Analyse von Einsatzmöglichkeiten und Rahmenbedingungen von Brennstoffzellen in industrieller Kraft-Wärme-Kopplung und zentraler Stromversorgung (Zusammenfassung)

H. Dienhart, M. Pehnt, J. Nitsch

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.

Institut für Technische Thermodynamik, Fachgebiet Systemanalyse und Technikbewertung, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart, Fax 0711-6862 783,
e-mail martin.pehnt@dlr.de

Komplette Studie zu bestellen bei anke.schrogl@dlr.de für DM 30,-

Neben Motoren, Gas- und Dampfturbinen werden mit Brennstoffzellen neue Energiewandler mit zum Teil von den konventionellen Systemen sehr verschiedenen Eigenschaften entwickelt. Dabei ist es auch möglich, Brennstoffzellen mit konventionellen Systemen wie z.B. Gasturbinen zu koppeln und somit weitere Systemverbesserungen zu erzielen (Hybridanlagen).

In dieser Untersuchung wurden die Nutzeranforderungen der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung und der zentralen Stromerzeugung an die Brennstoffzellen analysiert, das Umweltverhalten dieser Systeme im Vergleich zu den konventionellen Anlagen und die Wirtschaftlichkeit der Brennstoffzellen bewertet sowie die Möglichkeiten der Markteinführung skizziert. Für die Anwendungen in der industriellen Kraft-Wärme-Kopplung kommen aufgrund des erforderlichen Temperaturniveaus und in der zentralen Stromerzeugung aus Gründen des erforderlichen Wirkungsgrades nur die **Hochtemperatur-Brennstoffzellen** (MCFC und SOFC) in Betracht, die hier speziell untersucht werden.

Die Hochtemperatursysteme sind in einem sehr frühen Entwicklungsstadium, so dass sich die Aussagen zu deren Kenndaten in großem Maße an den angestrebten Entwicklungszielen der Hersteller orientieren. Die Erreichbarkeit der Kennwerte bei gleichzeitig niedrigem Kostenniveau ist nicht selbstverständlich, hier sind z.T. noch erhebliche Entwicklungsarbeiten notwendig.

Im unteren Leistungsbereich (bis etwa 10 MW_{el}) konkurrieren die BZ gegen Gasturbinen und Motor-BHKW, im oberen Leistungsbereich ab etwa 50 MW_{el} gegen GuD-Kraftwerke. All diese Systeme haben sich seit Jahren im praktischen Einsatz bewährt, konnten im Laufe der Zeit immer weiter optimiert werden und stehen zu relativ niedrigen Kosten zur Verfügung. Zum Teil werden auch ganz neue Entwicklungskonzepte verfolgt, etwa der Stirling-Motor mit dem Potenzial sehr geringer Emissionen (aufgrund der kontinuierlichen Verbrennung) oder die sogenannten „Micro-Turbines“,

Gasturbinensysteme mit kleiner Leistung (ab 30 kW_{el}), mit dem Potenzial niedriger Kosten im kleinsten Leistungssegment.

Aufgrund der immer noch erheblichen Entwicklungspotenziale von Motoren und Gasturbinen bezüglich Leistungsdichte, Wirkungsgrad, Emissionen und Kosten werden alle Systemvergleiche gegenüber einem Technologiestatus 2010 durchgeführt, der bereits heute absehbare Entwicklungen der konventionellen Energiewandler berücksichtigt.

Erfüllung von Nutzeranforderungen

Die Analyse macht deutlich, dass keine Technologie die vielfältigen Nutzeranforderungen komplett erfüllt bzw. diese nicht von allen Technologien gleich gut erfüllt werden. Das ist auch ein wesentlicher Grund dafür, dass schon immer ganz unterschiedliche Energietechniken eingesetzt wurden. Eine Wichtung der relevanten Anforderungen wird immer im Einzelfall erfolgen.

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.

Parameter	Dampf-turbine	Gas-turbine	Motor-BHKW	GuD	Kohle-kraftwerke	Hochtemperatur-Brennstoffzellen
Elektrischer Wirkungsgrad						
- bis 10 MW	niedrig - mittel	mittel	mittel - hoch	-	-	extrem 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
Gesamtwirkungsgrad bei KWK-Betrieb	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch	vergleichbar mit Konkurrenz
Teillastwirkungsgrad	mittel	schlecht	mittel – gut	mittel – gut	mittel	sehr gut
Temperaturniveau						
- Raumwärme	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich
- Prozeßdampf	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich	möglich
Betriebsweise						
- Grund-/Mittellast	ja	ja	ja	ja	ja	ja
- Spitzenlast		ja	ja			nur eingeschränkt
Dual Fuel Betrieb (Gas + Heizöl)	mit speziellen Anlagen möglich				-	nicht bzw. eingeschränkt möglich
Wartungsaufwand	mittel	mittel	mittel – hoch	mittel	mittel	potenziell 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
Lastwechselgeschwindigkeit	gut	gut	gut	gut	gut	potenziell hoch
Verfügbarkeit, automatischer Betrieb	gut	gut	gut	gut	gut	potenziell sehr gut (keine beweglichen Teile)
Wirtschaftlichkeit	je nach Nutzerkontext			sehr gut	gut	noch nicht erreicht
Umweltwirkungen						
- Ressourcenverbrauch	mittel	gut	gut	gut	schlecht – mittel	sehr gut
- Treibhauseffekt	mittel	gut	gut	gut	schlecht – mittel	sehr gut
- NO_X, Versauerung	schlecht – mittel	schlecht – mittel	schlecht – mittel	mittel	schlecht	sehr gut

Vorteile für Brennstoffzelle

Tabelle Z.1: Zusammenfassung der technischen Eigenschaften, der Erfüllung von Nutzeranforderungen an Kraftwerke und der Emissionen

Die wesentlichen Vorteile der Hochtemperatur-BZ sind:

- geringste Emissionen,
- hoher elektrischer Wirkungsgrad bzw. hohe Stromkennzahl (bereits bei kleiner Leistung),
- gutes Teillastverhalten des elektrischen Wirkungsgrades,
- gutes Lastwechselverhalten,
- hohes Temperaturniveau der Abwärme.

Die BZ hat lokal quasi „Null-Emissionen“ und ist damit deutlich besser als von den gesetzlichen Bestimmungen gefordert. Die heute eingesetzten Techniken haben jedoch noch bedeutende Reduktionspotenziale. So werden große Kraftwerksgasturbinen mit optimierten Brennern zukünftig nur noch bei NO_x deutliche Emissionen aufweisen (auf sehr geringem Niveau), unverbrannte Kohlenwasserstoffe und CO werden nur noch in Spuren ausgestoßen. Bei entsprechendem Entwicklungsaufwand sollte eine Übertragung auf kleinere Gasturbinen möglich sein.

Solange die gesetzlichen Anforderungen nicht stark sinken, ist in den „Null-Emissionen“ der BZ **kein ökonomischer Vorteil für den Betreiber** zu sehen (obwohl ein **volkswirtschaftlicher Vorteil** besteht). Es ist derzeit auch nicht absehbar, dass hier national drastische Verschärfungen vorgenommen werden, zumal zukünftig als Folge der Liberalisierung nur noch EU-weit vergleichbare Emissionsanforderungen umsetzbar sein dürften. Eine „Übererfüllung“ von Umweltanforderungen, die zusätzliche Kosten verursacht, wird nur in Ausnahmefällen durchsetzbar sein (möglicherweise entsteht ein Markt für „emissionsfreien Strom aus fossilen Kraftwerken“, der allerdings nicht CO_2-frei ist, ähnlich wie für „grünen Strom“ aus erneuerbaren Energien.

Der hohe elektrische Wirkungsgrad bereits bei kleiner Leistung schlägt sich in niedrigeren Brennstoffkosten sowie im besseren Umweltverhalten nieder. Aus diesem Grund ist auch für kleinere BZ-KWK-Anlagen eine stromorientierte Fahrweise ohne Wärmenutzung vertretbar, was einen sehr günstigen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben kann.

Der hohe elektrische Wirkungsgrad in Verbindung mit GuD-Technik macht die BZ langfristig für hocheffiziente Gas- und Kohlekraftwerke interessant. Vor allem bei Kohlekraftwerken sind wegen der weltweiten Bedeutung drastische Wirkungsgradsteigerungen erforderlich, um den CO_2-Nachteil dieses Brennstoffs weiter zu mindern.

Die höhere Stromkennzahl der BZ im KWK-Betrieb kommt dem Trend des steigenden Stromverbrauchs (absolut und in Relation zum Wärmeverbrauch) in der Industrie entgegen. BZ können optimal bei Betrieben mit hoher Stromintensität eingesetzt werden.

Der höhere Teillastwirkungsgrad erweitert diese Vorteile noch auf den Teillastbetrieb, was jedoch nur bei ausgesprochenen Teillastanforderungen zum Tragen kommt (etwa in Regelkraftwerken oder bei gezieltem Abfahren von Wärme- oder Stromlasten mit

KWK). Das schnelle Lastwechselverhalten (und auch der hohe Teillastwirkungsgrad) der BZ kann zukünftig ein wichtiger Pluspunkt sein, wenn im liberalisierten Strommarkt aufgrund verringerter Investitionen in den Netzausbau die Bedeutung dezentral verteilter Regelkraftwerke zunimmt. Hier bleibt jedoch abzuwarten, ob eine solche Entwicklung in größerem Maße einsetzt. Dabei ist noch anzumerken, dass Gasturbinen oder Motoren ebenfalls schnell regelbar sind, allerdings mit schlechterem Teillastverhalten.

Bezüglich des möglichen Temperaturspektrums sind die Hochtemperatur-BZ gegenüber Motoren im Vorteil und ebenso flexibel wie Gasturbinen - die gesamte Abwärme wird auf hohem Temperaturniveau bereitstellt.

Problemfelder der Hochtemperatur-BZ sind:

- der frühe Entwicklungsstand, daher noch hohe Kosten und großer Entwicklungsbedarf,
- geringe Betriebserfahrungen, keine Referenzanlagen vorhanden,
- um Temperaturzyklen zu vermeiden ist kein kurzfristiges An-/Abfahren möglich, d.h. die Anlagen sind vor allem für Dauerbetrieb geeignet, sowie
- der möglicherweise höhere Platzbedarf.

Eine wesentliche Einschränkung der BZ gegenüber konventionellen Anlagen besteht in der Betriebsweise. Da die Hochtemperatur-BZ immer auf Betriebstemperatur zu halten ist und ein Anfahren aus kaltem Betriebszustand etwa 10 – 20 Stunden dauert, ist möglichst eine Dauerbetriebsweise mit einer jährlichen Auslastung von über 8.000 h anzustreben, wobei durchaus Teillast möglich ist. Das ist bei vielen KWK-Anwendungen und auch in Grundlast-Kraftwerken eine übliche Betriebsweise. Bei anderen KWK-Anwendungen mit regelmäßigen Produktionsunterbrechungen (z.B. am Wochenende) ist die möglichst verlustarme Realisierung eines heißen „Stand-By“ Betriebes unbedingt nötig, um so das Anwendungsspektrum zu erweitern.

Beim Flächenverbrauch liegen für BZ bislang nur wenig belastbare Aussagen vor. Pilotanlagen der Hochtemperatur-BZ und auch erste Systementwürfe haben noch einen deutlich höheren Flächenverbrauch verglichen mit Gasturbinen oder Motoren. Die bislang einzige kommerzielle BZ, die ONSI PC25 mit 200 kW_{el}, hat bereits eine Lernkurve durchlaufen und liegt etwas ungünstiger als Motoren im gleichen Leistungsbereich. Ein höherer Flächenverbrauch kann u.U. ein k.o.-Kriterium sein, wenn z.B. restriktive Vorgaben bezüglich des Einbauraums in vorhandenen Energiezentralen bestehen oder die Kosten für Bauland in Innenstädten in die Kalkulation einfließen. Je kompakter die Energieanlagen und um so größer sind die Anwendungsbereiche. Die weitere Optimierung des Platzbedarfs der BZ hat also eine große Bedeutung. Hierzu ist anzumerken, dass bei den Pilotanlagen der Hochtemperatur-BZ diesem Gesichtspunkt bislang noch nicht das Hauptaugenmerk der Entwickler galt und sowohl durch eine Erhöhung der Stromdichte als auch durch weitere Systemintegration noch Ansätze zur Verbesserung bestehen.

Emissionsvorteile der Brennstoffzellen

Die Gesamtemissionen der Energiesysteme setzen sich aus dem Anteil der Energieketten und den direkten Emissionen vor Ort zusammen. Aufgrund der quasi „Null-Emissionen“ vor Ort und des hohen Wirkungsgrades ergeben für die BZ auch unter Berücksichtigung der Brennstoffkette bedeutende Minderungspotenziale vor allem bezüglich Primärenergieverbrauch, Treibhausgase, Versauerung und NO_x. Sie liegen für Treibhausgase und Primärenergie zwischen 20 und 40 %, je nachdem, ob gegen Strom-Mix oder gegen zukünftige GuD-Kraftwerke verglichen wird. Bei der Versauerung und NO_x-Emissionen können Einsparungen zwischen 40 und 70 % erzielt werden. Lediglich die NMHC-Emissionen steigen gegenüber dem Strommix an. In Verbindung mit den stark sinkenden NO_x-Emissionen ist jedoch auch das Sommersmog-Potenzial als nicht steigend zu interpretieren. Auch gegenüber weiterentwickelten Gasturbinen-KWK ergeben sich Einsparungen von ca. 10 % bei Primärenergieverbrauch und Treibhauspotenzial. Die NO_x-Emissionen werden sogar um 76 % reduziert.

Werden BZ in Braunkohlekraftwerke integriert, ist durch die zusätzliche Wirkungsgradsteigerung gegenüber zukünftigen Dampfkraftwerken von Primärenergieeinsparungen um 14 %, gegenüber dem Strom-Mix um 25 % auszugehen. Das Ziel einer umweltverträglichen Braunkohlenutzung könnte mit der BZ also deutlich besser erreicht werden als mit konventioneller Technik. Allerdings besteht hier noch erheblicher Entwicklungsbedarf. Außerdem müssen die im Vergleich zu anderen Energieträgern hohen CO_2-Emissionen pro Brennstoff-Energieeinheit in Kauf genommen werden.

Durch den Einsatz von Restbiomasse in BZ (über Vergasung oder Vergärung) könnten die Vorteile der Biomassenutzung (fast CO_2-neutraler Brennstoff, kein Verbrauch erschöpflicher Ressourcen) ohne Einbußen bei anderen Wirkungskategorien (konventionelle Biomasse-Nutzungssysteme führen u.U. zu einer Erhöhung anderer Umwelteinwirkungen) zur Geltung kommen.

Die vorgelagerten Brennstoffketten wirken sich unterschiedlich auf die Gesamtbilanz aus. Bei Treibhausgasemissionen und Ressourcenverbrauch liegt der Anteil der Ketten für die untersuchten Systeme mit fossilen Brennstoffen bei nur 5 bis 10 %. Hier wirkt sich die Nutzungsphase stark aus – der Effekt des höheren Wirkungsgrades der BZ kommt besonders zum Tragen.

Bei den anderen Umweltwirkungen wie dem Versauerungspotenzial oder NO_x liegt der Anteil der Energieketten deutlich höher, bei konventionellen Systemen typischerweise zwischen 20 und 60 %. Diesen „Rucksack“ müssen auch die BZ-Systeme tragen, die überwiegenden lokalen Emissionen stellen aber noch ein großes Reduktionspotenzial dar, das durch die BZ erschlossen wird.

Wirtschaftlichkeit

Die Abschätzung der zulässigen BZ-Investitionen bei gleichen Stromgestehungskosten führt bei KWK-Systemen im Leistungsbereich 1 – 10 MW_{el} zu Erst-

investition von etwa 1.400 – 2.100 DM/kW_{el} (nur Modul, ohne Einbindung). Das liegt etwa 20-30 % über denen der konventionellen Systeme. Je kleiner die Leistung des Vergleichssystems, um so höher liegen die zulässigen Investitionen, da die spezifischen Kosten der Vergleichssysteme steigen. **Positiv auf die Wirtschaftlichkeit wirken sich** die Brennstoffeinsparung aufgrund des höheren Wirkungsgrades sowie die geringeren Wartungskosten aus. **Negativ wirkt sich** der Stackersatz nach jeweils 5 Betriebsjahren aus. Bei gleichen Stromgestehungskosten werden sich die Investoren i.d.R. für die Anlage mit den niedrigeren Investitionen entscheiden, daher **müssen sich die Investitionen der BZ stark denen der Vergleichssysteme annähern** und der Vorteil von 20-30 % höheren zulässigen Investitionen schmilzt ab.

Einsatzfelder und Märkte von Hochtemperatur-BZ

Erste Anwendungen von Brennstoffzellen werden dezentrale Kleinanlagen sein. BZ in Kraftwerksanwendungen sind langfristig ebenfalls denkbar, wozu allerdings die technische Reife der BZ zunächst in Kleinsystemen nachzuweisen ist.

Nach Demonstration der technischen Reife anhand mehrerer Demonstrationsanlagen kann eine Markteinführung erfolgen. Für diesen Prozess sind Vorleistungen nötig, um die Differenz zwischen dem Marktpreis und den zunächst noch höheren Fertigungskosten zu tragen. Eine Abschätzung möglicher Kostensenkungen aufgrund von Massenfertigung (Lernkurve) zeigt, dass für ein BZ-System kumulierte Vorleistungen von etwa 230 Mio. DM über einen Zeitraum von 10 Jahren aufzubringen sind.

Der Markt für dezentrale KWK im Leistungsbereich 0,1 – 10 MW beträgt in Deutschland etwa 500 MW_{el}/a (einschl. Ersatzinvestitionen). Je nach Entwicklung der Rahmenbedingungen im liberalisierten Energiemarkt sind hier auch starke Einbrüche möglich, was natürlich gleichfalls die Marktchancen von BZ verschlechtert.

Exportmärkte für dezentrale KWK in Europa könnten sich aufgrund der EU-Zielsetzung zum KWK-Ausbau ergeben, angestrebt wird bis 2010 eine Verdopplung des heutigen Anteils von 9 % an der Stromerzeugung auf 18 %. Allerdings sind bislang nur in wenigen Ländern, etwa in Dänemark und den Niederlanden, positive Entwicklungen bezüglich der Erhöhung des KWK-Anteils an der Stromerzeugung erkennbar.

Mittelfristig könnte eine Markteinführung (auch in Exportmärkten) von Kohlegas-GuD-Kraftwerken (IGCC) erfolgen, wovon auch die Brennstoffzelle profitiert, die dann langfristig in die Kohlegas-GUD integriert werden kann und eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades und Minderung der Emissionen bewirkt. Die effiziente Kohlenutzung hat global einen großen Stellenwert, da vielfach billige heimische Ressourcen vorhanden sind (z.B. China oder Indien). Dabei hat zunächst der verstärkte KWK-Einsatz Priorität. Allerdings ist auch die weitere Optimierung von reinen Kondensationskraftwerken erforderlich, da nicht überall die für KWK erforderlichen Wärmeabnehmer vorhanden sind.

Energiewirtschaftlicher Rahmen

Der steigende Wirkungsgrad der ungekoppelten Stromerzeugung erfordert zukünftig bei KWK-Anlagen ebenfalls steigende Wirkungsgrade, um die Effizienzvorteile weiterhin auf dem heutigen Niveau zu halten. Hier bieten Brennstoffzellen zweifelsfrei die größten Potenziale (vor allem im unteren Leistungssegment).

Sinkende Strompreise und größere Planungsunsicherheiten kennzeichnen die Anfangsphase der **Liberalisierung** der Energiemärkte, wodurch die Gefahr des Rückgangs der KWK-Anwendung besteht, vor allem im Bereich bis etwa 10 MW_{el}. Erste Anzeichen sind im abnehmenden Zubau der Motor-BHKW in den letzten 2 Jahren erkennbar. Sinkende Gaspreise können diesen Effekt nur in geringem Umfang gegensteuern. In günstigen Anwendungen (große KWK-Anlagen, etwa GuD-HKW, bei großen konstanten Wärmeverbrauchern) werden auch zukünftig noch Projekte umgesetzt. Ein wichtiger Trend im Kraftwerksbau ist der Wunsch der Investoren nach kurzer Amortisationszeit, u.a. um damit das Investitionsrisiko im Umfeld unsicherer Marktentwicklungen zu begrenzen. Dadurch werden Anlagen mit geringen Anfangsinvestitionen begünstigt. Brennstoffzellen, aber auch andere effiziente Systemkonzepte wie KWK, die höherer Anfangsinvestitionen langfristig über Brennstoffeinsparung erwirtschaften und dadurch im Mittel gleiche Stromgestehungskosten erreichen, haben Nachteile.

Die bisherige Ausgestaltung der Ökosteuer wirkt sich vor allem in geringeren Gaspreisen für KWK aus, was jedoch die starken Preissenkungen beim Strom nicht annähernd auffängt. Bei Anlagen unter 0,7 MW_{el} wirkt sich zusätzlich die Befreiung von der Stromsteuer positiv auf den KWK-Betrieb aus, was jedoch für den hier betrachteten Leistungsbereich Anwendungen in der Industrie weniger relevant ist.

Aufgrund altersbedingter Stillegungen von Kraftwerken ist in Deutschland bis zum Jahr 2010 mit **Zubauentscheidungen** über etwa 30.000 MW_{el} zu rechnen, was fast einem Drittel der Kapazität des öffentlichen Kraftwerksparks entspricht. Hier könnten mit entsprechenden politischen Weichenstellungen (z.B. Vorgabe von Quoten) deutliche Zeichen in Richtung KWK-Zubau erfolgen, was längerfristig auch der Brennstoffzelle zugute kommt.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung hocheffizienter und flexibler Brennstoffzellen wird über eine **stärkere Dezentralisierung** der Energieversorgung diskutiert – anstelle von großen zentralen Kraftwerken könnten verteilte Anlagen zugebaut werden. Neben vermindertem Investitionsrisiko und Einsparungen im Netzbereich können sich vor allem durch zusätzliche Erschließung von KWK auch volkswirtschaftliche Vorteile ergeben. Dazu ist anzumerken, dass mit den derzeitigen Motoren und Gasturbinen bereits Energiewandler für solche Anwendungen zur Verfügung stehen – die Dezentralisierung also weniger von einer neuen Technik abhängt als vielmehr von der Kostensituation und den energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen.