrieb, da die hohen Temperaturen zur Erzeugung von Prozessdampf genutzt werden können.

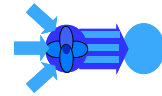
Die Energiezufuhr erfolgt auf der Basis von Erdgas. Der Marktanteil der Brennstoffzelle im Wärmemarkt beträgt 1,5%, vgl. Abbildung (rotes Segment). Damit liegt sie in etwa gleich auf wie die anderen KWK-Technologien (Gas- und Stirlingmotor).

**Abbildung 15: Marktanteile verschiedener Technologien im Wärmemarkt, Szenario C (2025)**



**Kraftwerke:** BZ werden aufgrund ihrer hohen Flexibilität (Lastfolge) und ihrer weitgehend ausgereiften Technologie zunehmend als Spitzenlastkraftwerke eingesetzt, auch wenn sie von den Kosten her z. T. noch etwas teurer sind.

**Rollenmodelle:** Die Anbieterstruktur im Stromversorgungssektor ist durch eine sehr starke Unternehmenskonzentration geprägt, d.h. ein Großteil des Marktes (Produktion, Verteilung und Verkauf) sind in der Hand von wenigen, international tätiger Großunternehmen. Deren Tochtergesellschaften, die im Bereich der Stromproduktion tätig sind, treten auch als Besitzer und Betreiber von BZ-Kraftwerken auf (Strommarktmodell). Mini-KWK-Anlagen mit Brennstoffzellen werden z. T. noch im Kombinationsmodell betrieben. Newcomer haben nur im Bereich USV eine Bedeutung.



**Szenario D: Brennstoffzelle bleibt auf den Bereich USV beschränkt**

**Überblick:** Die Brennstoffzellen-Technologie hat sich zwar grundsätzlich weiter entwickelt, aber insbesondere im stationären Bereich keine attraktive Kostensituation erreicht. Daher bleibt ihr Einsatz vor allem auf die Nische der USV beschränkt. Wie heute dominieren im Szenario D zentrale Stromerzeugungsstrukturen. Das Portfolio der Kraftwerke hat sich im Vergleich kaum verändert. Der Anteil dezentraler KWK beträgt 2%.

**USV:** In diesem Anwendungsbereich werden verbreitet Brennstoffzellen eingesetzt. Die Technologie hat aber nicht eine dominante Rolle wie in Szenarien A-C.

**Mikro- und Mini-KWK:** Im Wärmemarkt, d.h. im KWK-Einsatz spielt die BZ eine untergeordnete Rolle. Während im Bereich Mini-KWK verschiedentlich Anlagen eingesetzt werden (z.B. in öffentlichen Gebäuden oder in Gewerbebetrieben, die auf innovative Technologien setzen), hat sich der Absatz bei den Wohngebäuden kaum gesteigert. Dort gibt es einzelne Hersteller, die entsprechende Geräte für Ein- und Mehrfamilienhäusern anbieten, aber der Jahresabsatz beträgt wenige hundert Stück. Diese werden v. a. von Pionierkunden aus Umweltgründen erworben.

**Rollenmodelle:** EVUs ziehen sich weitgehend aus dem Geschäftfeld BZ zurück und auch Energiedienstleistungen spielen keine wesentliche Rolle im Wettbewerb. Auch für Akteure aus dem Wärmeversorgungssektor hat sich kein attraktiver Markt entwickelt. Vereinzelt gibt es noch Kooperationen auf der Basis des Kombi-Modells. Der Bereich USV wird vor allem durch Newcomer abgedeckt.

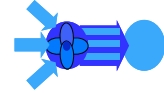
**Zusammenfassung**

In der nachstehenden Tabelle ist schematisch dargestellt, wie sich die vier Anwendungsbereiche unter den Annahmen der jeweiligen Szenarien entwickeln. Die stärksten Impulse zugunsten der BZ-Technologie werden in Szenario A ausgelöst, während D kaum Veränderungen im Vergleich zu heute bewirkt. Es zeigt sich aber auch, dass im Bereich USV in jedem der Szenarien „ein Platz“ für die BZ-Technologie ist.

**Tabelle 8: Entwicklung der vier Marktnischen für stationäre Brennstoffzellen in Abhängigkeit von Szenario A-D**

	Szenario A	Szenario B	Szenario C	Szenario D
<b>USV</b>	++ ● ●	++ ● ●	++ ● ●	+ ● ●
<b>Mikro-KWK</b>	++ ○ ●	+ ○	○ ●	○
<b>Mini-KWK</b>	++ ○ ●	+ ● ○	+ ● ●	○
<b>Kraftwerke</b>	+ ● ●	○	+ ●	○

● Kombimodell    ● Strommarktmodell    ○ Wärmemarktmodell    ● Newcomermodell



Darüber hinaus wurde eingetragen, welche Rollenmodelle im jeweiligen Anwendungsbereich voraussichtlich maßgeblich für die Marktstruktur sein werden. Es fällt auf, dass auch im Fall einer sehr weit gehenden Marktentwicklung (Szenario A) aus heutiger Sicht noch großer Entwicklungsspielraum in organisatorischer Hinsicht besteht und dass insbesondere Newcomer noch in allen vier Anwendungsbereichen eine zentrale Marktposition erreichen können.

## 7 Transformationsanalyse

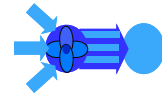
In diesem Kapitel geht es in erster Linie darum, wie mögliche Entwicklungspfade im Innovationssystem Brennstoffzelle über die nächsten 20 Jahre aussehen könnten. Konkret werden vier Pfade ausgearbeitet. Ausgangspunkt aller vier Pfade ist die heutige Situation bzw. der Zustand des Innovationssystems (vgl. Kapitel 3). Die Endpunkte entsprechen den im vorigen Kapitel dargestellten Szenarien. Entscheidend für den Verlauf des jeweiligen Pfades sind Konstellationen von Einflussfaktoren bzw. die Abfolge von externen Entwicklungen und systeminternen Prozessen.

Das Kapitel gliedert sich wie folgt. In einem ersten Schritt werden die in den vorangegangenen Abschnitten identifizierten Einflussfaktoren im Überblick dargestellt. Anschließend werden Entwicklungen im Umfeld des Innovationssystems betrachtet, die sich als Gelegenheitsfenster qualifizieren. Im dritten Schritt werden dann die Pfade dargestellt.

### 7.1 Einflussfaktoren und ihre Wirkung auf das Innovationssystem

Die Einflussfaktoren werden nachfolgend danach unterschieden, ob sie auf der Landschafts-, Regime oder Nischenebene anzusiedeln sind. Faktoren auf der Landschaftsebene wirken meist nicht direkt auf eine bestimmte Innovation, sondern betreffen verschiedene Technologien und Produkte zugleich. So haben etwa steigende Strompreise eine positive Wirkung auf die Verbreitung effizienter Erzeugungstechnologien und können auch die Eigenerzeugung von Strom bei den Endkunden befördern. Gleichzeitig wirken sich hohe Strompreise aber auch allgemein zugunsten von Energiesparmaßnahmen und der Nutzung regenerativer Energiequellen aus, d. h. sie bringen auch Technologien und Dienstleistungen voran, die in Konkurrenz zur Brennstoffzelle stehen. Faktoren auf der Regimeebene betreffen konkret die Bereiche Strom- und Wärmeversorgung. Auch sie wirken zumeist allgemein auf verschiedene Innovationssysteme ein, können aber auch direkt die BZ-Technologie betreffen. Faktoren auf der Nischenebene haben demgegenüber einen direkten Einfluss auf die Innovationsprozesse im Bereich stationäre Brennstoffzellen.

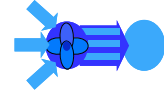
Die verschiedenen Faktoren sind aber nicht nur auf unterschiedlichen Ebenen angesiedelt, sondern haben auch einen mehr oder weniger hohen Einfluss auf das Innovationssystem. Nachfolgend wird eine sehr grobe Unterscheidung dahin gehend getroffen, ob der jeweilige Einfluss eher moderat oder hoch ist, vgl. Tabelle 9. In der ersten Spalte der Tabelle ist ferner aufgeführt, in welchem Abschnitt der betreffende Einflussfaktor ausführlicher erörtert wurde.



**Tabelle 9: Pfadbestimmende Einflussfaktoren auf den Innovationsprozess stationärer BZ**

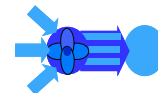
<b>Ebene</b>	<b>Faktor</b>	<b>Auswirkung</b>	<b>Einfluss<sup>29</sup></b>
<b>Landschaftsebene</b>			
4.1	Steigende Strompreise WoO	Positiver Einfluss auf Stromsparen, effiziente Stromerzeugung und die Nutzung erneuerbarer Energien (allgemein), Steigerung der wirtschaftlichen Attraktivität der Eigenerzeugung durch Endverbraucher (direkte Wirkung)	moderat bis hoch
4.1	Steigende Ölpreise WoO	Positiver Einfluss auf Energiesparen, effiziente Erzeugung und die Nutzung erneuerbarer Energien (allgemeine Wirkungen im Bereich Wärmeversorgung)	moderat
4.1	Steigende Gaspreise	Ambivalente Wirkung: positiver Einfluss auf die Effizienz der Stromerzeugung (allgemein), negativer Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von gasbasierten Technologien (für BZ eher mittelfristig relevant)	moderat
4.1	Liberalisierung / zunehmender Wettbewerb auf dem Strommarkt WoO	Positiver Einfluss auf die Innovationsaktivität und Dienstleistungsorientierung von EVUs, veränderte Investitionslogik, Suche nach neuen Absatzmöglichkeiten (allgemeine Wirkung)	hoch
4.1	Liberalisierung / zunehmender Wettbewerb auf dem Gasmarkt WoO	Positiver Einfluss auf die DL-Orientierung von EVUs; Suche nach neuen Absatzmöglichkeiten	moderat
4.1	Steigende Umweltschutzanforderungen	Positiver Einfluss auf erneuerbare Energien und Effizienztechnologien (allgemein)	moderat
4.1	Zunehmendes Umweltbewusstsein / Ökologieorientierung (auch im gewerblichen Bereich )	Positiver Einfluss auf die Akzeptanz von / Nachfrage nach alternativen Strom- und Wärmeversorgungssystemen (allgemein)	moderat
	Forschungs- und Innovationsoffensive	Positiver Einfluss auf neue Technologien, u.a. auf die Weiterentwicklung von Brennstoffzellen (allgemein)	moderat
<b>Regimeebene</b>			
4.1	Ausstieg aus der Kernenergie WoO	Positiver Einfluss auf alternative Technologien zur Stromerzeugung, öffentlicher Diskurs über Alternativen der Energieversorgung (allgemein)	moderat
4.3	Überalterung Kraftwerkspark WoO	Positiver Einfluss auf den Bedarf nach alternativen Erzeugungstechnologien (Ersatzbedarf), Schwächung des dominanten Regimes der zentralen Stromerzeugung (allgemein)	moderat

<sup>29</sup> Einfluss auf das Innovationssystem stationäre Brennstoffzellen



4.3	Neue Heizungstechnologien WoO	Positiver Einfluss auf die Offenheit gegenüber innovativen Technologien und die Flexibilität beim Handwerk, neue Firmen (allgemein)	moderat
	Zunehmende Konzentration von Energieversorgungsunternehmen	Tendenziell negativer Einfluss auf die Vielfalt der Anbieter und Angebote, insbesondere bei Herausbildung von Oligopolstrukturen	moderat
4.4	Verbreitung IuK, Ausbau Steuer- und Regeltechnik Stromnetze	Positiver Einfluss auf die Möglichkeiten zur Netzintegration und zentralen Steuerung von dezentralen KWK-Anlagen (direkte Wirkung)	moderat
4.3	Abnahme der Stromversorgungssicherheit	Positiver Einfluss auf die Nachfrage nach USV-Geräten (direkte Wirkung)	hoch
Nischenebene			
4.4	Fortschritte bei BZ im mobilen Bereich	Positiver Einfluss auf technologische Entwicklung der BZ (v. a. PEM); Erhöhung des Bekanntheitsgrades und der Akzeptanz (direkt)	hoch
4.4	Öffentlicher Diskurs in Medien und Fachwelt über Brennstoffzellen	Positiver Einfluss auf Erwartungen; Erhöhung des Bekanntheitsgrades und der Akzeptanz (direkt)	hoch
4.4	Fortschritte bei BZ im portablen Bereich	Positiver Einfluss auf technologische Entwicklung der BZ (v. a. USV-Anwendungen); Erhöhung Bekanntheitsgrad und Akzeptanz (direkt)	hoch
3.6	Intensivierung der BZ-Forschung	Positiver Einfluss auf technologische Entwicklung der BZ (direkt)	hoch
3.6	Staatliche Förderprogramme KWK (z.B. Vergütung der Stromeinspeisung oder Investitionszuschüsse)	Positiver Einfluss auf die Nachfrage durch Aufbau einer technologischen Nische (direkte Wirkung)	hoch
4.5	Verbesserung von anderen KWK-Technologien (Gasmotor, Stirling etc.)	Negativer Einfluss auf die relative Attraktivität der BZ in den Bereichen Mikro- und Mini-KWK (direkt)	hoch
4.5	Verbesserung von anderen Heiz-Technologien (Solarthermie, Holzheizung, Wärmepumpe)	Negativer Einfluss auf die relative Attraktivität der BZ in den Bereichen Mikro- und Mini-KWK (direkt)	hoch
4.5	Verbesserung von Gasturbinen	Negativer Einfluss auf potenzielle BZ-Anwendungen zur Spitzenlastzeugung (direkt, mittelfristig)	moderat
5.1	Brennstoffzelle als Lifestyle-Element	Kostenbetrachtung rückt bei Investition in den Hintergrund, Steigerung der Akzeptanz (direkt)	moderat

Insbesondere auf der Landschaftsebene, aber auch bei den sozio-technischen Regimes ist davon auszugehen, dass bestimmte Phasen oder Zeitfenster auftreten, in denen sich wichtige Parameter grundlegend verändern. In der Folge treten vorübergehende Umbrüche auf, die unter Umständen eine günstige Gelegenheit für die Entwicklung (Markteinführung, Diffusion etc.) einer Innovation bieten. Solche Gelegenheitsfenster oder *windows of opportunity* (WoO) wie etwa die Einführung von Wett-



bewerb im Stromsektor oder steigende Strom- und Ölpreise (vgl. Tabelle) sind meist mit einer Schwächung vorherrschender Regimestrukturen verbunden.

Im folgenden Abschnitt werden die zuvor bereits als Einflussfaktoren identifizierten Gelegenheitsfenster vertieft erörtert.

### *Stromversorgung*

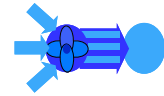
Die Stromversorgung ist derzeit nach wie vor einem tief greifenden Wandel aufgrund Marktliberalisierung unterworfen, vgl. auch Abschnitt 4.1. Auch wenn sich bereits wieder stabilisierende Effekte abzeichnen (Konzentration von Unternehmen, Abbau von Überkapazitäten bei der Erzeugung) ist der Konsolidierungs- und Veränderungsprozess noch nicht abgeschlossen. Durch die Marktliberalisierung ist derzeit noch ein Gelegenheitsfenster geöffnet, dass EVUs dazu veranlassen kann, verstärkt kundenorientierte Energiedienstleistungen und Contracting-Angebote zu entwickeln und dabei auch auf neue Technologien wie Brennstoffzellen zu setzen.

Der deutsche Kraftwerkspark hat keine homogene Altersstruktur, sondern einen Großteil von Anlagen, die in den nächsten Jahren aus Altersgründen ersetzt werden müssen. Hinzu kommt, dass durch den Beschluss, aus der Kernenergie auszusteigen, ein Bedarf erwächst, mittelfristig ca. 30% der Erzeugungskapazität durch andere Technologien zu ersetzen. Durch diesen diskontinuierlichen Ersatzbedarf entsteht zunächst einmal ein erheblicher Spielraum mit Blick auf zukünftige Investitionen. Es entwickelt sich eine temporär stark expandierende Nachfrage nach neuen Kraftwerken und damit die Möglichkeit, gleichzeitig verschiedene technologische Erzeugungsoptionen (GuD-Kraftwerke, Gas-KWK-Anlagen, moderne Braun- und Steinkohlekraftwerke, Offshore-Windkraft, Biomasseanlagen etc.) zu verfolgen. Gleichzeitig wird tendenziell ein Ausschluss bestimmter etablierter Kraftwerkstechnologien wirksam - bei der Kernkraft, aber auch bei Stein- und Braunkohle (Stichwort Emissionshandel). Dadurch entsteht ein zusätzlicher Druck in Richtung neuer, hocheffizienter bzw. erneuerbarer und z. T. auch dezentraler Stromerzeugungstechnologien.<sup>30</sup>

Es ist ebenfalls abzusehen, dass die Strompreise in den kommenden Jahren erheblich steigen werden. Ursprünglich bestehende Überkapazitäten bei der Erzeugung sind mittlerweile abgebaut und der Wettbewerb zwischen den EVUs entwickelt sich weit weniger intensiv als zunächst erwartet. Der Bedarf, mittelfristig in erheblichem Umfang neue Kraftwerke zu errichten, wird dazu führen, dass sich die Strompreise zunehmend an den Vollkosten für neue Anlagen orientieren, die etwa bei 60€/MWh liegen. Vor diesem Hintergrund erhöht sich für die Endverbraucher der ökonomische Anreiz, eigene dezentrale Erzeugungsanlagen auf KWK-Basis zu betreiben oder entsprechende Contracting-Angebote von Dritten anzunehmen. Vor diesem Hintergrund könnten steigende Strompreise eine Entwicklung in Richtung Dezentralisierung verstärken.

---

<sup>30</sup> Was nicht bedeutet, dass dezentrale, innovative Erzeugungstechnologien sich deswegen auch verbreiten werden. Der Ersatzbedarf ist keine hinreichende Bedingung, hat aber sicherlich eine fördernde Wirkung.



Ein viertes Gelegenheitsfenster für die Weiterentwicklung stationärer Brennstoffzellen könnte entstehen, wenn es zu einer deutlichen Abnahme der Versorgungssicherheit kommt.<sup>31</sup> Es ist davon auszugehen, dass eine Zunahme von regionalen oder gar nationalen Stromausfällen (insbesondere im Fall von spektakulären Blackouts) dazu führen, dass der Bedarf nach USV-Geräten und damit auch nach Brennstoffzellen steigt. Im Zuge dieser Entwicklung könnten auch Mikro- und Mini-KWK-Anlagen für Endverbraucher attraktiver werden, weil sie ebenfalls in Notfällen als USV einsetzbar sind.

### *Wärmeversorgung*

Im Bereich der Wärmeversorgung zeichnet sich derzeit auf der Ebene der Öl- und Gaspreise ein grundlegender Wandel ab. Falls insbesondere der Ölpreis dauerhaft auf einem hohen Niveau bleibt oder gar weiter steigt, werden nicht nur Maßnahmen zur Verbrauchsverringerung wie z.B. Wärmedämmung, sondern auch alternative Technologien zur Wärmebereitstellung attraktiver, vgl. Abschnitt 4.1. Hierzu zählt vor allem die Nutzung erneuerbarer Energien (Solarkollektoren, Holzheizungen, Wärmepumpen etc.). Für den Einsatz von KWK-Anlagen und insbesondere für stationäre Brennstoffzellen ergeben sich aus dieser Entwicklung nur dann positive Auswirkungen, wenn der Gaspreis weniger stark steigt als der Ölpreis. Es ist aber zu beachten, dass der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energien gleichzeitig eine Konkurrenz zu gasbasierter KWK und damit auch zu Brennstoffzellen darstellt.

Ähnlich wie der Strommarkt befindet sich auch die Gasversorgung in einer Umbruchsphase aufgrund der Liberalisierung. Es ist denkbar, jedoch noch nicht absehbar, dass Gasversorgungsunternehmen aufgrund des zunehmenden Wettbewerbs verstärkt neue Geschäftsfelder und v. a. auch neue Absatzmöglichkeiten erschließen. Vor diesem Hintergrund eröffnen sich günstige Bedingungen für neue Dienstleistungen auf der Basis von gasgefeuerter KWK.

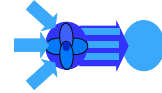
## **7.2 Entwicklungspfade und Realisierungsbedingungen**

Nachfolgenden wird in sehr vereinfachter Form dargestellt, welche Entwicklungsschritte die BZ-Technologie ausgehend vom heutigen Zustand unter Berücksichtigung verschiedener Einflüsse durchlaufen kann. Die Einflussfaktoren sind farblich gekennzeichnet, je nachdem ob sie der Landschafts-, Regime- oder Nischenebene zugeordnet werden können.<sup>32</sup> Auf der Nischenebene wurde darüber hinaus zwischen dem Innovationssystem Brennstoffzelle und anderen Marktnischen unterschieden. Die Endpunkte der vier Hauptpfade entsprechen den vier Szenarien. Daneben ist auch ein „Seitenpfad“ aufgeführt (gestrichelte Linie), bei dem exemplarisch aufgezeigt werden

---

<sup>31</sup> Im Gegensatz zu den zuvor dargestellten Entwicklungen ist derzeit nicht absehbar, ob und wann eine solche Veränderung eintritt.

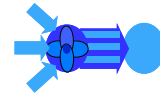
<sup>32</sup> Die Größe der ovalen Platzhalter für die Einflussfaktoren ist allein der darin enthaltenen Beschreibung geschuldet, d. h. sie impliziert weder eine Aussage bezüglich der Bedeutung noch der zeitlichen Dauer der Einwirkung. Auf der Ebene des Innovationssystems sind im übrigen neben Einflüssen auch Prozesse dargestellt, ohne diese gesondert zu kennzeichnen.



soll, dass auch innerhalb eines Szenariobandes durchaus noch Entwicklungen eintreten können, die den Innovations- und Diffusionsprozess in eine andere Richtung lenken.

Entwicklungspfad A mit dem Endpunkt „Brennstoffzellen von der Stange“ führt zu einer sehr weit reichenden Verbreitung der BZ-Technologie. Der Beginn dieser Entwicklung ist u. a. dadurch gekennzeichnet, dass der Wettbewerb auf dem Strommarkt zunehmend intensiver wird und in der Folge eine Vielzahl von alteingesessenen, aber auch von neuen Unternehmen unterschiedliche Strom- und Energiedienstleistungen anbieten. Bei der Differenzierung der Unternehmen im Wettbewerb spielen Contracting-Angebote im Bereich KWK sowie innovative Technologien eine wichtige Rolle. Energieversorgungsunternehmen sind hier in der Regel führend gegenüber Anbietern aus der Heizungsbranche oder anderen Sektoren. In der Öffentlichkeit kommt es zu einem ausgeprägten Diskurs über die Brennstoffzellen-Technologie (Mikro-KWK bzw. Kellerkraftwerke, mobile Brennstoffzellen etc.). In der Folge wird die stationäre BZ mehr und mehr zu einem Lifestyle-Element für Eigenheimbesitzer und die Nachfrage steigt. Als externes Ereignis verleiht der Durchbruch der BZ-Technologie im mobilen Bereich nach 2010 dem Innovationsprozess neue Impulse in Form von Synergien auf der Ebene der Technologie selbst (z. B. Lebensdauer / Robustheit der Stacks) und der Fertigungstechnologien. Es kommt zu deutlichen Preissenkungen, einer erhöhten Nachfrage und schließlich zu einer Serienfertigung von stationären BZ im Mikro- und Mini-Leistungssegment. Gleichzeitig verzeichnet insbesondere auch der Bereich USV einen starken Zuwachs, weil in den Netzen eine deutliche Zunahme der Stromausfälle zu verzeichnen ist. Um 2020 erreichen stationäre BZ einen hohen Grad der Reife und können quasi von der Stange gekauft, eingebaut und betrieben werden. Damit verliert das Contracting mehr und mehr an Bedeutung, was sich wiederum zu Lasten der ursprünglich dominanten Position der Energieversorger auswirkt. Auf der organisatorischen Ebene setzt sich letztlich das Wärmemarktmodell durch.

In Pfad B kommt die Verbreitung der Brennstoffzelle ebenfalls voran, aber insbesondere in den KWK-Anwendungsbereichen sind die Marktanteile wesentlich geringer als in Szenario A. Pfad B ist zudem dadurch geprägt, dass Akteure aus dem Wärmesektor und Newcomer eine starke Position bei den Brennstoffzellen erlangen, daher die Bezeichnung „Wärmemarktmodell in der Nische“. Das Umfeld der Entwicklung ist durch steigende regulatorische Umweltauflagen geprägt. Hinzu kommt ein zunächst intensiver Wettbewerb im Stromsektor, der im Verlauf der Entwicklung jedoch nachlässt. Ebenfalls verbunden mit. Es kommt wie in Szenario A zu einer Dekonzentration der Anbieter, jedoch ist die Zahl neuer Player wesentlich geringer und auch die Dienstleistungsorientierung weniger relevant für den Markterfolg. Ein deutlich zunehmendes Umweltbewusstsein bei privaten Verbrauchern und Unternehmen ist die Grundlage für eine hohe Akzeptanz innovativer Energieerzeugungsformen und eine entsprechende Förderpolitik. Die Brennstoffzelle wird ähnlich wie in Pfad A zu einem Lifestyle Element für Eigenheimbesitzer. Staatliche Fördermaßnahmen für dezentrale, hocheffiziente und umweltfreundliche KWK-Technologien haben in Verbindung mit einem gesteigerten Umweltbewusstsein der Endkunden einen starken Einfluss auf die Entwicklung. Mit einer gezielten Förderung von Forschung und Entwicklung sowie anschließenden Marktanreizprogrammen wird eine erhöhte Nachfrage nach hoch-



effizienten Energieerzeugungsanlagen generiert. Diese Nachfrage wirkt sich sowohl auf die Verbreitung konventioneller KWK-Anlagen (Gasmotor-BHKWs) als auch auf die Entwicklung und Verbreitung des Stirlingmotors positiv aus. Die Brennstoffzellen entwickeln sich ebenfalls weiter, können aber nicht von Synergien aus dem Automobilbereich profitieren. Die Serienfertigung der BZ beginnt deutlich später als in Szenario A und die Marktanteile sind wesentlich geringer. Im Kraftwerksbereich werden BZ nicht eingesetzt. Auch in Szenario B verliert das Contracting mittelfristig an Bedeutung aufgrund sinkender Anlagenkosten und der zunehmenden technologischen Reife. EVUs spielen eine geringe Rolle im Nischenmarkt für Brennstoffzellen.

Auf dem Entwicklungspfad C „Strommarktmodell in der Nische“ kommt es ähnlich wie in Szenario B zu einer moderaten Verbreitung stationärer Brennstoffzellen. Dabei spielen jedoch große EVUs eine zentrale Rolle und auch bei großen BZ-Anlagen (Anwendungsbereich Kraftwerke) sind deutliche Fortschritte zu verzeichnen. Der Beginn der Entwicklung ist durch einen starken Wettbewerb und ausgeprägte Konzentrationsprozesse im Stromsektor (Angebotsoligopole) gekennzeichnet. Dieser Prozess ist jedoch nicht nachteilig für dezentrale Erzeugungstechnologien, da der Wettbewerb eine hohe Dienstleistungsorientierung mit sich bringt. Die verbleibenden Stromunternehmen drängen in ihrer Expansion zunehmend auch auf den Wärmemarkt. Das Umfeld in Pfad C ist darüber hinaus durch eine breit angelegte staatliche Forschungs- und Innovationspolitik gekennzeichnet. In Verbindung mit zahlreichen KWK-Contracting-Angeboten kommt es in der Folge bei allen KWK-Technologien zu deutlichen Verbesserungen. Anreizprogramme, die für eine weitere Marktbelebung sorgen könnten, bleiben jedoch aus. Damit schreitet die Verbreitung der KWK und insbesondere der Brennstoffzellen deutlich langsamer voran als in Szenario A. Aufgrund der nach wie vor dominanten Rolle der EVUs gewinnen ab 2020 auch große Brennstoffzellen-Kraftwerke zunehmend an Bedeutung.

Szenario D „Brennstoffzelle kaum von Bedeutung“ zeichnet sich durch eine geringe bzw. moderate Entwicklung und Diffusion von Brennstoffzellen aus. Das Umfeld ist gleich von Beginn an durch eine geringe Wettbewerbsintensität sowie eine starke Konzentration der Unternehmen im Stromsektor geprägt. Dementsprechend ist das Interesse der marktbeherrschenden Unternehmen an Energiedienstleistungen bzw. an Contracting-Angeboten auf der Basis von Brennstoffzellen gering. Weitere Gründe für die stagnierende Entwicklung sind, dass Innovations- und Förderimpulse von staatlicher Seite ebenso ausbleiben wie Marktanzreizprogramme und auch keine externen positiven Effekte aus anderen Einsatzbereichen der Brennstoffzelle zu verzeichnen sind. Wäre dies anders, d. h. würde es beispielsweise im Mobilitätssektor zu einer Verbreitung von BZ kommen (Pfad D\*), dann wäre durchaus denkbar, dass aufgrund der technologischen Spillover-Effekte auch bei stationären Anwendungen eine stärkere Verbreitung zu verzeichnen wäre. Diese könnte dann von Newcomern oder von Akteuren der Wärmebranche getragen sein.

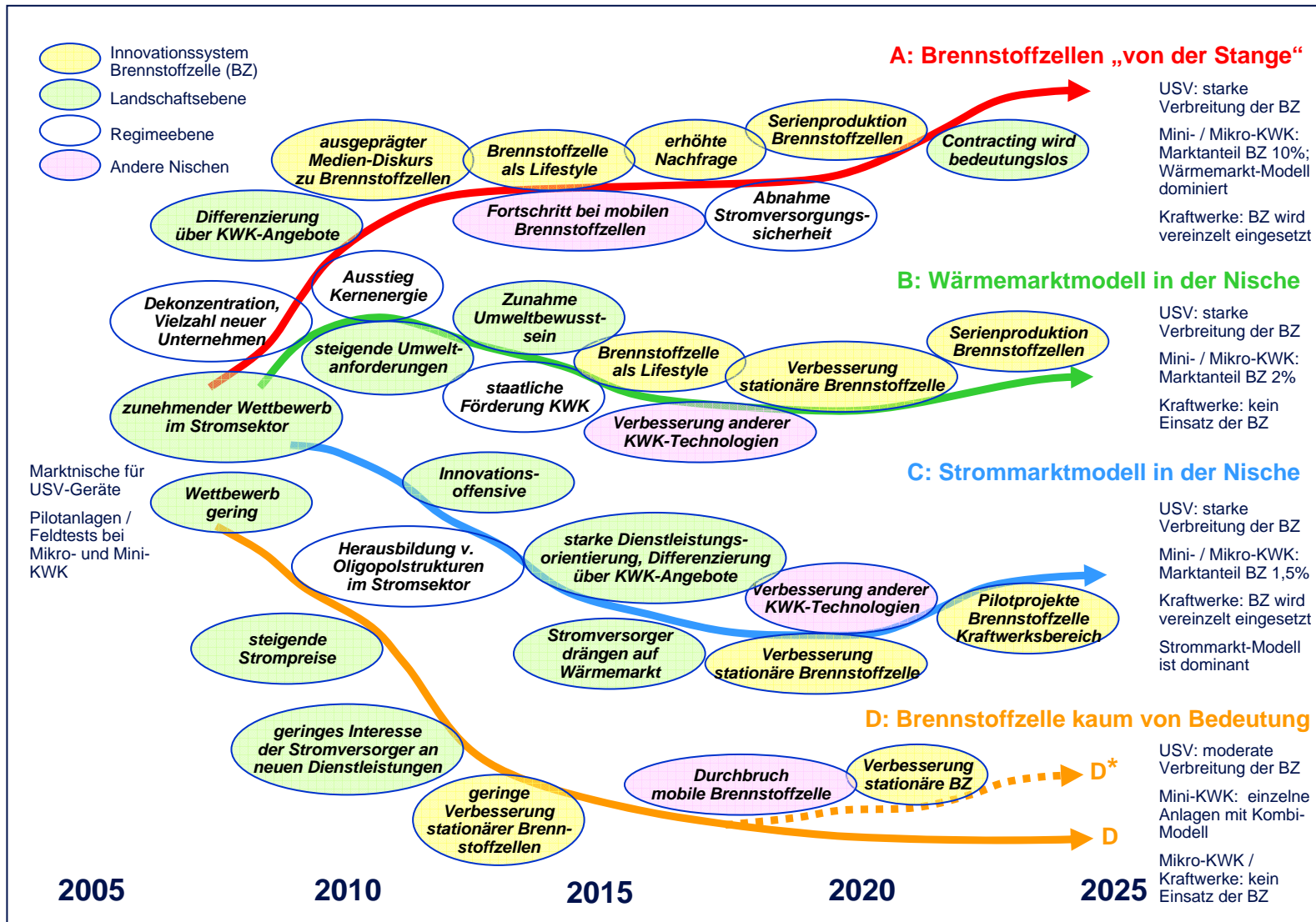
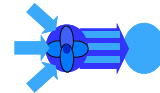


Abbildung 16: Grafische Darstellung von Entwicklungspfaden und Einflussfaktoren



## 8 Schlussfolgerungen und Ausblick

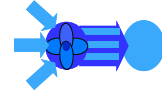
Die Innovationssystem-Analyse für stationäre Brennstoffzellen hat aufgezeigt, wo die technologische Entwicklung heute steht und welche Akteure, Institutionen und Netzwerke in Deutschland das Innovationssystem bilden, welches den Innovationsprozess maßgeblich beeinflusst. In der Umfeldanalyse wurde darüber hinaus dargelegt, welchen externen Einflüssen die Marktentwicklung und Diffusion von Brennstoffzellen unterliegt bzw. mit welchen anderen technologischen Entwicklungen der Innovationsprozess in Wechselwirkung steht. In der Variationsanalyse kam zum Ausdruck, wie breit das Spektrum möglicher Entwicklungen sowohl in sozio-technischer Hinsicht als auch in Bezug auf die spätere Organisation der Wertschöpfungskette ist. Auf der Basis der Erkenntnisse aus den vorangehenden Untersuchungsschritten konnte aber gleichzeitig abgeleitet werden, welche Einflüsse für die jeweilige Entwicklung maßgeblich sind und welche Kombinationen von technologischer und organisatorischer Variation nahe liegender sind als andere. Szenario- und Transitionsanalyse haben schließlich zukünftige Entwicklungsoptionen eingehender analysiert. Das Ziel war dabei nicht, wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Zukunftspfade zu unterscheiden, sondern darzulegen, wie verschiedene Faktoren die Richtung und den Fortschritt des Innovationsprozess beeinflussen können.

Im Folgenden wird grob skizziert, welche Art von Rückschlüssen man aus dieser Analyse etwa mit Blick auf unternehmerische Innovationsstrategien ziehen kann. Dabei interessiert beispielsweise die Frage, welche strategischen Optionen sich mittelfristig auf tun oder welche zukünftigen Entwicklungen besonders hilfreich oder kritisch für die Erreichung der gewählten Ziele sind. Auf der politischen Ebene geht es darüber hinaus etwa um die Bedeutung, die stationären Brennstoffzellen auch vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Entwicklung zuzumessen ist oder wie mögliche Maßnahmen zur Förderung der Technologie aussehen könnten.

### 8.1 Unternehmensebene

Heute sind verschiedene Unternehmensakteure im Bereich stationäre Brennstoffzellen aktiv und in vielen Projekten gibt es Kooperation zwischen Geräteherstellern, Energieversorgern und Installationsbetrieben. Die organisatorische Variationsanalyse hat gezeigt, dass insbesondere bei technologischen Fortschritten und einer zunehmenden Diffusion eine Veränderung der derzeitigen Konstellationen nahe liegt. Während im Bereich der Mikro-KWK womöglich die etablierten Firmen des Wärmemarktes das zukünftige Geschäftsfeld Brennstoffzellenheizgeräte besetzen werden, ist bei größeren Mini-KWK-Anlagen eher von einer dominanten Rolle der Energieversorger auszugehen. Gleichzeitig haben auch Newcomer noch gute Chancen, etwa über einen Einstieg in die Vermarktung von USV-Geräten, ebenfalls eine zentrale Rolle zu übernehmen und andere Akteurgruppen ggf. auszuspielen.

Hinsichtlich der generellen Erfolgsaussichten der Technologie hat die Studie auch gezeigt, dass von Konkurrenztechnologien wie Gas- oder Stirlingmotoren sowie von den erneuerbaren Energien eine erhebliche Unsicherheit ausgeht. Auch wenn ein genereller Trend in Richtung dezentrale Energieerzeugung absehbar ist, macht es



sowohl für die Hersteller als auch für die vermittelnden Unternehmen (Installateure oder EVUs) einen großen Unterschied, ob eine komplexe Technologie wie die Brennstoffzelle oder wesentlich einfachere und zudem ausgereifere Produkte wie etwa Solarkollektoren den zukünftigen Markt dominieren. Strategische Reaktionsmöglichkeiten auf diese Unsicherheiten sind ein entsprechend breites unternehmensinternes Innovations- bzw. Angebotsportfolio und / oder der Aufbau von flexiblen Kooperationen in verschiedenen Bereichen. Gleichzeitig kommt der systematischen Technologiebeobachtung eine zentrale Rolle zu.

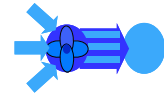
Ein wichtiger Punkt in der Technologiebeobachtung ist dabei die Konkurrenz zwischen erneuerbaren Energien und der KWK. Derzeit können sich noch beide Anwendungen relativ ungestört voneinander verbreiten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren auch eine direkte Konkurrenzsituation erreicht wird, in der Kostenaspekte, aber auch Umweltparameter einen entscheidenden Einfluss auf die weitere Diffusion dieser Technologien haben werden. Für KWK-Entwickler stellt sich dabei die Herausforderung, diese in zunehmendem Maß mit erneuerbaren Energiequellen zu verkoppeln, sei es in Form biomassegefeuerter Stirlingmaschinen oder biogasbetriebener Brennstoffzellen.

## 8.2 Politikebene

KWK-Technologien wie die Brennstoffzelle versprechen ökologische Vorteile aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz, die vor allem darauf beruht, dass die bei der Stromerzeugung entstehende Wärme zu Heizzwecken genutzt und nicht als unerwünschtes Nebenprodukt über Kühltürme abgeleitet wird. Die Brennstoffzelle hat darüber hinaus noch Vorteile aufgrund guter Abgaswerte (geringe Emissionen) und ihres geräuscharmen Betriebs. Auf der anderen Seite wird die Vielzahl von KWK-Aggregaten heute mit fossilem Erdgas betrieben. Dies ist zwar umweltfreundlicher als die Nutzung von Erdöl oder Kohle, aber doch weitaus weniger vorteilhaft als die ausschließliche Verwendung von erneuerbaren Energiequellen.

Vor diesem Hintergrund kann eine uneingeschränkte Förderung von KWK-Technologien nicht gefordert werden. Ziel einer nachhaltigen Förder- und Innovationspolitik muss vielmehr sein, KWK-Anlagen dort zu fördern, wo sie die herkömmliche, getrennte Erzeugung von Strom und Wärme substituieren und ansonsten grundsätzlich den erneuerbaren Energiequellen den Vorrang zu geben. Das bedeutet auf der Technologieebene jedoch nicht, dass Solarkollektoren oder gar Wärmepumpen stets Vorrang vor Gasmotoren oder Brennstoffzellen haben sollten. Vielmehr sind auf der Technologieebene stets die Anwendungen zu bevorzugen, die in der konkreten Situation die besten Umwelteigenschaften aufweisen – das kann eine Solaranlage kombiniert mit zusätzlichem Gasbrenner und zentraler Stromerzeugung in fossilen Kraftwerken sein, das kann aber auch das Gasmotor-BHKW oder, noch besser, eine Brennstoffzelle oder ein Stirlingmotor auf der Basis von Biogas sein.

Zur Förderung innovativer Technologien und Produkte empfiehlt sich grundsätzlich ein Bündel von Maßnahmen, d. h. eine Kombination von Förderprogrammen in Forschung und Entwicklung, netzwerkbildenden Maßnahmen, ökonomischen Anreizen, einer Anpassung bestehender Vorschriften und Regelungen sowie von Informations- und



Bewusstseins-Kampagnen. Je nach Stadium der Entwicklung der Innovation verschiebt sich die Priorität innerhalb des Maßnahmenbündels. In einer frühen Phase sollten üblicherweise staatlich geförderte F&E Programme, Pilotprojekte und eine Netzwerkförderung überwiegen, während anschließend die Beseitigung administrativer und rechtlicher Hürden sowie die Förderung von Akzeptanz, Bekanntheit und Nachfrage im Mittelpunkt stehen.

Für die Brennstoffzelle werden nachfolgend einige potenzielle Maßnahmen tabellarisch portraitiert und in ihrer zeitlichen Abfolge dargestellt. Diese Maßnahmen wurden in einem separaten Modul des IMV-Projektes für das breitere Feld der „Kellerkraftwerke“ in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Praxis erarbeitet. Für eine ausführliche Darstellung dieser Ergebnisse sei auf Voß *et al.* 2006a verwiesen.

**Tabelle 10: Kurzportraits von Fördermaßnahmen für stationäre Brennstoffzellen**

Bereich Forschung und Entwicklung	
	Entwicklung einer kohärenten bundesweiten F&E-Strategie für einen 10-Jahres-Zeitraum im Bereich stationäre Brennstoffzellen in Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten und Herstellern, Anbindung dieser Vorhaben an internationale Programme
	Förderung von Initiativen zur Vernetzung der Forschung an unterschiedlichen BZ-Technologietypen, später auch: Vernetzung des sektorübergreifenden Austauschs
	Erarbeitung von Performance-Kriterien im Sinne von Entwicklungszielen, welche maßgeblich sind für die Zusprache von Fördermitteln in 5 bzw. 10 Jahren
	Einrichtung bzw. Stärkung eines Forschungsverbunds „virtuelle Kraftwerke“ als Netzwerk von Instituten und Praxisakteuren
	Initiative für ein regionales Pilotprojekt im Bereich virtuelle Kraftwerke auf BZ-Basis
Bereich administrative Hürden und gesetzliche Regelungen	
	Anpassung von Genehmigungsvorschriften, um insbesondere bei kleinen BZ-Geräten Installation & Betrieb zu erleichtern (z. B. allgemeine Typenzulassung)
	Erleichterung der Netzanschlussbedingungen (z. B. geringe Formalitäten, Recht auf Netzanschluss für zugelassene Anlagen)
	Förderung von Initiativen zur Standardisierung / Normierung der Anschluss- und Steuerungsschnittstellen für Brennstoffzellen
Bereich Marktanreize	
	Beibehaltung des Innovationsbonus im EEG bzw. KWKG
	100.000 Keller Förderprogramm (Investitionszuschuss) für kleine KWK-Anlagen mit technologiespezifischen Teilprogrammen (z. B. 1.000 Brennstoffzellen, 2.000 Stirlingmotoren etc.)
Bereich Akzeptanz und Information	
	Kampagnen zur Bewusstseinsbildung und Akzeptanzschaffung bei privaten Verbrauchern (etwa: „Meine Heizung erzeugt jetzt auch Strom“ oder „Mit meiner neuen Heizung steh' ich nie im Dunkeln“).
	Weitere Förderung in Bereich der Schulung von Handwerksbetrieben

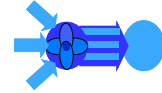
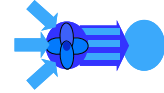


Abbildung 17: Set von Fördermaßnahmen und deren zeitliche Phasierung

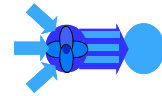
### 8.3 Ausblick und weiterer Untersuchungsbedarf

Die Innovationssystem-Analyse ist eine gegenwarts- und zukunftsorientierte Methodik zur Untersuchung von Innovationsprozessen, die hier für eine technologische Innovation angewendet wurde. Die Methodik basiert auf verschiedenen Konzepten der evolutionär geprägten Innovationsliteratur, insbesondere dem Mehrebenenmodell sozio-technischer Transitionen und dem Modell der (technologischen) Innovationssysteme. Die Innovationssystem-Analyse ist methodisch noch keineswegs ausgereift und auch in theoretischer Hinsicht besteht noch Klärungsbedarf. Die nachfolgende Sammlung von Ansatzpunkten bzw. Fragen zur Weiterentwicklung zeigt auf, wohin die „Reise gehen muss“ ist aber keineswegs vollständig. Neben der Klärung konzeptioneller Fragen sind weitere Anwendungen bzw. Fallstudien erforderlich, um zu testen, inwieweit sich dieser Ansatz auf andere Technologiebereiche und ggf. auch auf nicht-technische Innovationen übertragen lässt und welche Stärken bzw. Schwächen mit der Methode einhergehen.

- Entwicklung einer gemeinsamen konzeptionellen Grundlage von Mehrebenenmodell und Innovationssystemansatz: Wo liegen Gemeinsamkeiten und Unterschiede? Wie lassen sich die beiden Ansätze sinnvoll kombinieren und warum ist eine solche Kombination gerechtfertigt?
- Identifikation von Innovationssystemen: Wann spricht man sinnvollerweise von einem (technologischen) Innovationssystem und wie grenzt man es ab vom Umfeld bzw. von anderen technologischen Innovationssystemen? Wie sieht eine vergleichbare Analyse in Innovationsfeldern aus, in denen man keine Innovationssystem identifizieren kann, weil die Entwicklung noch in einem frühen Stadium steckt.

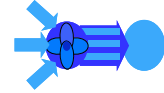


- Abgrenzung des Untersuchungsraums: Welche Konsequenzen hat die empirische Beschränkung auf ein Land für die Aussagekraft der Ergebnisse?
- Variationsanalyse: Wie lässt sich die Identifikation von sozio-technischen und organisatorischen Varianten systematisieren? Wie geht man mit der Herausforderung um, dass in der Zukunft Varianten entstehen können, die man heute noch gar nicht sieht? Wie Anforderungen müssen Kohärenzbedingungen erfüllen, wenn man auf ihrer Basis eine Aussage darüber treffen will, dass bestimmte technisch-organisatorische Kombinationen eher nahe liegen als andere?
- Szenarioanalyse: Sind Makro-Szenarien in jedem Fall erforderlich bzw. wie kann man fehlende Makro-Szenarien ggf. substituieren? Wie ist die Szenarioanalyse weiter zu entwickeln, um insbesondere zukünftige Innovationssysteme in ihren verschiedenen Dimensionen darstellen zu können?
- Transformationsanalyse: Wie kann man die Entwicklung von Pfaden systematisieren? Was sind die Stärken einer Betrachtung von Windows of Opportunity?

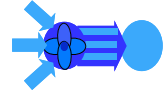


## 9 Literatur

- 2003/87/EG. Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates. 2003/87/EG, 13.10.2003, Brüssel, 32-46.
- Adamson, K.-A., Jollie, D., 2004. Fuel Cell Market Survey: Small Stationary Applications. Fuel Cell today, <http://www.fuelcelltoday.com>, London.
- Baker, A., Adamson, K.-A., 2005. Fuel Cell Today Market Survey - Large Stationary Applications. Fuel Cell today, <http://www.fuelcelltoday.com>, London.
- Baker, A., Jollie, D., 2004. Fuel Cell Market Survey: Large Stationary Applications. Fuel Cell today, <http://www.fuelcelltoday.com>, London.
- Baker, A., Jollie, D., Adamson, K.-A., 2005. Fuel Cell Today Market Survey: Portable Applications. Fuel Cell today, <http://www.fuelcelltoday.com>, London.
- Bauen, A., Hart, D., 2000. Assessment of the environmental benefits of transport and stationary fuel cells. *Journal of Power Sources* 86, 482–494.
- Bürger, V., Bauknecht, D., 2003. Report zur Entwicklung des Versorgungsektors Strom. Öko-Institut, Freiburg.
- Carlsson, B., Jacobsson, S., Holmén, M., Rickne, A., 2002. Innovation systems: analytical and methodological issues. *Research Policy* 31 (2), 233-245.
- Carlsson, B., Stankiewicz, R., 1991. On the nature, function and composition of technological systems. *Evolutionary Economics* 1, 93-118.
- Carrette, L., Friedrich, K.A., Stimming, U., 2001. Fuel Cells - Fundamentals and Applications. *Fuel Cells* 1, 5-35.
- Dronnikov, D., Steuber, D., Schulz, W., 2003. Report zur Entwicklung des Versorgungssektors Gas. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln (ewi), Köln.
- EEG. Erneuerbare-Energien-Gesetz, 01.08.2004, Berlin.
- Enquete-Kommission, 2002. Endbericht der Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung" des 14. Deutschen Bundestages. Deutscher Bundestag, Berlin.
- Geels, F., Smit, W., 2000. Lessons from Failed Technology Futures: Potholes in the Road to the Future. In: N. Brown, B. Rappert and A. Webster (Ed.), *Contested Futures - A Sociology of Prospective Techno-Science*, Aldershot.
- Geels, F.W., 2002. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy* 31, 1257-1274.
- Geiger, S., 2003. Fuel Cells in Germany – A survey of current developments. Fuel Cell today, <http://www.fuelcelltoday.com>, London.
- George, R., Hassmann, K., 2001. Fuel Cell Applications and Types - Developments and Potentials. *Siemens Power Journal* 1.
- Hadjilambrinos, C., 2000. Understanding technology choice in electricity industries: a comparative study of France and Denmark. *Energy Policy* 28, 1111-1126.
- Hirschl, B., Hoffmann, E., 2003. Zukunftstechnologie Brennstoffzelle? IÖW, Inst. f. ökol. Wirtschaftsforschung, Berlin.



- Hofman, P.S., 2003. Embedding 'Radical' Innovations in Society - Background Report to the CondEcol Project based on Experience from the Netherlands. Program for Research and Documentation for a Sustainable Society (ProSus), Centre for Development and the Environment, University of Oslo, Oslo.
- Hoogma, R., Kemp, R., Schot, J., Truffer, B., 2002. Experimenting for Sustainable Transport. The approach of Strategic Niche Management. Spon Press, London / New York.
- Jacobsson, S., Johnson, A., 2000. The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research. *Energy Policy* 28 (9), 625-940.
- Jäger, T., Mertens, J., Karger, C., 2004. Szenariobeschreibungen. Projektbericht im Rahmen des BMBF-Projektes "Integrierte Mikrosysteme der Versorgung". Forschungszentrum Jülich, Jülich.
- Joon, K., 1998. Fuel cells - a 21st century power system. *Journal of Power Sources* 71, 12-18.
- Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz. Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, Berlin, 1092-1096.
- Markard, J., 2004. Strommarkt im Wandel - Veränderung von Innovationsprozessen am Beispiel von Ökostrom und Brennstoffzelle. vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Markard, J., Forsberg, M., Truffer, B., 2003. Innovationsmanagement in Elektrizitätsunternehmen: Beispiel Brennstoffzelle. 3. Internationale Energiewirtschaftstagung, TU Wien
- Markard, J., Truffer, B., submitted. Actor oriented analysis of innovation systems: Findings from a case study on stationary fuel cells. *Technological Analysis & Strategic Management*.
- Markard, J., Truffer, B., Imboden, D.M., 2004. The impacts of market liberalization on innovation processes in the electricity sector. *Energy & Environment* 15 (2), 201-214.
- Pehnt, M., Cames, M., Fischer, C., Prätorius, B., Schneider, L., Schumacher, K., Voß, J.-P., 2006. *Micro Cogeneration - Towards decentralized energy systems*. Springer, Heidelberg.
- Pehnt, M., Ramesohl, S., 2003. Fuel cells for distributed power: benefits, barriers and perspectives. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg IFEU; Wuppertal Institut für Klima, Energie, Umwelt
- Plugpower, 2004. Fuel cells: cost analysis for backup power. Plugpower, GenCore, Latham, NY.
- Rifkin, J., 2002. *Die H2-Revolution. Mit neuer Energie für eine gerechte Wirtschaft*. Campus, Frankfurt/M.
- Ruef, A., 2005. Die Zukunft der Brennstoffzelle zur stationären Energieversorgung - Analyse der Erwartungen in Massenmedien und Fachkreisen. *Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät*, 121. Universität Bern, Bern.
- van den Ende, J., Kemp, R., 1999. Technological transformations in history: how the computer regime grew out of existing computing regimes. *Research Policy* 28 (8), 833-851.
- Voß, J.-P., Bauknecht, D., Konrad, K., Markard, J., Timpe, C., Truffer, B., 2006a. Gestaltungsstrategien für die Transformation der netzgebundenen Versorgung - ausgearbeitet für die Innovationsfelder Mikro-KWK, Smart Building und Netzregulierung, Öko-Institut, Berlin, download at [www.mikrosysteme.org](http://www.mikrosysteme.org).



- Voß, J.-P., Konrad, K., Truffer, B., 2006b. Sustainability Foresight - Reflexive governance in the transformation of utility systems. In: J.-P. Voß, D. Bauknecht and R. Kemp (Ed.), *Reflexive Governance for Sustainable Development*, Edward Elgar, Cheltenham, pp. 162-188.
- Weider, M., Metzner, A., Rammler, S., 2003. *Die Brennstoffzelle zwischen Umwelt-, Energie- und Wirtschaftspolitik*. WZB, Berlin.
- Winkel, M., 2002. When Systems are Overthrown: The 'Dash for Gas' in the British Electricity Supply Industry. *Social Studies of Science* 32 (4), 563-598.