

Einsatzfelder und Marktchancen von Brennstoffzellen in der industriellen und öffentlichen Kraft-Wärme-Kopplung

Martin Pehnt, Joachim Nitsch
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR),
Institut für Technische Thermodynamik, Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung,
Postfach 800320, D-70503 Stuttgart. +49(0)711-6862-784 (-783 Fax), martin.pehnt@dlr.de

Die Entwicklung von Brennstoffzellen mit einer Vielzahl an Pilot- und Demonstrationsprojekten im mobilen, aber auch im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung verläuft äußerst dynamisch. Die potenziell große energiewirtschaftliche Bedeutung eines zukünftigen Brennstoffzelleneinsatzes zeigt sich darin, dass in den Sektoren „Stromerzeugung“ und „Verkehr“, in denen deutlich über 50 % der deutschen CO₂-Emissionen entstehen, die derzeitigen Nutzungsgrade besonders gering sind. Maßgeblich für den Erfolg von Brennstoffzellen werden jedoch die Erreichbarkeit der Kostenziele und die politische Flankierung in der Einführungsphase sein.

1. Brennstoffzellen für den stationären Einsatz

Derzeit werden im stationären Anwendungsfeld vier Brennstoffzellenkonzepte mit Abwandlungen verfolgt [Dienhart 1998]. Die phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC) ist die am weitesten entwickelte Brennstoffzellentechnologie und wird kommerziell vermarktet (200-kW_{el}-Anlagen). Demonstrationsanlagen wurden überwiegend mit Erdgas im Leistungsbereich zwischen 50 kW_{el} und 11 MW_{el} erfolgreich betrieben [DLR 1999]. Die Anlagen haben einen elektrischen Wirkungsgrad von anfänglich 40 %, der allerdings bei Anlagen der ersten Generation nach 40 000 Betriebsstunden auf etwa 35 % zurückgeht. Ein PAFC-BHKW ist daher herkömmlichen Motor-Blockheizkraftwerken (BHKW) hinsichtlich der Energieausbeute kaum überlegen. Derzeit ist die PAFC mit spezifischen Investitionskosten um 6 000 DM/kW auch wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig gegenüber Motor-BHKW. Durch weitere Rationalisierungsmöglichkeiten bei der Serienfertigung wird in naher Zukunft eine Kostensenkung auf ca. 2 000 bis 2 500 DM/kW für möglich gehalten [Fischer 1997].

Die Hochtemperatur-Brennstoffzellen Molten-Carbonate- (MCFC) und Solid-Oxide Fuel Cell (SOFC) haben den Vorteil, dass bei hohen Betriebstemperaturen interne Reformierung (Umwandlung des Erdgases in ein wasserstoffreiches Gas) möglich ist und dadurch höhere Wirkungsgrade erreichbar sind. Außerdem bestehen keine besonderen Anforderungen an die Gasreinheit bezüglich Kohlenmonoxid. Prozesswärme ist bei relativ hoher Temperatur auskoppelbar. Zwar sind bereits erste Demonstrationsanlagen im Leistungsbereich zwischen 100 kW_{el} und 2 MW_{el} in Betrieb und weitere in Planung, marktreife Systeme sind jedoch erst mittelfristig zu erwarten, wenn Langzeitstabilitätstests erfolgreich abgeschlossen und deutliche Kostendegressionen in Sicht sind [DLR 1999].



PAFC

ONSI: 200 kW_{el} kommerziell erhältlich.
Weltweit zahlreiche Anlagen, davon 8 in
Deutschland (z. T. mit H₂ und Klärgas)
 $\eta_{el} = 36 - 40 \%$, $\eta_{ges} = 80 \%$

FUJI: Markteinführung einer 100 kW_{el} gepl.



PEFC

Ballard: vier Anlagen mit 250 kW_{el} in 2000,
davon eine in Berlin.

Ziel: 40 %, $\eta_{ges} = 80 \%$

Hausheizungssysteme, z. B.

Vaillant/GE/Plug Power, 4,5 kW_{el}, 35 kW_{th},
American Power Corp. (Hamburg): 3-4 kW_{el},
Energy Partners/Fraunhofer ISE (Risa): 7,5 kW_{el},
ZSW, Fachhochschule Ulm: 5 kW_{el} u.a.



MCFC

Deutschland:

mtu Hot module (Bielefeld)

International:

Japan: 1 MW_{el}-Demoanlage (**Hitachi**), in Bau

Mailand: 100 kW_{el}-Demoanlage (**Ansaldo
Ricerche**), in Betrieb

Santa Clara: 2,8 MW_{el}-Demoanlage (**ERC**),
inzwischen außer Betrieb



SOFC:

Siemens Westinghouse: eine Pilotanlage 100
kW_{el} (Westervoort). Pilotanlagen in Irvine
(Kalifornien) in Bau, RWE und EnBW (300 bzw.
1000 kW_{el}) geplant. $\eta_{el} = 47 \%$, Ziel: 55 %,
mit GT bis zu 68 %.

Sulzer HEXIS: 3 kW_{el} Haussysteme

u.a. (Allied Signal, Ztek, Delphi, SOFCo)

Abbildung 1: Anwendungen von Brennstoffzellen im stationären Bereich

Die Polymer-Membran-Brennstoffzelle (PEFC) ist wegen der niedrigen Betriebstemperatur und der hohen Dynamik für den mobilen Einsatz von besonderem Interesse und wird von mehreren Firmen intensiv für diese Anwendung entwickelt. Erste Demonstrationsfahrzeuge sind PEFC-Busse mit Wasserstoff in den USA und Kanada sowie PKW zahlreicher Automobilhersteller weltweit. Verglichen mit den anderen Brennstoffzellen-Technologien hat die PEFC durch die Entwicklungen für mobile Anwendungen einen wesentlichen Vorteil bei der Markteinführung in stationären Anwendungen, da mit deutlichen „Mitnahmeeffekten“ zu rechnen ist. Die Problematik, einen geeigneten Speicher für den Kraftstoff Wasserstoff zu finden, hat dazu geführt, dass alternativ andere Kraftstoffe, vor allem Methanol und Benzin, für Brennstoffzellen-Fahrzeuge in Betracht gezogen werden. Dies kompliziert allerdings den verfahrenstechnischen Aufwand aufgrund der notwendigen Umwandlung in Wasserstoff erheblich. Zudem wird durch diese Umwandlung der Gesamtwirkungsgrad der Nutzungskette reduziert. Außerdem entstehen CO₂ und sehr geringe Mengen Schadstoffe. Als Anwendung von PEFC im stationären Bereich zeichnet sich neben Entwicklungen von BHKW größerer Leistung mit etwa 250 kW_{el} mit den Kleinsystemen zur Hausversorgung (Leistungsbereich ca. 1 bis 5 kW_{el}) eine zweite Entwicklungslinie ab. Für eine stationäre Nutzung der PEFC ist die Reformierung von Erdgas erforderlich.

2. Wesentliche Vorteile von Brennstoffzellen

Hohe Wirkungsgrade. Der elektrische Wirkungsgrad von Brennstoffzellen im Vergleich zu konventionellen Energiewandlern ist sowohl im mobilen wie auch im stationären Bereich der wesentliche Vorteil. Auf der Basis des Brennstoffs Erdgas beispielsweise sind Brennstoffzellen in allen Größenklassen die effizientesten Energiewandler (**Abbildung 2**).

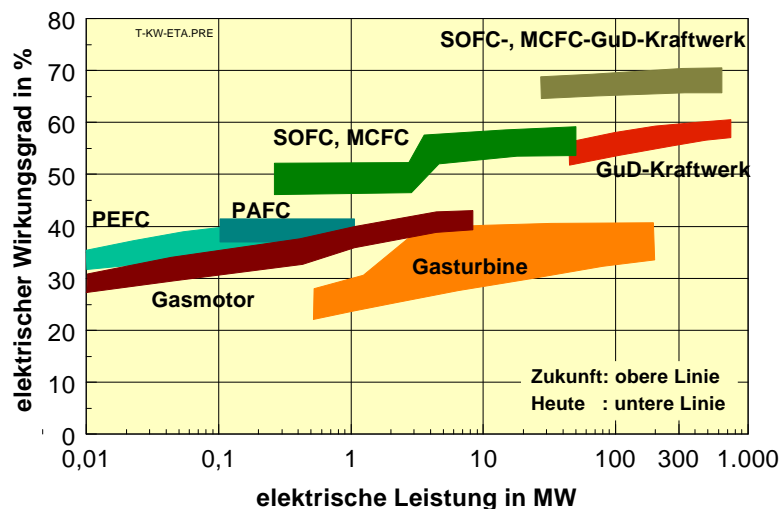


Abbildung 2: Elektrischer Wirkungsgrad von Erdgas- (Heiz-) Kraftwerken im Leistungsbereich von 0,01 bis 1 000 MW

Schadstoffemissionen. Neben den hohen Wirkungsgraden und den damit einhergehenden geringeren CO₂-Emissionen sind die nahezu zu vernachlässigenden direkten Emissionen ein wesentlicher Vorteil. Bei Wasserstoffbetrieb treten keine Emissionen auf, bei notwendiger

Reformierung nur geringste Mengen (**Abbildung 3**). Allerdings sind die geringen direkten Schadstoffemissionen und der hohe Wirkungsgrad nicht alleine ausschlaggebend für die Bewertung von Brennstoffzellen. Vielmehr muss der gesamte Lebensweg, also auch die Herstellung der Energieträger und der Anlagen sowie deren Entsorgung, berücksichtigt werden.

Eine umfassende Ökobilanz stationärer und mobiler Brennstoffzellensysteme wird in [Pehnt 2000a, Pehnt 2000b] veröffentlicht. Beispielhaft ist in **Abbildung 4** das Ergebnis solcher Ökobilanzen für einige ausgewählte Umweltprobleme („Wirkungskategorien“) und Emissionen aufgeführt. Die großen Vorteile im Bereich der Ressourcenschonung und der Treibhausgas-Emissionen, aber insbesondere auch der Umwelteinwirkungen, die auf Schadstoffemissionen zurückgehen (z. B. Versauerung, Eutrophierung (Überdüngung), kanzerogene Emissionen) sind ersichtlich. Brennstoffzellen in der KWK vermeiden insbesondere die bei Gasturbinen- oder Motor-BHKWs auftretenden Stickoxid-Emissionen, die in der Umwelt u. a. eine versauernde und eutrophierende Wirkung haben und zudem für die Entstehung bodennahen Ozons verantwortlich sind. Zwei Aspekte sind darüber hinaus in Abbildung 4 bemerkenswert:

- alle KWK-Technologien weisen vorteilhaftere Ressourcenverbräuche und Klimabilanzen auf als Systeme der zentralen Stromerzeugung; KWK ist also als solcher Vorrang einzuräumen;
- es ist Wert auf eine Optimierung des *Gesamtwirkungsgrades* zu legen; PEFC-BHKWs weisen einen höheren Ressourcenverbrauch auf als Ottomotor-BHKWs. Letztere haben Wirkungsgrade von bis zu 100 % durch Brennwertnutzung, die Zielwerte von PEFC-BHKWs liegen bei 80 %. Zukünftig sollten auch Brennstoffzellen hinsichtlich der Wärmeabgabe z. B. durch Brennwertnutzung und Nutzung der Reformierwärme optimiert werden.

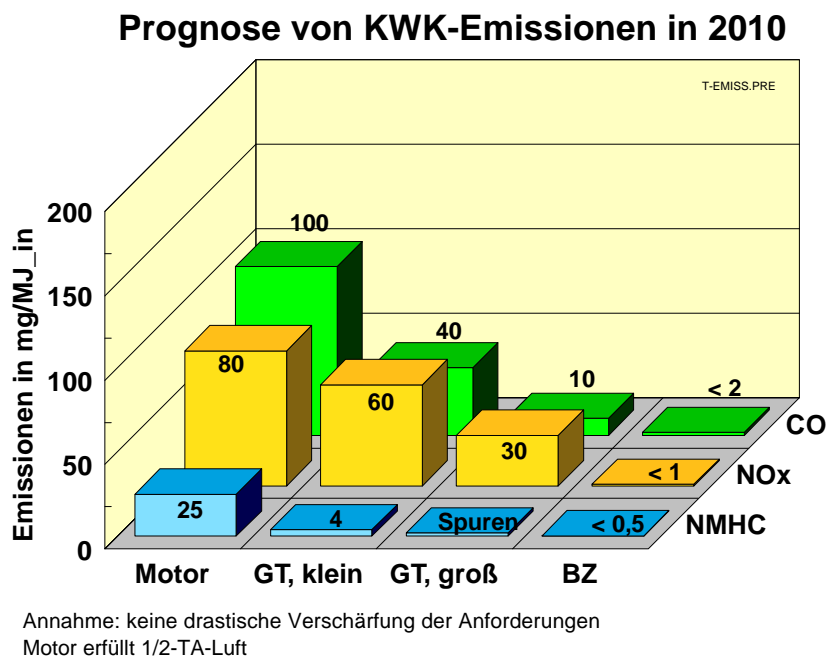


Abbildung 3: Emissionen von zukünftigen Kraft-Wärme-Kopplungssystemen

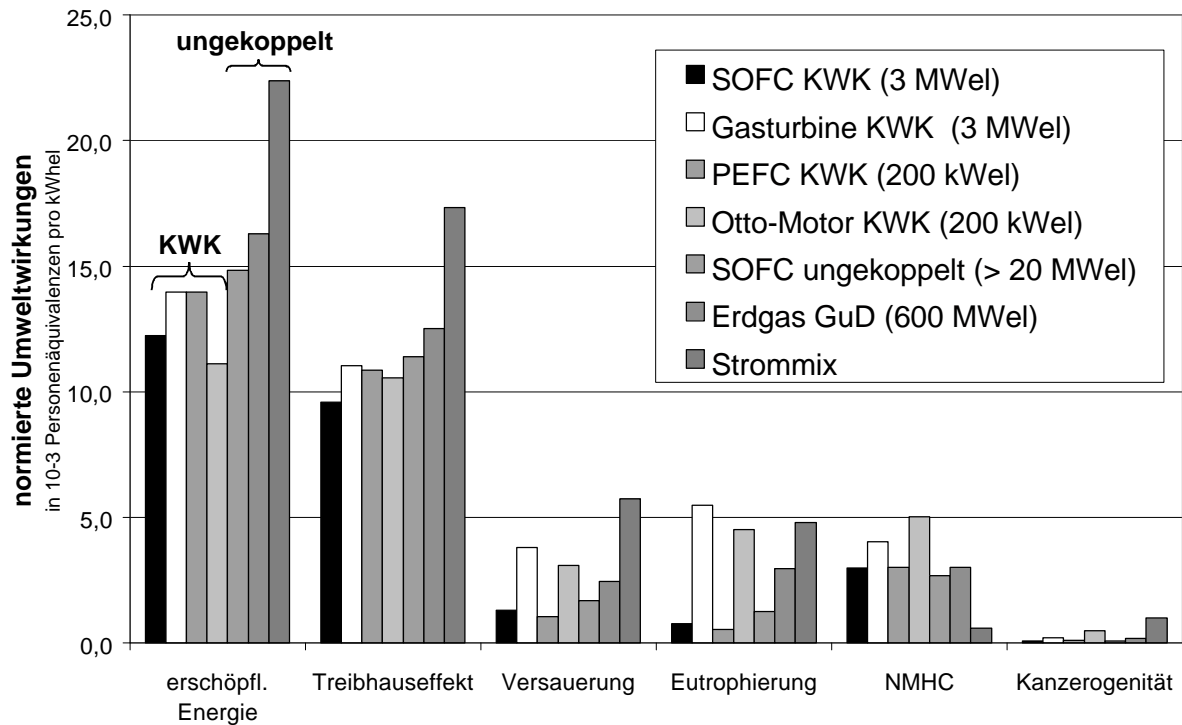


Abbildung 4: Ergebnis einer exemplarischen Ökobilanz der stationären Stromversorgung [Pehnt 2000a]. Umweltwirkungen sind normiert auf die täglichen Pro-Kopf-Emissionen in Deutschland ("Personenäquivalenzen")

$10 \cdot 10^{-3}$ Personenäquivalenzen entsprechen erschöpf. Energie: 4,93 MJ; Treibhauseffekt: 361 g CO₂-Äquivalente; Versauerung: 1,46 g SO₂-Äquivalente; Eutrophierung: 0,153 g PO₄³⁻-Äquivalente; NMHC: 0,625 g; Kanzerogenität: 2,54 e-6 g (URF-gewichtet).

Hohe Stromkennzahl. Eine hohe Stromkennzahl kann aus zwei Gründen attraktiv sein: Oftmals gibt es Probleme der *Wärmeintegration*. Es lassen sich zwei Temperaturbereiche identifizieren, in denen ein hoher Wärmebedarf aufzuzeichnen ist [DLR 1999]: ein Niedertemperaturbereich für Raumwärme, Brauchwasser bzw. Dampfbedarf zum Antrieb von Kälteanlagen zur Kaltwassererzeugung und Tieftemperaturkälte mittels Absorptionskälteanlagen (ca. 90 - 160 °C) und ein Hochtemperaturbereich oberhalb von 800°C, der nicht mit KWK abzudecken ist. Kann die erzeugte Wärme nicht abgesetzt werden, sondern muß weggekühlt werden, so vermindert sich der Umwelt- und Betriebsvorteil des Kraftwerks erheblich.

Zum zweiten ist für den wirtschaftlichen Betrieb die *Übereinstimmung von Strom- und Wärmenachfrage mit der Strom- und Wärmeerzeugung* optimal. In verschiedenen stromintensiven Branchen ist daher der Einsatz von Brennstoffzellen attraktiv, da dort der erzeugte Strom nicht in das Netz eingespeist werden muß, sondern den Strombezug vom Energieversorger substituiert. Hier sind Gasturbinen mit einer Stromkennzahl von typischerweise 0,5 benachteiligt. Beispiele sind metallverarbeitende Betriebe, die elektrolytische Produktion von Aluminium, Chrom oder Magnesium. Zudem ist ein Trend zu verstärkter Stromnachfrage in der Industrie erkennbar.

Nutzung von Restwasserstoff. Vorteilhaft für den Einsatz von Brennstoffzellen ist auch das Vorhandensein von Restwasserstoff. Zu unterscheiden sind im wesentlichen *ungenutzter Wasserstoff*, der derzeit abgeblasen oder vor dem Abblasen entzündet wird, und *Substitutionswasserstoff*, der heute zur Bereitstellung thermischer Energie, in der Regel in Brennern, genutzt wird. Das Potential durch Nutzung anderweitig nicht genutzten Wasserstoffes ist mit ca. 16 Mio. Nm³/a (entsprechend einer möglichen installierten Brennstoffzellenleistung von 7 MW_{el}) sehr gering. Deutlich höher ist das Potential an Substitutions-Wasserstoff mit 980 Mio. Nm³/a entsprechend 420 MW_{el} installierter Leistung, davon ca. 30 % aus der Chlorchemie [DLR 1999].

Weitere Vorteile. Hinzu können weitere Vorteile oder vorteilhafte Rahmenbedingungen treten, wie das Vorhandensein von reinem Sauerstoff (Beispiel Chlor-Alkali-Elektrolyse) oder eine kritische Emissionssituation in Ballungsräumen oder Kurgebieten. Geräuscharm und der modulare Aufbau können sich beim Betrieb in KWK als vorteilhaft erweisen.

3. Anforderungen der Nutzer an Brennstoffzellen-BHKW

Die Analyse macht deutlich, daß keine Technologie die vielfältigen Nutzeranforderungen komplett erfüllt bzw. diese nicht von allen Technologien gleich gut erfüllt werden (**Tabelle 1**). Das ist auch ein wesentlicher Grund dafür, daß schon immer ganz unterschiedliche Energietechniken eingesetzt wurden. Für den konkreten Anwendungsfall muss stets eine Gewichtung der relevanten Anforderungen vorgenommen werden.

Trotzdem sind einige *obligatorische Anforderungen* von allen Energiewandlern zu erfüllen, etwa die Wirtschaftlichkeit gegenüber Strombezug, die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben (z.B. Emissionsvorgaben) und zuverlässiger, automatischer, kostengünstiger und wartungsarmer Betrieb.

Andere Anforderungen sind eher *projektspezifisch* zu betrachten, etwa Dual-Fuel Betrieb (Umschaltung von Erdgas auf Heizöl), der Einsatz von festen Brennstoffen, die Vorgabe einer bestimmten Einbaufläche oder die Deckung eines bestimmten Temperaturniveaus bei KWK-Anwendung. Hier haben Techniken Marktvorteile, die ein weites Anforderungsspektrum abdecken.

Tabelle 1: Zusammenfassung der technischen Eigenschaften, der Erfüllung von Nutzeranforderungen an Kraftwerke und der Emissionen [DLR 1999] (grau: Vorteil für Brennstoffzelle)

Parameter	Dampf-turbine	Gas-turbine	Motor-BHKW	GuD	Kohle-kraftwerke	Hochtemperatur-Brennstoffzellen	Niedertemperatur-Brennstoffzellen
Elektrischer Wirkungsgrad							
- bis 10 MW	niedrig - mittel	mittel	mittel - hoch	-	-	extrem hoch	hoch
- über 10 MW	-	mittel	mittel	sehr hoch	mittel	extrem hoch	-
Stromkennzahl	< 0,5	0,4 - 1,3	0,4 – 1,1	0,4 - 1,3	-	> 2	1
Gesamtwirkungsgrad bei KWK-Betrieb	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch	vergleichbar mit Konkurrenz	vergleichbar mit Konkurrenz
Teillastwirkungsgrad	mittel	schlecht	mittel – gut	mittel – gut	mittel	sehr gut	gut
Temperaturniveau							
- Raumwärme	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich
- Prozeßdampf	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	nicht möglich
Betriebsweise							
- Grund-/Mittellast	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
- Spitzenlast		ja	ja			nur eingeschränkt	ja
Dual Fuel Betrieb (Gas + Heizöl)	mit speziellen Anlagen möglich				-	nicht bzw. eingeschränkt möglich	nicht bzw. eingeschränkt möglich
Wartungsaufwand	mittel	mittel	mittel – hoch	mittel	mittel	potentiell gering	potentiell gering
Anfahrzeit (nach Betriebsunterbrechung von einigen Stunden)	k.A.	5 - 20 min	ca. 5 min	20 - 50 min	2 - 3 h	je nach Brennstoff und Betriebsmodus	ms (Wasserstoff) bis 3 h (Erdgas)
Lastwechselgeschwindigkeit	gut	gut	gut	gut	gut	potentiell hoch	potentiell hoch
Verfügbarkeit, automatischer Betrieb	gut	gut	gut	gut	gut	potentiell sehr gut (keine beweglichen Teile)	potentiell sehr gut (keine beweglichen Teile)
Wirtschaftlichkeit	je nach Nutzerkontext			sehr gut	gut	noch nicht erreicht	noch nicht erreicht
Umweltwirkungen							
- Ressourcenverbrauch	mittel	gut	gut	gut	schlecht – mittel	sehr gut	gut
- Treibhauseffekt	mittel	gut	gut	gut	schlecht – mittel	sehr gut	gut
- NO _x , Versauerung	schlecht – mittel	schlecht – mittel	schlecht – mittel	mittel	schlecht	sehr gut	sehr gut

4. Kostenanforderungen an Brennstoffzellen-BHKW

Stromgestehungskosten kommerzieller PAFC-BHKW liegen unter Berücksichtigung entsprechender Wärmegutschriften derzeit zwischen 22 und 26 Pf/kWh_{el}, also gut beim Zweifachen der Stromkosten vergleichbarer Motor-BHKW. Um nennenswerte Marktsegmente erschließen zu können, müssen sich Brennstoffzellen-Anlagen jedoch am Kostenniveau zukünftiger moderner Motor- und Turbinen-KWK-Anlagen orientieren oder durch günstigere technische Parameter eine ausreichende Kompensation eventueller Kostenunterschiede ermöglichen. Die Abschätzung der „zulässigen“ Investitionen im KWK-Sektor [DLR 1999], das heißt der Investitionskosten, die gleiche Stromgestehungskosten wie die des Vergleichssystems bedingen, führt bei Systemen im Leistungsbereich 1 bis 10 MW_{el} zu Erstinvestitionen von etwa 1 400 bis 2 100 DM/kW_{el} für das Brennstoffzellenmodul einschließlich Einbindung (**Abbildung 5**). Dies liegt etwa 20-30 % über denen der konventionellen Systeme. Positiv auf die Wirtschaftlichkeit wirken sich die Brennstoffeinsparung aufgrund des höheren Wirkungsgrades sowie die gerin-

geren Wartungskosten aus. Der notwendige Ersatz des Stacks nach jeweils 5 Betriebsjahren schlägt negativ zu Buche. Wegen der höheren Stromkennzahl spielen die Erlöse aus der Nutzwärme eine geringere Rolle als bei herkömmlichen KWK-Systemen.

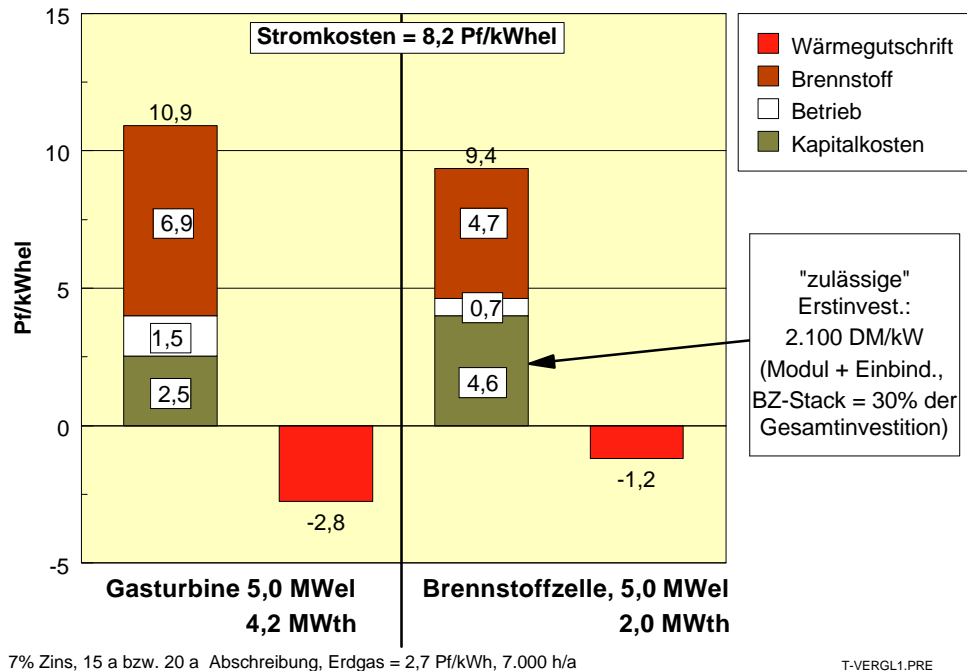


Abbildung 5: Kostenstruktur von konventioneller und Brennstoffzellen-KWK am Beispiel einer industriellen Anwendung mit 5 MW_{el} bei gleichen Stromgestehungskosten

Je kleiner die Systeme sind, um so mehr wächst die zulässige Differenz der Investitionskosten, da die Wirkungsgradvorteile von Brennstoffzellen gegenüber Motor- und Turbinenanlagen für kleine Leistungen steigen. Im Bereich kleiner Hausheizungssysteme sind außerdem die höheren anlegbaren Strompreise für einen Einsatz von Brennstoffzellen vorteilhaft, sodass derartige Systeme auch bei Investitionskosten von 3 000 bis 4 000 DM/kW_{el} noch wirtschaftlich attraktiv sein können. Die angestrebten Zielkosten, beispielsweise des Heizkesselherstellers Vaillant, liegen daher in diesem Bereich.

5. Die zukünftige Entwicklung der KWK

Steigende Wirkungsgrade der ungekoppelten Stromerzeugung, beispielsweise zukünftiger Gas- und Dampf (GuD)-Kraftwerke mit bis zu 60 % elektrischen Wirkungsgrades, erfordern zukünftig auch bei KWK-Anlagen steigende Wirkungsgrade bei gleichzeitig hohem Gesamtnutzungsgrad, um die Effizienz- und Emissionsvorteile beibehalten zu können. Hier bieten Brennstoffzellen zweifelsfrei große Chancen bis hinein in den Bereich kleiner Leistungen.

Allerdings ist die KWK derzeit großen ökonomischen Belastungen ausgesetzt. Der verschärfte Preiswettbewerb, der die Anfangsphase der Liberalisierung des Strommarktes kennzeichnet, setzt selbst etablierte und ausgereifte KWK-Techniken unter starken Konkurrenzdruck, (Ab-

bildung 6). Anzeichen sind im abnehmenden Zubau von BHKW in den letzten 2 Jahren und dem Absatzrückgang der Hersteller erkennbar. Potenzielle KWK-Investoren agieren sehr zurückhaltend, teilweise werden sogar neuere KWK-Anlagen zurückgefahren oder gar abgebaut. Die Stromsteuer im Zuge des Einstiegs in die ökologische Steuerreform ist wesentlich geringer als die starken Preissenkungen beim Strom. Auch die Befreiung von KWK-Anlagen bis 2 MW_{el} von der Stromsteuer wirkt sich derzeit nur in relativ geringem Maße positiv aus. Die Liberalisierung des Strommarktes wird daher nur dann positive Effekte auf die Entwicklungschancen der KWK haben, wenn konkrete Vereinbarungen, z.B. in Form von Quoten, über den gewünschten Beitrag von KWK-Strom in der Energieversorgung getroffen werden. Eine Liberalisierung, welche dagegen ihr Schwergewicht ausschließlich auf eine möglichst wirksame Strompreissenkung legt, wird das weitere Wachstum der KWK verhindern und damit auch keine nennenswerten Märkte für neue Technologien wie die Brennstoffzelle bieten.

<p>Nachteile, Hemmnisse infolge Liberalisierung des Strommarktes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Sinkende Strompreise, Verdrängungsprozess durch kurzfristige Grenzkosten (Strompreis-Dumping), Vertragslaufzeiten werden kürzer (Industrie) → KWK-Stromerzeugung vermehrt unwirtschaftlich, insbesondere Industrie; Stilllegung von Anlagen, vorwiegend Stadtwerke. ◆ Geringere Planungssicherheit, kurzfristige Amortisationserwartungen → Anlagen mit niedrigen Kapitalkosten werden bevorzugt ◆ Mittelknappheit bei Kommunen, Duale Finanzierung bei öffentlichen Einrichtungen (z.B. Krankenhäuser) → Investitionen in öffentliche KWK-Anlagen unterbleiben
<p>Chancen infolge Liberalisierung:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Unabhängige Stromerzeuger gewinnen Einflussmöglichkeiten, ◆ Liberalisierung des Gasmarkts → sinkende Gaspreise ? ◆ Energieversorger mit vielfältigen Dienstleistungen haben Vorteile
<ul style="list-style-type: none"> ◆ KWK-Gesetz seit 17.5.2000 in Kraft → Mindestvergütung durch Netzbetreiber unter bestimmten Bedingungen garantiert: 9 Pf/kWh, - 0,5 Pf/kWh/a
<p>Industrie, Gewerbe und Private ausgeschlossen</p>
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Ökosteuer: Anlagen < 2 MW (Eigennutzung, Contracting) keine Stromsteuer, bei eta >70% keine Mineralölsteuer ◆ Erneuerbare Energien Gesetz: KWK aus Klär-, Deponie-, Bio- und Grubengas günstig vergütet ◆ KWK – Quotenregelung ab 2001 ?
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Bestehende bzw. zukünftige Kraftwerks- und Infrastruktur → Aus Altersgründen erforderlicher Ersatz bis 2020 von 1/3 der Gesamtkapazität, Wachsende Gasnetze erleichtern dezentrale KWK;
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Zunehmender Wirkungsgrad auch der ungekoppelten Stromerzeugung → nur Anlagen mit hohem Gesamtnutzungsgrad und hoher Stromkennzahl sinnvoll; bei großen HKW nur noch Ersatzbedarf (Erdgas verdrängt Kohle)

Abbildung 6: Energiepolitische Rahmenbedingen für den Einsatz von KWK (grau unterlegt: Nachteile für KWK; weiß: Vorteile für KWK)

Unter der Annahme eines Zubaus moderner KWK-Anlagen mit einem entsprechenden Anstieg der mittleren Stromkennzahl von derzeit 0,38 auf 0,58 lässt sich für Deutschland unter detaillierter Berücksichtigung der Wärmepotenziale ein technisches KWK-Strompotenzial von rund 200 TWh/a abschätzen (1998: 71 TWh/a [AGFW 2000]), (**Abbildung 7**). Rund 35 % der gesamten Bruttostromerzeugung Deutschlands könnten somit mittels KWK bereitgestellt werden. Aufgrund der sehr begrenzten Ausweitungsmöglichkeiten größerer Fernwärmeversorgungen wird eine Ausschöpfung dieses Potenzials vor allem im Bereich mittlerer und kleinerer (bis zu sehr kleinen) KWK-Anlagen stattfinden müssen, wenn dieses Potenzial wirksam erschlossen werden soll. Neben dem Ausbau der industriellen KWK verlangt dies daher in starkem Maße die Versorgung von Einzelgebäuden, Nahwärmeinseln und (mittels Nahwärmenetzen) von geeigneten Siedlungen. Insgesamt entspricht diese mögliche Ausweitung einer potenziellen Gesamtleistung dezentraler BHKW (bis ca. 10 MW_{el}) von rund 18 000 MW_{el} bzw. 15 % der derzeitigen Stromerzeugungskapazitäten [Nitsch 1997].

Im Widerspruch zur aktuellen kritischen Situation der KWK, wird sie unter Effizienz- und Klimaschutzgesichtspunkten als wichtige Zukunftsoption gesehen. Im Zusammenhang mit dem beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie gewinnt sie zusätzlich an Bedeutung, da sie rasch und kostengünstig mobilisierbar ist, wenn faire Rahmenbedingungen geschaffen werden können. Energiepolitisch wird bis 2010 eine Verdopplung der Stromerzeugung aus KWK diskutiert, die zusätzlich eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes von 23 Mio. t/a bringen würde. Aus heutiger Sicht ist jedoch schon die prognostizierte Trendentwicklung /Prognos 2000/ mit einem Anstieg um rund 50% bis 2010 extrem unwahrscheinlich. Das jüngst in Kraft getretene KWK-Gesetz kann bestenfalls einen gewissen Bestandsschutz sichern, ist jedoch keine Ausgangsbasis für eine dynamische Weiterentwicklung des KWK-Marktes. Deshalb wird seit einiger Zeit intensiv eine Quotenregelung für

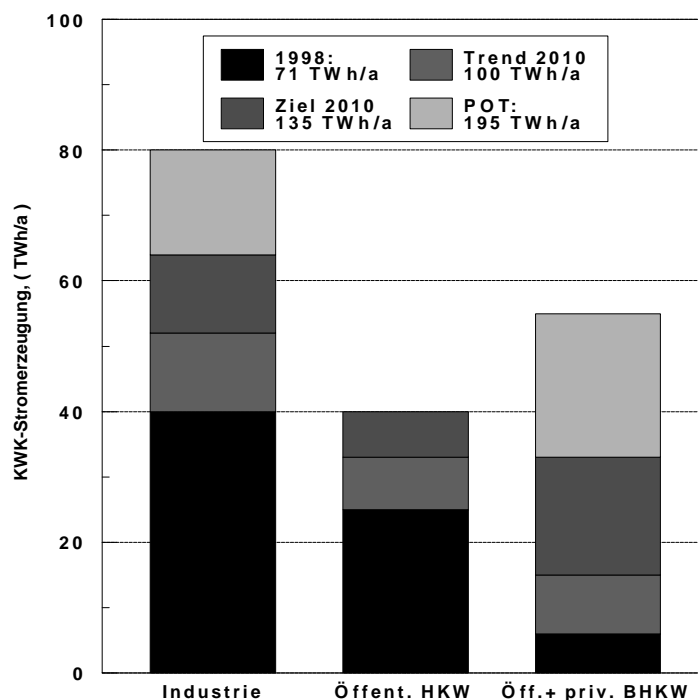


Abbildung 7: Heutiger Beitrag der KWK zur Stromerzeugung, möglicher bzw. angestrebter Ausbau und Potentiale in den Segmenten Industrie, Öffentliche HKW bzw. Fernwärme und dezentrale KWK

die KWK diskutiert, die aus heutiger Sicht die einzige Möglichkeit darstellt, rechtzeitig, d.h. bis 2010 das angestrebte Verdopplungsziel zu erreichen. Findet längerfristig im liberalisierten Markt die Strompreisgestaltung wieder auf der Basis langfristiger Grenzkosten, also auf der Basis von Kosten neu zu bauender Anlagen statt, haben moderne KWK-Anlagen auch ohne flankierende Regelungen gute Marktchancen.

6. Die Marktchancen der Brennstoffzelle

Im wichtigen Marktsegment der dezentralen KWK bis 10 MW_{el} betrug 1998 die installierte Leistung rund 3 500 MW_{el}, wovon ca. 60 % Motor-BHKW und 40 % Gasturbinen sind. Gasturbinen mit Leistungen > 10 MW_{el} haben zusätzlich einen Marktanteil von rund 3 150 MW_{el}. Motor-BHKW hatten in den letzten Jahren Zuwachsraten von rund 250 MW_{el}/a. Derzeit ist ein Rückgang des Marktes auf unter 200 MW_{el}/a zu beobachten. Ein extremer Rückgang ist bei Gasturbinen festzustellen. Von nahezu 1 000 MW_{el}/a in 1996 ist der Absatz im Jahr 1998 auf lediglich 140 MW/a abgestürzt [ASUE 1999, Fördergemeinschaft 1999].

Der zukünftige Markt für dezentrale KWK-Anlagen im Leistungsbereich bis 10 MW_{el} kann aufgrund der unsicheren Situation im liberalisierten Strommarkt eine sehr unterschiedliche Entwicklung nehmen (**Abbildung 8**). Gelingt es, wieder an die Wachstumsraten der letzten 5 Jahre anzuknüpfen, so können mit mittleren Zuwachsraten von 300-400 MW_{el}/a bereits bis 2010 bedeutende Anteile des KWK-Potenzials erschlossen werden. Dann können auch Spielräume für die Brennstoffzelle als neue KWK-Technologie in einer Größenordnung von 100 MW/a allein für den deutschen Markt entstehen.

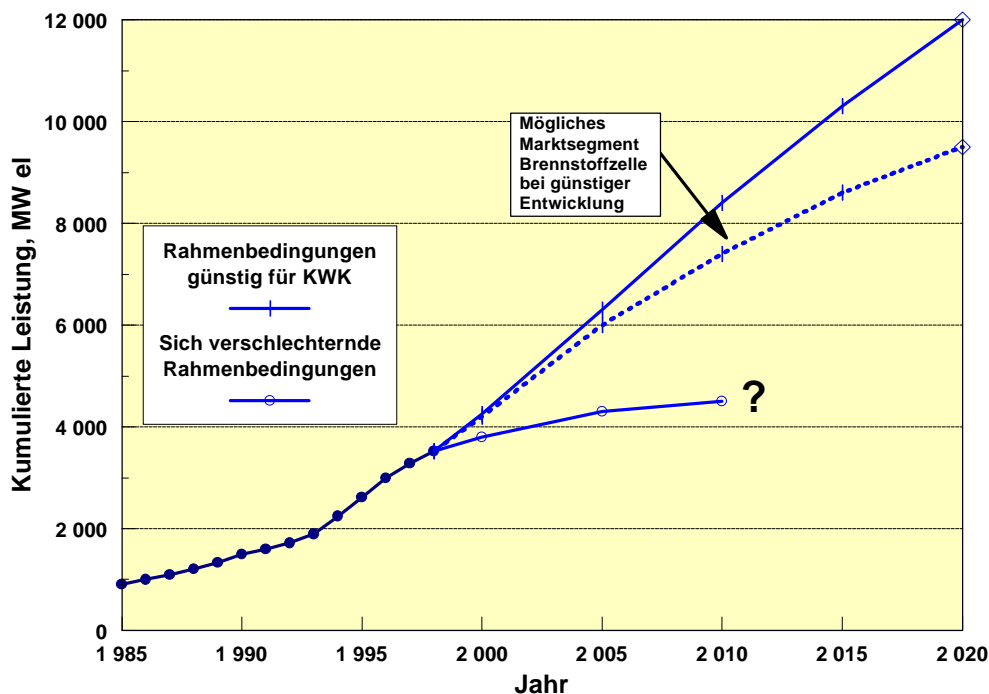


Abbildung 8: Bisherige Entwicklung des KWK-Marktes (bis 10 MW_{el}) und zukünftig mögliche Bandbreite einschließlich des Marktsegments für Brennstoffzellen

Die Größe des potenziellen Marktsegments für Brennstoffzellen in der KWK hängt wesentlich von den Vorteilen der Brennstoffzellentechnik im Vergleich zu den Konkurrenztechnologien ab. Auch bei konventionellen Systemen sind in Zukunft weitere technische Verbesserungen und Kostensenkungen zu erwarten, beispielsweise durch Aufladung der Otto-Motoren oder durch neue Materialien, verbesserte Brennerkonstruktionen, höhere Temperaturen und Drücke, Injektion von Wasserdampf und Rekuperatoren bei Gasturbinen. Im Hausheizungsbereich können Brennstoffzellensysteme attraktiv sein, weil bei stagnierendem Heizungskesselmarkt technische Optimierungspotenziale weitgehend ausgereizt sind. Innovative Systeme bieten hier die Möglichkeit, sich von weitgehend identischen Konkurrenzprodukten abzusetzen. In Verbindung mit einem Nachbrenner können solche Systeme Einzelhaushalte, kleine Nahwärmenetze und Gewerbebetriebe mit einem hohen Grundlastanteil versorgen. Deutschlandweit schätzt Vaillant den Markt auf bis zu 40 000 Systeme im Jahr 2010, europaweit auf 100 000 Stück, wenn es gelingt, die jetzigen Preise zu dritteln.

Die Markteinführung von Brennstoffzellen im stationären Bereich wird daher zunächst in dezentralen Anwendungen im Leistungsbereich von etwa 0,2 bis 10 MW_{el} erfolgen. Dieser Leistungsbereich wird derzeit von allen Entwicklern verfolgt. Kleine Systeme haben den Vorteil, dass die zulässigen spezifischen Investitionen der Brennstoffzellen höher sein dürfen, die technische Realisierbarkeit einfacher ist und Demonstrationsanlagen aufgrund des geringeren Investitionsbedarfs einfacher zu finanzieren sind. Außerdem muss die Markteinführung für den Hersteller Perspektiven zum Erreichen der erforderlichen Produktionsraten eröffnen. Die Produktion ist möglichst auf eine Fertigungsanlage zu konzentrieren, um Serieneffekte zu nutzen. Daher sind strategische Partnerschaften sinnvoll (Zellstack oder Zellen eines Herstellers in Systemen verschiedener Anlagenbauer).

Der Markt für Brennstoffzellen wird sich auch bei günstiger Gesamtentwicklung des KWK-Marktes nur langsam erschließen lassen, da keine neuen Marktlücken für Brennstoffzellen vorhanden sind. In allen potenziellen Anwendungen sind bereits konventionelle KWK-Systeme etabliert bzw. können angepasst werden. Verschiedene Typen von Brennstoffzellen machen sich sowohl im Siedlungsbereich als auch bei Industrie- und Kraftwerksanwendungen Konkurrenz. Es kann daher schwierig sein, alle Systeme in einem begrenzten Markt unterzubringen. Das gleiche gilt für die unterschiedlichen Systemkonzepte verschiedener Hersteller.

Wesentliche Voraussetzung für Kostensenkungen sind praxisreife Demonstrationsanlagen mit belastbaren Angaben zu Langzeitstabilität und Betriebsverhalten. Die Herstellkosten müssen durch F&E-Erfolge bereits soweit gesenkt worden sein, dass weitere Kostensenkungen bis zur Konkurrenzfähigkeit gegenüber konventionellen Systemen hauptsächlich durch die Fertigungsfortschritte und größere Stückzahlen plausibel erscheinen. Als Beispiel kann die PAFC dienen, deren Vermarktung 1991 mit einem Einstandspreis von etwa 10 000 DM/kW_{el} bei einer weltweit kumulierten Leistung an Demonstrationsanlagen von 10 MW_{el} begann.

Geht man für MCFC oder SOFC der Leistungsklasse 500 kW_{el} von einem Einstandspreis der ersten zehn Anlagen von 10 000 DM/kW_{el} aus und unterstellt eine kumulierte Leistung zu Beginn der Serienfertigung von 5 MW_{el}, so lässt sich die erforderliche kumulierte Fertigung bis zum Erreichen der Zielkosten von 2 000 DM/kW_{el} mittels Lern- und Erfahrungskurven abschätzen, (**Abbildung 9**). Diese verknüpfen die Herstellkosten eines in größeren Stückzahlen gefertigten, standardisierten Produkts mit den kumulierten Produktionsmengen. Typischerweise sinken die Kosten zahlreicher Produkte um 10 bis 25 % bei Verdopplung der kumulierten Produktion [Rogner 1996, Mackay 1998]. Werden 20 % zugrunde gelegt (entspricht Lernfaktor 0,8), so ist eine kumulierte Leistung von etwa 700 MW_{el} erforderlich, um

die Zielkosten zu erreichen. Diese Orientierungswerte hängen allerdings sensibel von den angesetzten Parametern ab.

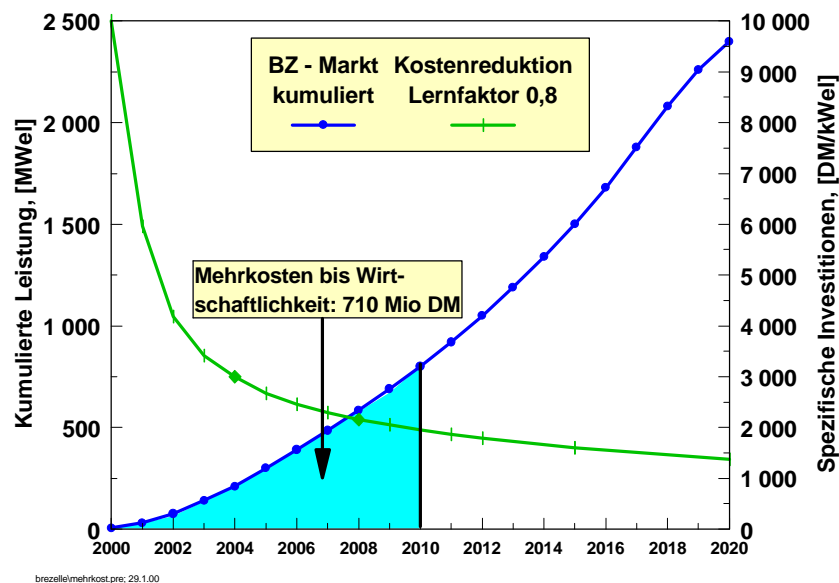


Abbildung 9: Brennstoffzellen-Markt im Bereich der KWK in Deutschland bei günstigen energiepolitischen Rahmenbedingungen sowie spezifische Investitionskosten und Mehrkosten für Hochtemperatur-Brennstoffzellen gegenüber dem allgemeinen Strompreisniveau bis zum Erreichen der Wirtschaftlichkeit

In einem optimistischen Wachstumsszenario für Brennstoffzellen, abgeleitet aus dem generellen KWK-Wachstum der Vergangenheit (vgl. Abbildung 8), kann diese Leistung und damit die rechnerische Wirtschaftlichkeit gegenüber dem allgemeinen Strompreisniveau nach rund 10 Jahren erreicht werden. Die Installation erfordert bis dahin Mehrkosten von rund 700 Mio. DM, die erst danach bei weiter wachsende Märkten wieder erwirtschaftet werden können. Eine nennenswerte Etablierung der Brennstoffzelle wird daher nur bei einer längerfristigen Verlässlichkeit des KWK-Marktes und signifikanten Wachstumsraten zu erwarten sein. Ist man nicht allein auf den deutschen Markt beschränkt, kann der Zeitraum bis zum Break-even-Punkt verkürzt und damit die Kostenbilanz rascher ausgeglichen werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine energiewirtschaftlich relevante Einführung der Brennstoffzelle in der Energiewirtschaft in entscheidendem Maße davon abhängt, ob weiterhin bzw. noch verstärkt (z.B. Quote für KWK, Ökosteuern) die energiepolitischen Rahmenbedingungen die Vorteile der Brennstoffzelle, nämlich hohe Effizienz und geringe bis vernachlässigbare direkte Emissionen honorieren.

7. Literatur

- [AGFW 2000] E. Jochem, W. Pfaffenberger, A. Voß u.a.: Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der KWK und der erneuerbaren Energien. Studie der AGFW im Auftrag des BMWi, Kurzfassung, Frankfurt, März 2000
- [ASUE 1999] ASUE: BHKW-Marktübersicht 1998. AG für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE), Kaiserslautern 1999.
- [Dienhart 1998] H. Dienhart, J. Nitsch und M. Pehnt: Ökologische und ökonomische Bewertung von PEFC-BHKW am Beispiel einer Nahwärmeversorgung. *Elektrizitätswirtschaft* 97 (1998), S. 50-53.
- [DLR 1999] DLR, H. Dienhart, M. Pehnt und J. Nitsch: Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen verschiedener Brennstoffzellensysteme in Industrie und zentraler öffentlicher Stromversorgung. Untersuchung für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V., Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart 1999.
- [Fischer 1997] M. Fischer, J. Nitsch und W. Schnurnberger: Technischer Stand und wirtschaftliches Potential der Brennstoffzellen-Technologie im internationalen Vergleich. Gutachten im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Endbericht. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart 1997.
- [Fördergemeinschaft 1999] Fördergemeinschaft: Entwicklung der BHKW in Deutschland 1986-1998. Fördergemeinschaft Blockheizkraftwerke, 1999.
- [Mackay 1998] R. M. Mackay und S. D. Probert: Likely Market Penetration of Renewable Energy Technologies. *Applied Energy* 59 (1998), S. 1-38.
- [Nitsch 1997] J. Nitsch: Potentiale und Märkte der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland, Otto-Technologie-Kolleg Regensburg Juni 1997. DLR-STB-Bericht Nr. 15. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart 1997.
- [Nitsch 1999] J. Nitsch, M. Walbeck, F. Staiß u.a.: Die Marktsituation von Brennstoffzellen. Jahrestagung des Forschungsverbunds Solarenergie, Ulm Oktober 1999
- [Pehnt 2000a] M. Pehnt: Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen als zukünftigen Energiesystemen. Veröffentlichung in Vorbereitung. Dissertation, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart 2000a.
- [Pehnt 2000b] M. Pehnt: Source-to-Service-Analyses for Mobile and Stationary Fuel Cell Solutions, Fuel Cell 2000, Luzern, in Vorbereitung
- [Prognos 2000] Energiereport III: Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. EWI Köln, Prognos Basel, Schäffer, Poeschel, Stuttgart 2000
- [Rogner 1996] H. H. Rogner: Hydrogen Technologies and the Technology Learning Curve. Institute of Integrated Energy Systems, University of Victoria B.C., Victoria, Kanada 1996.