

Energie- und Schadstoffbilanzen von Brennstoffzellen-Systemen

von Bernd Höhlein,
Joachim Nitsch und
Constantin Carpetis

Überblick

Brennstoffzellen können erhebliche Beiträge zur Reduzierung lokaler Schadstoffemissionen klimarelevanter Gase leisten. Zur korrekten Beurteilung dieser Potentiale müssen vollständige Nutzungssysteme betrachtet und die gesamte Energiewandlungskette analysiert werden; die Entwicklungspotentiale konventioneller Nutzungssysteme dienen als Referenz und Vergleich. Repräsentative Ergebnisse derartiger Analysen sowohl für den stationären wie für den mobilen Bereich werden vorgestellt.

Fuel cells can considerably reduce local pollutants and CO₂-emissions. For assessing their reduction potential correctly, energy utilization systems must be looked at from beginning to end and the complete energy chain be analyzed. In this context, the development potential of conventional systems must also be determined for reference and comparison. Representative results of such analyses are presented, related to both stationary and mobile fuel cell systems.

1. Einsatzfelder von Brennstoffzellen

Brennstoffzellen liefern neue Lösungsansätze für drängende ökologische Probleme in der Energieversorgung. Ihre möglichen Einsatzfelder sind:

- **Stromerzeugung:** Die technischen Eigenschaften wie Modularität, flexible Betriebsweise und Teillastverhalten sowie die guten Emissionseigenschaften und die Geräuscharmut legen ihren Einsatz als kleine bis mittlere Kraft-Wärme-Kopplungs(KWK)-Anlagen von einigen kW_{el} bis einigen MW_{el} als Blockheizkraftwerke (BHKW) oder Heizkraftwerke (HKW) nahe. Längerfristig ist auch der Einsatz von Hochtemperatur-Brennstoffzellen in der Stromerzeugung ohne Abwärmennutzung (> mehrere 10 MW_{el}) von Interesse, insbesondere in der Kombination mit GuD-Kraftwerken mit Wirkungsgraden von über 65%.
- **Traktion:** Die genannten Eigenschaften, insbesondere aber die im Vergleich zu Verbrennungsmotoren nahezu völlige lokale Emissionsfreiheit lassen ihren Einsatz als Energiequelle für Elektromotoren in Fahrzeugen in Verbindung mit an Bord gespeicherten flüssigen oder gasförmigen Energieträgern als besonders geeignet erscheinen.

Die große energiewirtschaftliche Bedeutung eines zukünftigen Brennstoffzellen-Einsatzes zeigt sich darin, daß in den genannten Bereichen „Heizkraftwerke/Kraftwerke“ und „Verkehr“ mit rund 45% des gesamten Primärenergieumsatzes die derzeitigen Nutzungsgrade besonders gering sind und über 50% der CO₂-Emissionen entstehen. Allein die Umwandlungsverluste der derzeitigen Stromerzeugung sind mit 3.200 PJ/a mengenmäßig höher als der Energieeinsatz für Raumheizung oder Straßenverkehr.

In beiden Anwendungsfeldern existieren jedoch auch etablierte, kostengünstige Technologien mit weiteren, teilweise beachtlichen Entwicklungspotentialen hinsichtlich Wirkungsgradverbesserung und Senkung von Schadstoffemissionen, die ein substantielles Eindringen der neuen, derzeit noch kostenintensiven Brennstoffzellen-Technologie in den Energie- und Fahrzeugmarkt vor beträchtliche Hindernisse stellen. Die Brennstoffzellen-Entwicklung steht daher vor zwei großen Herausforderungen:

- Die überzeugenden ökologischen Vorteile (Primärenergieeinsparung bzw. Minderung von klimarelevanten Emissionen; Minderung lokaler Schadstoffemissionen, u.a.) für komplette, marktfähige Systeme müssen nachgewiesen werden.
- Die Gestehungskosten für die bereitgestellte Energie müssen sich denen etablierter Techniken annähern. Potentielle ökologische Vorteile der Brennstoffzelle können zwar ökonomisch geltend gemacht werden, bedürfen jedoch entsprechender gesetzlicher Regelungen (z.B. Energie-/CO₂-Steuer) um marktwirtschaftlich wirksam werden zu können.

2. Nutzen und Perspektiven der Kraft-Wärme-Kopplung

KWK-Anlagen ermöglichen eine energetische Ausnutzung des eingesetzten Brennstoffs von bis zu 95% durch die gleichzeitige Nutzung von Strom und Abwärme, die bei seiner Erzeugung anfällt. KWK-Anlagen sind daher prinzipiell effizienter als die getrennte Bereitstellung der beiden Energiearten (**Abbildung 1**). Entsprechend reduzie-

Prof. Dr. Bernd Höhlein ist Abteilungsleiter im Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik im Forschungszentrum Jülich (FZJ), Jülich.

Dr.-Ing. Joachim Nitsch ist Abteilungsleiter und Dr.-Ing. Constantin Carpetis ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Technische Thermodynamik im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Stuttgart.

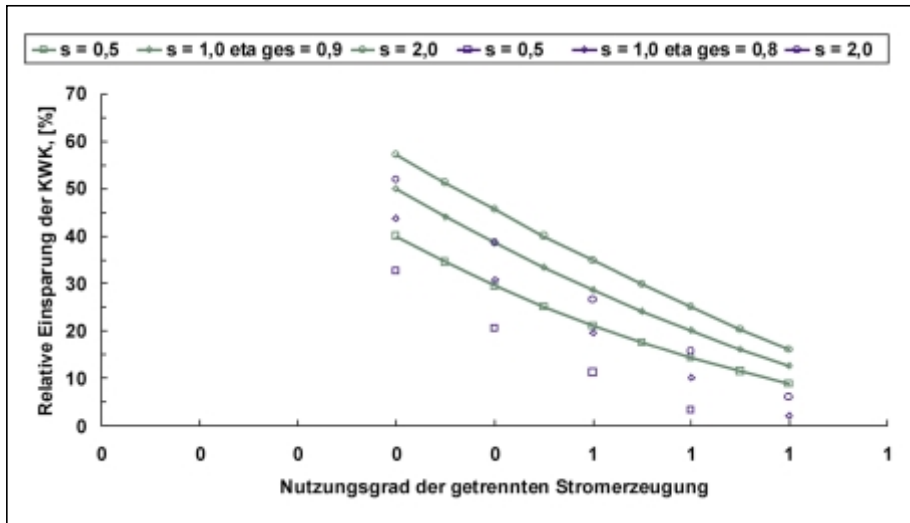
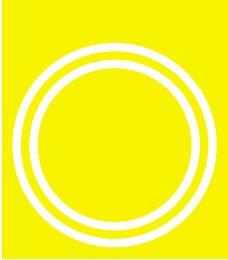
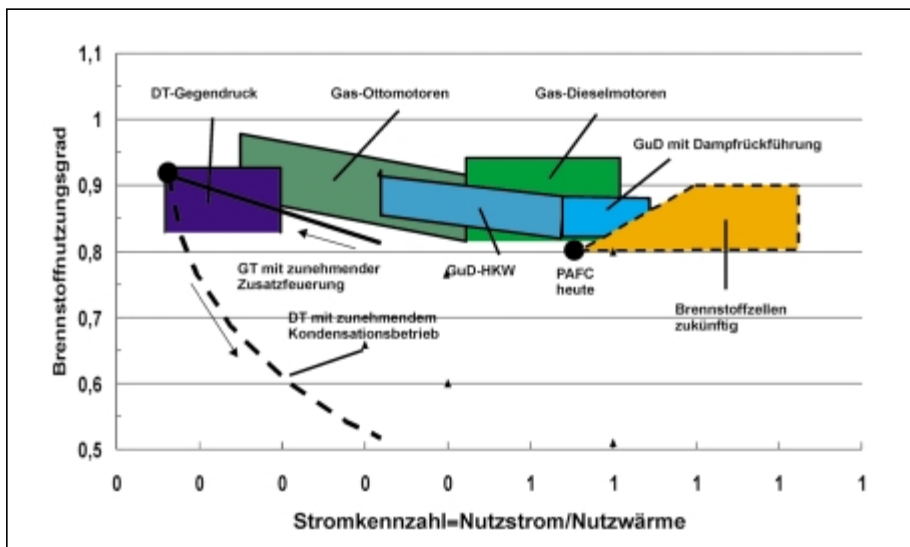


Abbildung 1: Brennstoffeinsparung bei idealer Kraft-Wärme-Kopplung (kein Spitzenkessel, keine Verteilungsverluste) für Nutzungsgrade $\eta_{ges} = 80\%$ und 90% und unterschiedliche Stromkennzahlen s (Nutzungsgrad der getrennten Wärmeerzeugung $\eta_w = 90\%$)

Abbildung 2: Brennstoffnutzungsgrad η_{ges} (H_u) und Stromkennzahl s von Kraft-Wärme-Kopplungs(KWK)-Anlagen mit Dampfturbinen (DT), Gasturbinen (GT), Gas-Otto- und -Dieselmotoren, Gas- und Dampfturbinen kombiniert (GuD) und Brennstoffzellen (PAFC, Phosphor-Acid-Fuel-Cell)



ren sich auch die zugehörigen CO₂-Emissionen. Allerdings verringert sich der Einspareffekt bei steigendem Nutzungsgrad der reinen Stromerzeugung. Betont werden muß, daß sowohl eine *hohe Stromkennzahl s* als auch ein *hoher Gesamtnutzungsgrad* η_{ges} die Energieeinsparung gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme steigern. Beim Einsatz von Brennstoffzellen in KWK-Anlagen ist daher auch auf den zweiten Punkt zu achten; so sind KWK-Anlagen mit $s = 1$ und $\eta_{ges} = 0,8$ (sehr gute phosphorsäure Brennstoffzelle, Typ ONSI) energie-

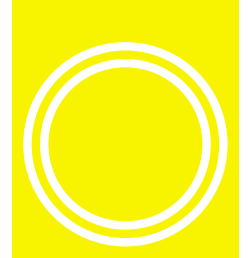
tisch gleichwertig mit KWK-Anlagen mit $s = 0,5$ und $\eta_{ges} = 0,9$ (heute übliches Motor-BHKW). Brennstoffzellen mit ihren hohen Stromkennzahlen ermöglichen eine höhere Energieeinsparung als Motoranlagen also nur dann, wenn ihr Gesamtnutzungsgrad mit denen herkömmlicher KWK-Anlagen vergleichbar ist.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Dimensionen und Auslegungsmöglichkeiten realer KWK-Anlagen, der Vergleichskraftwerke und der Wärmeerzeugung erreichen die Einsparungen

in der Praxis sehr unterschiedliche Werte. Im Vergleich zu heute üblichen Kraftwerken ($\eta_{el} = 38-40\%$) und Einzelheizungen ($\eta_{th} = 80-90\%$) liegt die erzielbare jährliche Brennstoffeinsparung gegenwärtiger KWK-Anlagen zwischen 15 und 30%. Vergleicht man dagegen mit neuen GuD-Kraftwerken ($\eta_{el} > 50\%$), sinken diese Einsparungen je nach Art der Einzelheizung um rund 10 Prozentpunkte. Das CO₂-Reduktionspotential der KWK ist noch unübersichtlicher, da die Emissionsfaktoren unterschiedlicher Brennstoffkombinationen überlagert werden können.

Im Vergleich der EU-Staaten liegt Deutschland im Mittelfeld bei der KWK-Stromerzeugung (rund 10% Anteil an gesamer Stromversorgung). Der Ausbau der KWK in diesen Ländern zeigt weiterhin, daß die KWK-Potentiale aus siedlungsstruktureller Sicht recht hoch sein können (bis zu 40%), ohne daß die gleichzeitige Nutzung von Strom und Wärme in Frage gestellt ist. Unter der Annahme eines Zubaus moderner KWK-Anlagen läßt sich für Deutschland ein technisches KWK-Strompotential von 200 TWh/a abschätzen, was rund 35% der gegenwärtigen Bruttostromerzeugung Deutschlands, bzw. dem Vierfachen des heutigen KWK-Stroms entspricht. Unter Berücksichtigung des Potentials in der Industrie bedeutet dies u.a. eine potentielle Gesamtleistung dezentraler BHKW von rund 12.000 MW_{el} bzw. 10% der derzeitigen Stromerzeugungskapazitäten [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Die derzeit dynamischste Marktentwicklung im KWK-Bereich findet daher auch in der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung statt.

Thermodynamische Maschinen für die KWK stehen in einem Leistungsbe- reich von 5 kW_{el} bis einige 100 MW_{el} mit Stromkennzahl zwischen 0,2 bis 1,2 bzw. elektrischem Wirkungsgrad zwischen 20% und knapp 50% zu relativ günstigen Kosten zur Verfügung (Abbildung 2). Traditionelle Anlagen sind HKW mit Gegendruck- und Entnahmekondensations-Dampfturbinen für große Leistungen im 100 MW_{el} – Bereich mit relativ geringen Stromkennzahlen zwischen 0,2 und 0,5. Auch Gasturbinen mit Abhitzeke- ssel liegen in diesem Bereich und decken den Leistungsbereich bis zu etwa



1 MW_{el} ab. Die Stromnutzungsgrade dieser Anlagen im gekoppelten Betrieb erreichen maximal 35%. Die maßgeblichen Konkurrenten für zukünftige Brennstoffzellen-KWK sind jedoch BHKW mit Otto- und Dieselmotoren sowie Gas-Dampf-HKW bzw. Gasturbinen mit Dampfdruckführung (Cheng-Cycle) [7, 8].

Auch in Zukunft sind weitere technische Verbesserungen und Kostensenkungen bei den thermodynamischen KWK-Anlagen zu erwarten. Otto-Motoren können mittels Aufladung Nutzungsgrade bis zu 45%, Dieselmotoren bis 48% erreichen (und damit Stromkennzahlen von gut 1,0). Für die Nahwärmeversorgung von Gebäuden dürften Gesamtnutzungsgrade über 90% mittels Brennwertnutzung erreicht werden. Wegen verbesserter Verbrennung werden niedrige NO_x-Emissionen vermutlich auch ohne Katalysator erreicht, Wartungsintervalle können vergrößert und die Anpassungsfähigkeit an sich ändernde Gasgemische sowie Regelfähigkeit der Motoren verbessert werden [9, 10, 11]. Bei kleineren und mittelgroßen Motoren können durch weitere Rationalisierung und Standardisierung Kostensenkungen um weitere 20-30% erwartet werden.

Bei Gasturbinen sind durch neue Materialien und verbesserte Brennerkonstruktionen höhere Temperaturen und Drücke und damit höhere Nutzungsgrade ohne Erhöhung des NO_x-Ausstoßes erzielbar. Injektion von Wasserdampf, gewonnen aus der Abhitze der Gasturbine, erlaubt eine weitere Steigerung des Nutzungsgrads, eine Variation der Stromkennzahl und ein besseres Teillastverhalten. Damit stehen zukünftig Gasturbinen im KWK-Betrieb mit Nutzungsgraden bis 45% und GuD-HKW mit über 50% elektrischem Nutzungsgrad (Stromkennzahlen >1.0) im 10 bis 50 (max. bis 300) MW_{el}-Bereich zur Verfügung.

3. Ökologische Bewertung von Brennstoffzellen-BHKW

Zukünftige Brennstoffzellen-BHKW und -HKW werden sich diesen weiterentwickelten thermodynamischen KWK-Anlagen auf dem Markt stellen müssen. Die frühesten Einsatzbereiche für Brennstoffzellen in der KWK wer-

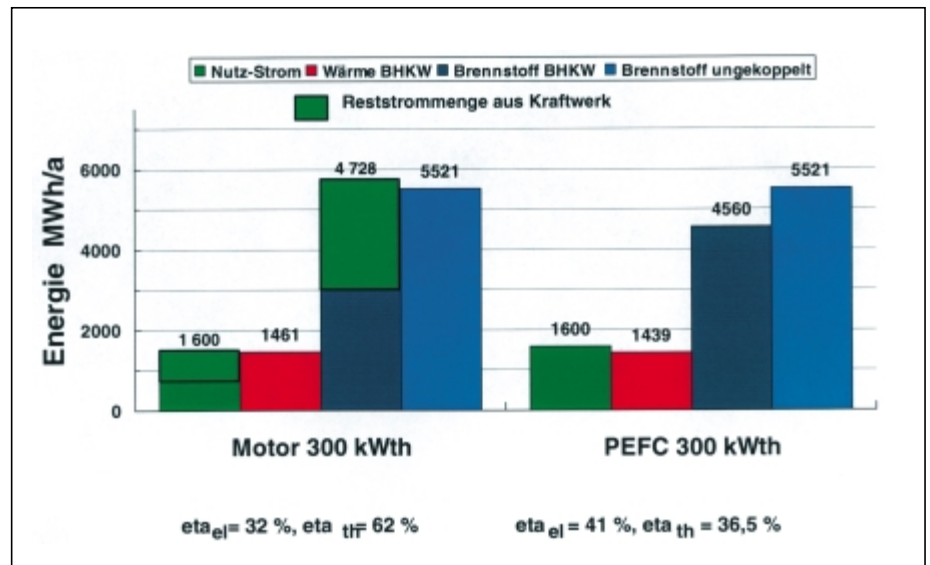


Abbildung 3: Jahresenergiemengen des Motor- bzw. Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC)-BHKW mit 300 kW_{th} Leistung sowie der ungekoppelten Variante bei Versorgung der Nahwärmeinsel Wohngebäude (Strom-Mehrerzeugung der PEFC wird beim Motor-BHKW durch externen Strombezug ausgeglichen; die Netzverluste betragen 6%)

den in der Nahwärmeversorgung, d.h. als BHKW gesehen [12]. Es wurden daher als Referenzsysteme Motor-BHKW-Anlagen definiert, die diesen Leistungsbereich abdecken. Sie repräsentieren typische Anwendungsfälle von BHKW von der Einzelgebäudeversorgung (Wärmebedarf 200 MWh/a) bis zum größeren Nahwärmenetz mit 46.000 MWh/a Wärmebedarf. Die Motor-BHKW-Leistungen decken den Bereich 14 bis 5.800 kW_{el} ab; die elektrischen Nutzungsgrade reichen von 27 bis 41% [12, 13, 14]. Die ökologische Bewertung wird beispielhaft für eine Wärmeversorgung von mehreren Wohnblöcken aus einer Heizzentrale mit einem Nahwärmenetz dargestellt [14]. Die Höchstlast beträgt 850 kW_{th}. Diese Spitzenlast wird nur für einige Stunden im Jahr benötigt, weshalb bei einer BHKW-Versorgung üblicherweise ein Spitzenlastkessel zusätzlich eingesetzt wird. Die Ausnutzungsdauer der BHKW kann somit typische Werte um 5.000 h/a erreichen bei einer Wärmeleistung von 300 kW_{th}.

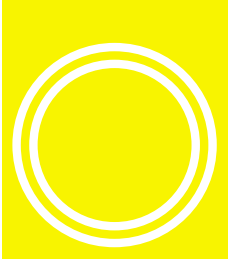
Für den ökologischen Vergleich werden folgende Versorgungsoptionen bewertet:

- Motor-BHKW mit Spitzenlastkessel (3 x 52 kW_{el}/100 kW_{th}; $\eta_{el} = 32\%$; $\eta_{ges} = 94\%$)
- PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell)-

- BHKW mit Spitzenlastkessel (300 kW_{el}/300 kW_{th}; $\eta_{el} = 41\%$; $\eta_{ges} = 78\%$)
- neuer Gaskessel ($\eta_{th} = 90\%$) mit Strom aus Zubaumix aus Kohle- und Gas-GuD-Kraftwerk ($\eta_{el} = 51,6\%$)

Bezugspunkt des Vergleiches ist die Bereitstellung von 2.000 MWh/a thermischer Energie durch das BHKW-System sowie der zugehörigen Stromerzeugung. Da ein PEFC-BHKW eine höhere Stromkennzahl als ein Motor-BHKW aufweist, produziert es bei gleicher Nutzwärme mehr Strom. Um die Ergebnisse dennoch vergleichbar zu halten, wird die Differenz des Strombetrages im Fall des Motor-BHKW durch den Mix eines alternativen Neuzubaus aus Kohle- und Gas-GuD gedeckt.

In **Abbildung 3** sind die Jahresmengen der Strom- und Wärmeerzeugung sowie des Brennstoffbedarfs der Varianten gegenübergestellt. Bei einer Erzeugung von 2.000 MWh Wärme ab Heizstation und 1.600 MWh Strom hat die PEFC-Variante mit 4.560 MWh/a den niedrigsten Brennstoffverbrauch (12,6% Einsparung gegenüber der ungekoppelten Erzeugung). Die weiterentwickelte Motor-BHKW-Variante hat trotz des deutlich geringeren elektrischen Jahresnutzungsgrades nur einen geringfügig höheren Brennstoff-



verbrauch (4.728 MWh). Wesentliche Gründe hierfür sind

- der hohe Gesamtnutzungsgrad des Motor-BHKWs (mit Brennwertnutzung $\eta_{ges} = 94\%$) im Vergleich zum PEFC-BHKW ($\eta_{ges} = 78\%$, bei Nennlast 80%; entspricht günstigen Betriebsbedingungen ausgeführter PAFC(Phosphoric Acid Fuel Cell)-BHKW), und
- der hohe elektrische Nutzungsgrad der ungekoppelten Stromerzeugung, der den Wert der hohen Stromerzeugung aus der PEFC ($s = 1$) mindert (wird der ungekoppelte Strom mit dem heutigen Kraftwerksmix bewertet (38% Erzeugungswirkungsgrad, 6% Verluste im Niederspannungsnetz), so beträgt die Brennstoffeinsparung der PEFC gegenüber dem Motor 15,6% anstatt 3,6%).

Aus den Untersuchungen kann insgesamt abgeleitet werden, daß Brennstoffzellen-BHKW nicht von vornherein eine hohe Primärenergie- und damit CO₂-Reduktionspotentiale gegenüber gut ausgelegten Motor-BHKW besitzen, sondern dazu einer sorgfältigen Auslegungsoptimierung mit möglichst hohem Gesamtnutzungsgrad bedürfen [12]. Dagegen schneidet das PEFC-BHKW bei den durch die TA-Luft limitierten Schadstoffen am besten ab (Abbildung 4).

Wie auch im mobilen Bereich sind also die geringen lokalen Schadstoff-Freisetzung als wesentlicher Vorteil von Brennstoffzellen zu nennen. Kohlendioxid wird im wesentlichen durch den höheren Wirkungsgrad des PEFC-Systems im Vergleich zum Motor-BHKW bzw. zur ungekoppelten Erzeugung reduziert (siehe die Brennstoffeinsparung in Abbildung 3). Im ungekoppelten System kommt hier auch der kohlenstoffhaltigere Brennstoff Steinkohle zum Tragen. Mit Ausnahme der motorbedingten Kohlenmonoxid- und NMVOC¹-Emissionen weist auch die Motor-Kraft-Wärme-Kopplung deutliche Emissionsvorteile gegenüber der ungekoppelten Variante auf.

Die Herkunft der Emissionen für das PEFC-System nach den einzelnen Prozeßstufen ist in Abbildung 5 zu sehen. Unter Erdgas-Vorkette sind hierbei die Aufwendungen der Brennstoffbereitstellung für das BHKW und den Spitzenkessel zusammengefaßt. Der dominierende Einfluß der Vorkette kann an diesem Beispiel besonders deutlich illustriert werden. Mit Ausnahme der Kohlendioxid-Emissionen werden mehr als 50% aller anderen Luftemissionen durch die Bereitstellung des

Erdgases dominiert. Besonders markant ist dieser Effekt für Methan; die Leckage-Verluste durch den Erdgas-Verlust sind vorrangig dafür verantwortlich. Der große Einfluß vorgelegter Energieketten wird sich bei Brennstoffzellen grundsätzlich stärker bemerkbar machen. Dies liegt naturgemäß an den geringeren lokalen Emissionen des Brennstoffzellen-Systems. Besondere Aufmerksamkeit ist daher der Bilanzierung der Energieketten zu schenken.

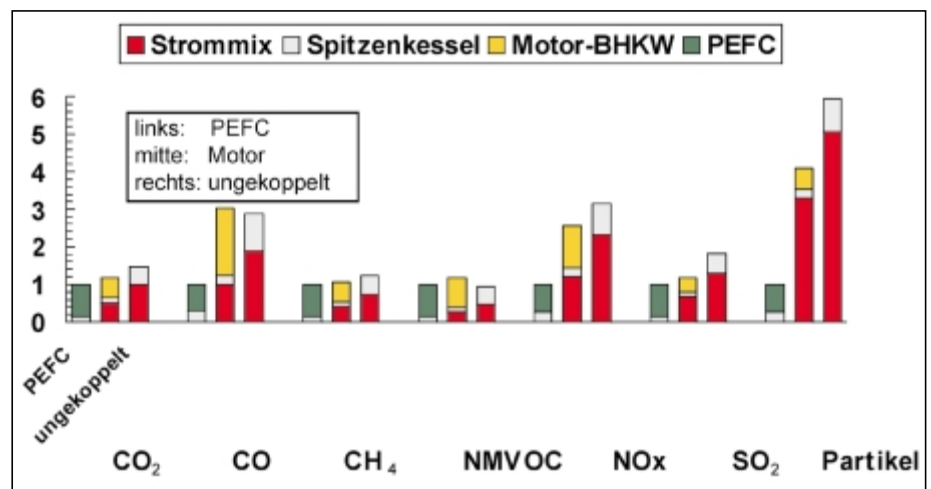
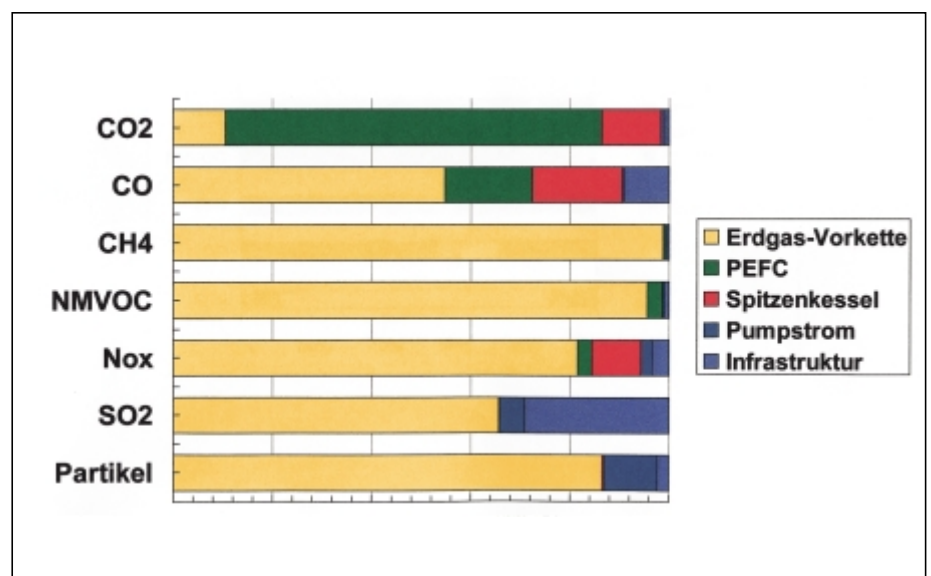
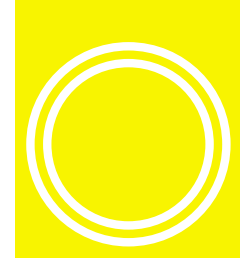


Abbildung 4: Vergleich der Emissionen, die bei der Erfüllung der Versorgungsaufgabe durch ein PEFC(Polymer Electrolyte Fuel Cell)-BHKW, ein Motor-BHKW und die ungekoppelte Erzeugung freigesetzt werden (normiert auf die Emissionen des PEFC-BHKW-Systems). Unterschieden ist nach den Beiträgen der Systembestandteile (BHKW, Spitzenkessel, Strommix der ungekoppelten Erzeugung; NMVOC: flüchtige organische Verbindungen ohne Methan).

Abbildung 5: Relativer Anteil der einzelnen Prozeßstufen an den Luftemissionen durch die Erfüllung der Versorgungsaufgabe mit dem Polymer Electrolyte Fuel Cell(PEFC)-System mit Zusatzkessel zur Spitzenlastabdeckung (NMVOC: flüchtige organische Verbindungen ohne Methan; CH₄: Methan)



¹ NMVOC: Gasförmige Kohlenwasserstoffe außer Methan



4. Schlußfolgerungen für Brennstoffzellen in der KWK

Brennstoffzellen-BHKW haben das Potential zu sehr hohen elektrischen Wirkungsgraden (um 40% für PEFC; um 50% für MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) und SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) schon bei kleiner Leistung. Darüber hinaus sind sehr niedrige Schadstoffemissionen erreichbar. Bislang liegen jedoch keinerlei Betriebserfahrungen mit realen Anlagen vor, so daß für verschiedene Punkte wie etwa der Degradation im Langzeitbetrieb, der Temperatur der Wärmeauskopplung und dem Teillastbetrieb noch eine Verifizierung mit Praxiswerten abzuwarten bleibt. Neben dem Stackwirkungsgrad hat das gesamte Systemdesign mit Nebenaggregaten einen großen Einfluß auf den Wirkungsgrad. Für PEFC-BHKW mit Erdgasbetrieb sind hierzu kaum Untersuchungen durchgeführt worden; Erfahrungen aus realen Anlagen sind nicht verfügbar. Die bisherigen Berechnungen zeigen, daß die PEFC ein äußerst günstiges Teillastverhalten bezüglich des elektrischen Wirkungsgrades aufweist, der thermische Wirkungsgrad dagegen deutlich zurückgeht [14].

Brennstoffzellen können eine wertvolle Ergänzung des KWK-Marktes darstellen. Ihre Vorteile hinsichtlich nahezu lokaler Schadstofffreiheit und hoher Wirkungsgrade begünstigen PEFC insbesondere bei kleinen Leistungen im Bereich von 10 bis 100 kW_{el}, während MCFC und SOFC-Anlagen in KWK auf Grund ihres höheren Ge-

samtnutzungsgrades auch Chancen im Bereich höherer Leistungen haben. Eine grundsätzliche Verdrängung herkömmlicher KWK-Anlagen wird dagegen nicht erreichbar sein. Die für eine Markteindringung erforderlichen Investitionskosten für Brennstoffzellen-BHKW-Module (einschließlich Reformer) müssen dafür allerdings Werte zwischen 1.200 und 1.900 DM/kW_{el} erreichen (Leistungsbereich 100 kW bis 1.600 kW_{el}). Für große Leistungen um 6.000 kW_{el} sinken die erforderlichen break-even-Kosten auf rund 800 DM/kW_{el} [12, 14].

5. CO₂-Minderung durch Brennstoffzellen in Großkraftwerken

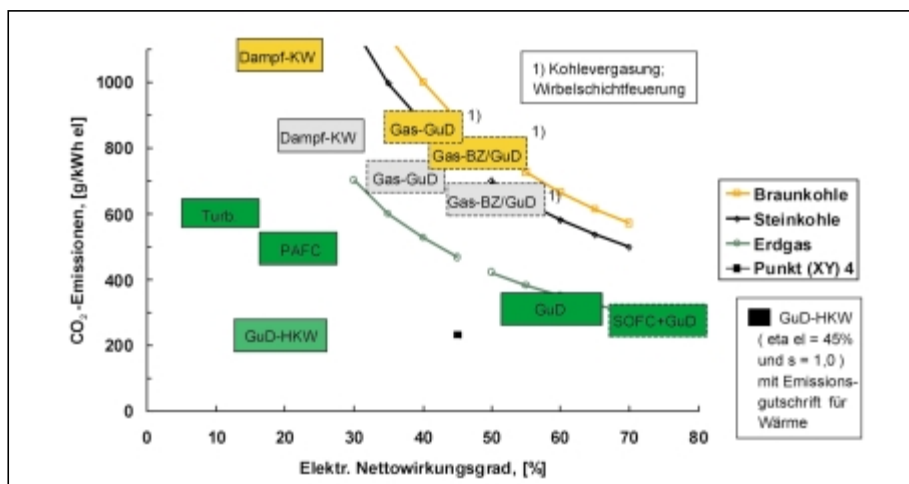
Mit dem steigenden Einsatz von Gasturbinen und GuD-Anlagen sind auch Chancen für die Nutzung der Brennstoffzelle zur ausschließlichen Stromerzeugung in größeren Kraftwerken (einige 100 MW_{el}) verbunden. Die Technologielinien MCFC und SOFC erlauben wegen ihres Temperaturniveaus prinzipiell die Einbindung in derartige sowohl mit Erdgas als auch mit Kohlegasen befeuerte Kraftwerke. Aufgrund des Temperaturniveaus der beiden Brennstoffzellen-Typen kann die MCFC (650°C) günstig mit einer Dampfturbine und die SOFC (800-1.000°C) mit einer GuD-Anlage kombiniert werden. Bei Beaufschlagung mit Kohlegas wird mit Wirkungsgraden bis zu 57% gerechnet [15,16], bei Erdgasbetrieb wird ein Wirkungsgrad von 65% und mehr angestrebt [17]. Eine detaillierte Untersuchung für ein 355 MW_{el} -SOFC-GuD-Kraftwerk mit

Braunkohlevergasung führt zu einem Nettowirkungsgrad von 54,4% [16].

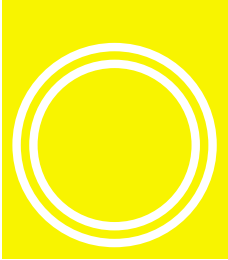
Das größte Wirkungsgradpotential haben erdgasgefeuerte SOFC-GuD-Kraftwerke mit interner Reformierung mit über 65% [18, 17]. Der Wegfall der Kohletechnik erlaubt hier unter sonst gleichen Bedingungen günstigere Stromgestehungskosten. Derartige Kraftwerkskonzepte sind hinsichtlich ihrer technischen Verwirklichung und der erforderlichen Kostenreduktion als langfristige Option (> 2010) zu sehen. Erst wenn die Brennstoffzellen-Technologie bei kleinen Einheiten (also im KWK-Bereich) ein gewisses Maß an Einsatzreife und Kostendegression nachgewiesen hat, wird es realistisch sein, Brennstoffzellen mit der dann ebenfalls weiter verfeinerten gasgefeuerten Kraftwerkstechnologie zu verknüpfen.

Die Bemühungen zur weiteren Erhöhung von Kraftwerkswirkungsgraden werden verstärkt mit den erzielbaren CO₂-Emissionsreduktionen begründet. Das CO₂-Emissionsniveau wird jedoch wesentlich stärker durch den eingesetzten Brennstoff als durch das Technologieniveau bestimmt (Abbildung 6). Neue Braunkohledampfkraftwerke haben spezifische CO₂-Emissionswerte von 1.000 g/kWh_{el} [28]. Im Grenzfall eines Braunkohleinsatzes in einer SOFC-GuD-Anlage könnten 730 g/kWh_{el} erreicht werden. Ohne Brennstoffzellen sind mittels Vergasung bereits rund 800 g/kWh_{el} erzielbar. In Steinkohlekraftwerken kann in vergleichbarer Weise das Emissionsniveau heutiger, neuer Kraftwerke von rund 800 g CO₂/kWh_{el} auf minimal 630 g CO₂/kWh_{el} (einschließlich Brennstoffzellen) gesenkt werden.

Abbildung 6: Heutige und zukünftig mögliche spezifische CO₂-Emissionen der Stromerzeugung in fossil gefeuerten Kraftwerken



Damit liegen selbst die fortschrittlichsten zukünftigen kohlegefeuerten Kraftwerke einschließlich Brennstoffzellen-Vorschaltstufe über dem Emissionsniveau, welches bereits mit einfachen erdgasgefeuerten Gasturbinen erzielbar ist. Ein möglicher zukünftiger Brennstoffzellen-Einsatz kann also den Emissionsnachteil kohlegefeuerter Kraftwerke nicht wesentlich mildern, da die zusätzlich erzielbaren CO₂-Reduktionen klein sind gegenüber dem chemisch vorgegebenen „Vorteil“ des Erdgases. Moderne erdgasgefeuerte GuD-Kraftwerke mit zukünftig um



60% Nettowirkungsgrad haben darüber hinaus mit rund 350 g/kWh_{el} so niedrige CO₂-Emissionswerte, daß auch hier der CO₂-„Grenznutzen“ einer Brennstoffzellen-Vorschaltstufe (Gesamtemission 310 g/kWh_{el} bei einem $\eta_{\max} = 68\%$) relativ gering ist. Aus Klimaschutzgründen ist wegen dieses Tatbestandes die Konzipierung fossil gefeuerter, mit Brennstoffzellen bestückter Kondensationskraftwerke nicht vordringlich. Auch der Klimaschutzeffekt der Stromerzeugung aus Heizkraftwerken ist bedeutender als derjenige einer sehr anspruchsvollen Wirkungsgradsteigerung in Großkraftwerken. Im Vergleich zur reinen Stromerzeugung in „besten“ erdgasgefeuerten SOFC-GuD-Kraftwerken haben bereits bestehende GuD-HKW ($\eta_{\text{ges}} = 45\%$, $s = 1,0$) mit 235 g/kWh_{el} deutlich geringere spezifische CO₂-Emissionen, wenn die vermiedene Emission der getrennten Wärmerzeugung der Stromerzeugung dieses Heizkraftwerks gutgeschrieben wird. Vergleichbares gilt selbstverständlich auch für andere KWK-Anlagen, also auch für Brennstoffzellen-KWK-Anlagen [12].

6. Ausgangsbedingungen bei der Bilanzierung von Fahrzeugantrieben

Die umweltrelevanten Zielgrößen, welche bei der Einführung neuer Fahrzeugkonzepte minimiert werden sollen, sind:

- spezifischer Endenergie- und Primärenergiebedarf,
- klimarelevante Gesamtemissionen (CO₂-Äquivalent), sowie
- lokal bzw. regional relevante Schadstoffemissionen NO_x, CO und NMHC² und Partikel.

Die Forderung nach Minimierung dieser Zielgrößen ist im wesentlichen mit der Forderung nach niedrigerem spezifischem Energieverbrauch identisch, wobei der Einsatz kohlenstoffarmer Primärenergien (Erdgas) — und langfristig die Nutzung regenerativer Energien — verstärkend wirken können. Im Fall lokal oder regional wirksamer Schadstoffe wie Stickoxide, HC-Verbindungen und Partikel tritt die Notwendigkeit der Weiterentwicklung der Katalysatortechnik hinzu. Soll die Re-

² Kohlenwasserstoffe ohne Methan

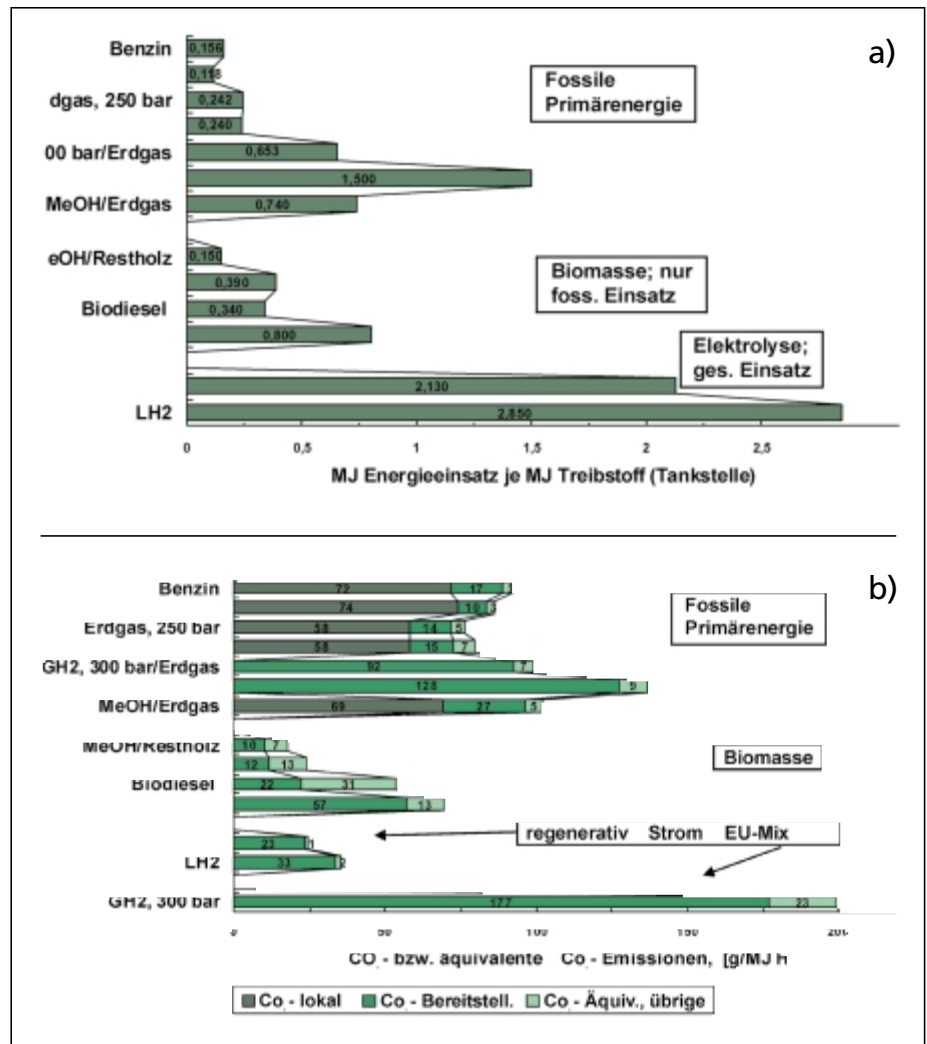


Abbildung 7: Primärenergieeinsatz mit heutiger Infrastruktur zur Bereitstellung von Kraftstoffen und ihre spezifischen klimarelevanten Emissionen [14] (GH₂: gasförmiger Wasserstoff; LH₂: flüssiger Wasserstoff; MeOH: Methanol)

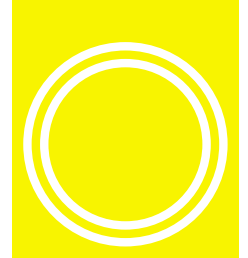
duzierung der lokalen Schadstoffemissionen gegen Null streben, so stellt der Elektroantrieb anstelle des herkömmlichen Verbrennungsmotors eine Alternative dar. Die Einführung des Elektroantriebes setzt jedoch den Einsatz neuer Energieumwandlungsketten voraus, wie die Nutzung von Elektrizität oder von Kraftstoffen, welche vorteilhaft in Brennstoffzellen eingesetzt werden können. Der Einsatz des Brennstoffzellen-Antriebes stellt eine Lösung des Energiespeicherproblems dar, da die Elektrizität an Bord produziert wird. Da aber die Wasserstoffspeicherung an Bord und die Bereitstellung einer entsprechenden Infrastruktur ebenfalls Probleme aufwirft, wird auch die Betankung von Kohlenwasserstoffverbindungen, vorwiegend Methanol und Benzin, in Betracht gezogen, wobei dann deren

Konvertierung zu Wasserstoff an Bord in Kauf genommen werden muß.

Bei der Beurteilung neuer Antriebskonzepte steht daher nicht nur die Effektivität des Fahrzeugantriebes („vom Tank zum Rad“), sondern mehr noch die effektive Bereitstellung „neuer“ Kraftstoffe und die Problematik der erforderlichen Änderungen der Infrastruktur im Mittelpunkt; entsprechende Untersuchungen und vergleichende Bewertungen wurden in [19, 14, 20, 21, 12] durchgeführt.

7. Bilanzen für unterschiedliche Kraftstoffe

Benzin und Diesel können mit einem relativ geringen primärenergetischen Aufwand, der 12 bis 15% ihres Heizwertes entspricht (Rohöl-Förderung bis



Fahrzeugtank), bereitgestellt werden (Abbildung 7a). Für Erdgas sind dazu bereits rund 24% erforderlich. Komprimierter Wasserstoff und Methanol aus Erdgas benötigen bereits einen energetischen Einsatz, der 65 bis 75% ihres Heizwerts entspricht. Verflüssigter Wasserstoff (aus Erdgas) benötigt gar die 1,5-fache Energiemenge ($\eta_{ges} = 40\%$). Sehr günstig kann Methanol aus Restholz bereitgestellt werden, wenn nur der zusätzlich erforderliche fossile Energieeinsatz bilanziert wird (15%) [22]. Bei der Nutzung von Energiepflanzen steigt wegen des mitzubalanzierenden Anbaus der fossile Energieeinsatz auf rund 40%. Ähnlich ist die Bereitstellung von Biodiesel zu bewerten, wenn Gutschriften für Nebenprodukte berücksichtigt werden [23, 24]. Die Herstellung von Ethanol ist trotz Gutschriften relativ aufwendig [24, 25].

Der primärenergetische Aufwand für die Bereitstellung von Elektrolysewasserstoff liegt beim 2,1- (gasförmiger Wasserstoff; $\eta_{ges} = 32\%$) bzw. 2,8-fachen (flüssiger Wasserstoff; $\eta_{ges} = 26\%$) seines Heizwerts. Seine Nutzung als Kraftstoff kann also nur in Betracht gezogen werden, wenn regenerative Primärenergie in großen Mengen preiswert zur Verfügung stehen [26].

Alle Kraftstoffe auf der Basis fossiler Primärenergie haben hohe spezifische Emissionen an Klimagasen. Für Benzin

und Diesel sind dies rund 90 g/MJ Heizwert, für Erdgas rund 80 g/MJ. Wasserstoff und Methanol aus Erdgas liegen bei 100 g/MJ (Abbildung 7b), haben also gegenüber Benzin einen „Klimagas-Malus“ von ca. 10%. Ersichtlich ist weiterhin, daß die direkten CO₂-Emissionen dominieren. Methanol und Wasserstoff auf der Basis regenerativer Primärenergie sind — bei Nutzung der heutigen Infrastruktur — zwar nicht emissionsfrei, verursachen aber mit 18 bis 24 g/MJ nur ein Viertel der Klimagasemissionen heutiger Kraftstoffe [22]. Ethanol erreicht mit 70 g/MJ dagegen nahezu die spezifischen Emissionen heutiger, fossiler Kraftstoffe. Ersichtlich ist auch, daß die Herstellung von Elektrolysewasserstoff mit Strom, der (teilweise) aus fossiler Primärenergie stammt, keinen Sinn ergibt.

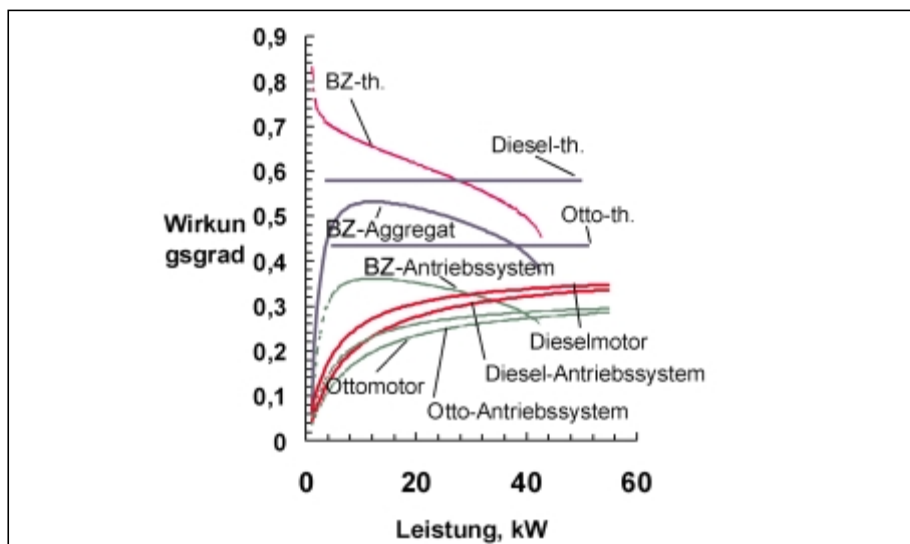
8. Energiebilanz von Antriebssystemen

Sowohl der Energiebedarf wie auch die Emissionen eines Fahrzeuges hängen sehr stark vom betrachteten Fahrzyklus ab, da die Fahrwiderstände stark zyklusabhängig und die Wirkungsgrade der Antriebskomponenten stark lastabhängig sind. Ferner ist der Kraftstoffverbrauch beim verkehrsbedingten Fahrzeugstillstand für verschiedene Antriebskonzepte sehr verschieden. Der typische, praxisbezogene Verlauf des Wirkungsgrades dieser

Wandler (Brennstoffzelle einschließlich Elektromotor und Verbrennungsmotor) in Abhängigkeit von der Leistung ist deshalb von großer Bedeutung (Abbildung 8). Ausschlaggebend für die Beurteilung sind die jeweils erreichbaren Gesamtwirkungsgrade der Antriebssysteme nach Abzug des Bedarfs für die eigene Versorgung und unter Einbeziehung aller Nebenaggregate (Elektromotor, Getriebe, Verdichter, u.ä.), die deutlich unter den „theoretischen“ Wirkungsgraden der Wandler liegen.

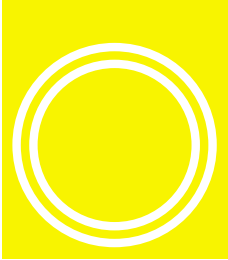
Ersichtlich ist, daß für Verbrennungsmotoren der optimale Betrieb bei Vollast liegt, weshalb eine niedrige Belastung der heute üblicherweise starken Motoren, etwa im Stadtverkehr, auch sehr niedrige (Teillast-)Wirkungsgrade zur Folge hat. Der Verlauf des Wirkungsgrades des Brennstoffzellen-Antriebs zeigt hingegen ein typisches Maximum, dessen Position durch die Auslegung, d.h. der gewählten spezifischen Leistung W/cm² Zellenfläche (welche wiederum eine Funktion der „zulässigen“ Masse bzw. Kosten ist) beeinflusst wird. Liegt das Optimum im meist benutzten Teillastbereich, so ist nicht nur bei sehr niedrigerer Last, sondern vor allem bei Vollast (z.B. Autobahnfahrt) mit deutlich niedrigeren Wirkungsgraden zu rechnen. Bilanziert man die Wirkungsgrade aus Abbildung 8 auf der Basis des NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus), so erreichen diese typische Werte von rund 21% für neue Ottomotoren, von 24% für Dieselmotoren und von ca. 32% für realistische zukünftige Brennstoffzellen-Antriebe mit gasförmigem Wasserstoff als Kraftstoff [19, 14].

Abbildung 8: Charakteristischer Verlauf der Wirkungsgrade von Antrieben mit Verbrennungsmotoren und mit Brennstoffzellen in Abhängigkeit von der Leistung („th“ = idealer Verlauf der reinen Energiewandler; „Antriebssystem“ = realistischer Verlauf für das komplette Antriebssystem bis zum Rad)



Die wesentlichen, derzeit konkret betrachteten Kombinationen von Kraftstoffen und Antriebssystem, also der gesamten Energieumwandlungsketten (EUK), sind:

- EUK 1: Benzin aus Erdöl / Ottomotor
- EUK 2: Diesel aus Erdöl / Dieselmotor
- EUK 3: komprimiertes Erdgas (CNG) / Ottomotor
- EUK 4: Wasserstoff aus Erdgas / PEFC + Elektro-Antrieb
- EUK 5: Methanol aus Erdgas / beheizter Dampfreformer (BSR) / PEFC / Elektro-Antrieb
- EUK 5a: Methanol aus Erdgas / autothermer Methanolreformer



- (ATR) / PEFC / Elektro-Antrieb
EUK 6: Methanol aus Erdgas / Direkt-Methanolbrennstoffzelle (DMFC) / Elektro-Antrieb
EUK 7: Benzin aus Erdöl / autothermer Benzinreformer (ATR) / PEFC / Elektro-Antrieb

Auf der Basis eines Referenz-PKW mit einer mechanischen Leistung am Rad von 40 kW, einer Reichweite von 500 km und einem Testgewicht mit Ottomotor von 1.130 kg werden die Energie- und Emissionsbilanzen dieser EUK gegenübergestellt (Tabelle 1). Für die Brennstoffzellen-Antriebe wurde dabei eine Zusatzmasse von 120 kg (EUK 4) bzw. 230 kg (EUK 5 bis 7) gegenüber dem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor angenommen.

Ergebnis ist, daß zwar die Kraftstoffverbräuche für Brennstoffzellen-Antriebe auf Wasserstoff- und Methanolbasis geringer sein können als diejenigen von Verbrennungsmotoren, daß jedoch primärenergetisch lediglich der Brennstoffzellen-Antrieb mit Wasserstoff (keine Reformierungsverluste) die Werte des Verbrennungsmotors erreicht.

Die Vorteile des Brennstoffzellen-Antriebs zeigen sich dagegen deutlich bei den limitierten Emissionen. Brennstoffzellen-Fahrzeuge sind praktisch lokal emissionsfrei, wie [Abbildung 9](#) am Beispiel der NO_x- und CO-Emissionen zeigt; wirksam sind allein die (geringen) Emissionen der Vorleistungen. Sie können daher selbst strenge zukünftige Emissionsstandards (EURO 4 (in 2005) oder Super-Ultra-Low-Emission-Vehicle (SULEV)) deutlich unterbieten.

9. Vergleich und Bewertung verschiedener Antriebssysteme

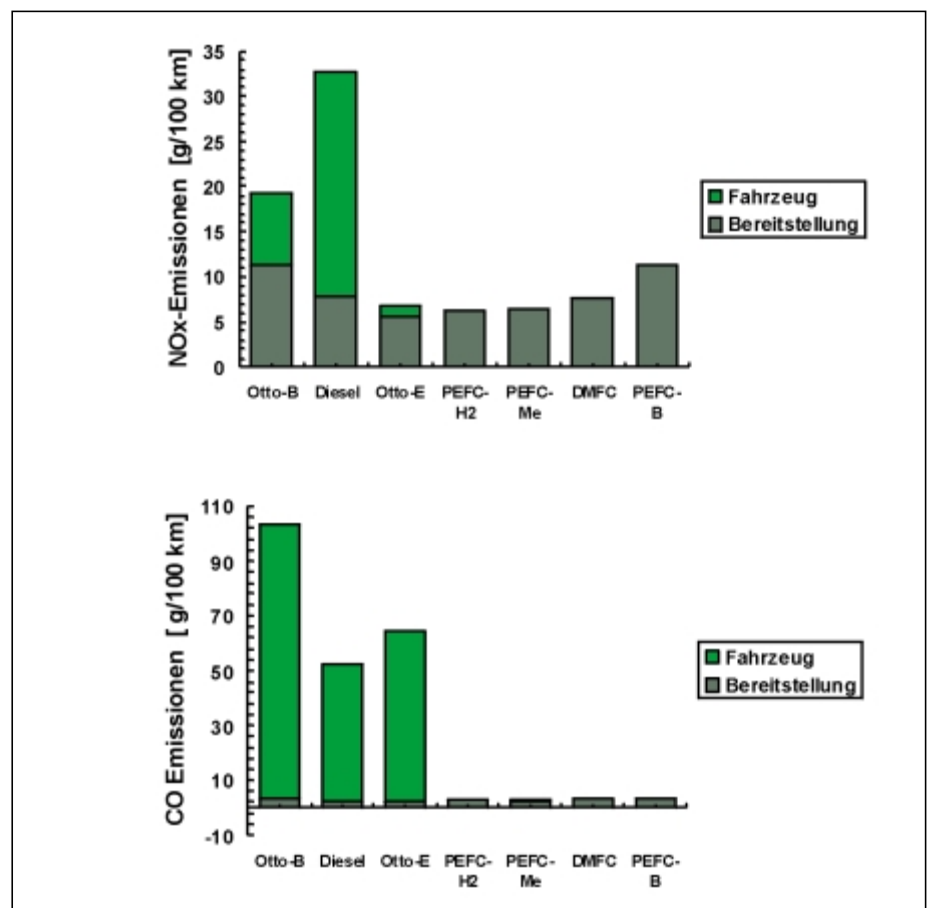
Eine vollständige Bewertung neuer Antriebssysteme muß auf die zukünftigen Entwicklungspotentiale der einzelnen Technologien sorgfältig eingehen. Diese sind für die etablierte Technologie des Verbrennungsmotors sehr viel präziser abschätzbar als für das neuartige, nur in Versuchsträgern vorhandene Brennstoffzellen-System. Durch gesetzlich verschärfte Emissionsvorgaben, aber auch durch freiwillige Selbstverpflichtungen der Automobilindustrie, werden derartige Potentiale bei den konventionellen An-

trieben inzwischen zügig umgesetzt. Die „Meßplatte“ für neue Antriebssysteme ist daher ständigen Veränderungen unterworfen. [Abbildung 10](#) zeigt dies anschaulich am Beispiel der klimarelevanten Emissionen (CO₂-Äquivalent): Im Gebrauch befindliche PKW (EURO 2) haben typischerweise Emissionen um 200 g/km; neue Fahrzeuge („Otto 2000“) kommen bereits auf rund 160 g/km, in einigen Jahren dürften für Ottomotoren etwa 145 g/km („Otto 2005“) und für Dieselmotoren etwa 115 g/km („Diesel 2005“) typisch sein. Als langfristig erreichbar kann für das Referenzfahrzeug mit Verbrennungsmotoren eine Emission um 100 g/km angesehen werden („Otto Grenz“), also rund eine Halbierung des heutigen Niveaus; dieser Wert ist nur durch den Einsatz kleinerer, aufgeladener Motoren erzielbar, verbunden mit einer Neuoptimierung der Fahrzeugmasse und einer damit verknüpften weiteren Verringerung des Luftwiderstandes (-25% Leermasse und -12% Luftwiderstand). Die

technische Erreichbarkeit der Reduktionswerte für Verbrennungsmotoren kann als gesichert gelten [27].

Eine ähnliche Entwicklung können möglicherweise auch Brennstoffzellen-Fahrzeuge durchlaufen, allerdings ist die entsprechende Datenbasis wesentlich unsicherer. Als realistisch erreichbar können die Ausgangswerte aus Tabelle 1 angesehen werden (EUK 4 und 5a), was zu Emissionswerten von 120 g CO₂-Äquivalent /km (H₂) bzw. 150 g/km (Methanol) führt. Optimistische, heute noch ungesicherte Wirkungsgrade (40% für H₂-Brennstoffzellen-Systeme; 34% für Methanol-Brennstoffzellen-Systeme) können diese Werte auf 100 bzw. 120 g/km reduzieren. Werden in einer Grenzfallbetrachtung wie beim Verbrennungsmotor Massenreduzierungen um 25% und eine Reduzierung des Luftwiderstandes um 12% unterstellt, so kann der Brennstoffzellen-PKW bei einem Wert von 70 g/km (H₂) bzw. rund 80 g/km (Methanol) landen, wodurch

Abbildung 9: Gesamte NO_x- und CO-Emissionen der in Tabelle 1 vorgestellten Energiewandlungsketten bzw. Antriebssysteme EUK 1 bis EUK 7 (DMFC: Direkt-Methanolbrennstoffzelle)



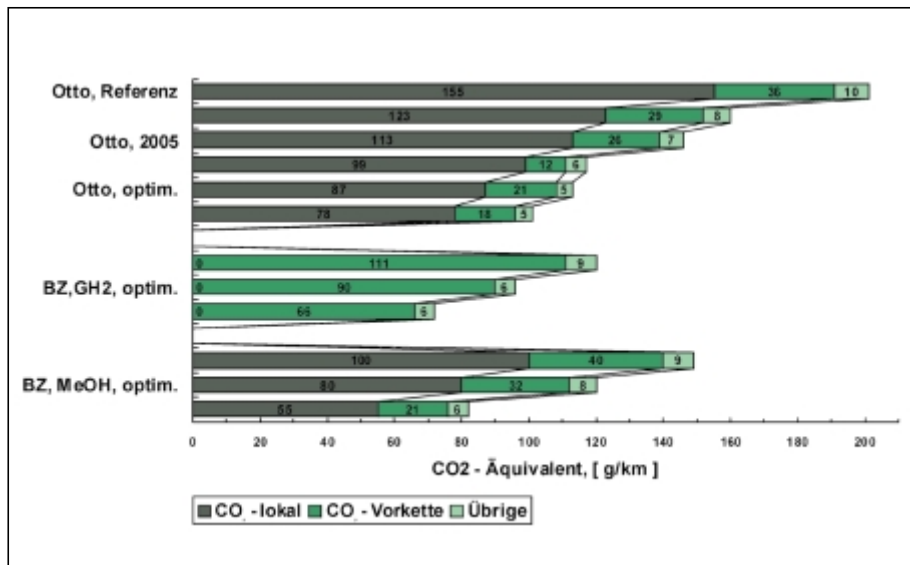
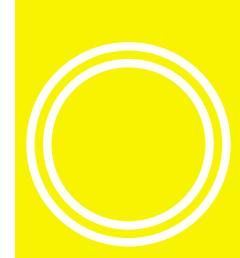


Abbildung 10: Bandbreite der klimarelevanten Emissionen bei PKW-Antrieben auf der Basis von Rohöl für Verbrennungsmotoren und Erdgas für Brennstoffzellen (Referenzmasse 1.200 kg, Referenzmehrgewicht für den Brennstoffzellen-Antrieb: 160 kg, 40 kW Antriebsleistung; GH₂: gasförmiger Wasserstoff; MeOH: Methanol; BZ: Brennstoffzelle)

emissionsseitig Vorteile gegenüber dem Verbrennungsmotor mit Benzin/ Diesel als Kraftstoff entstünden. Wird Erdgas direkt im Verbrennungsmotor eingesetzt, heben sich diese Vorteile wieder auf.

Die Ergebnisse zeigen zum einen den engen Zusammenhang zwischen den günstigen Ausgangsbedingungen des alternativen Antriebssystems „Elektromotor mit Brennstoffzelle“, nämlich gute Wirkungsgrade und lokale Emissionsfreiheit, und den Nachteilen, welche bei der Bereitstellung der entsprechenden alternativen Kraftstoffe in Kauf genommen werden müssen. Zum anderen wird die sehr hoch anzusetzende „Meßlatte“ der konventionellen Antriebe sichtbar. Die daraus resultierenden Fähigkeiten von Brennstoffzellen-Antrieben lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Brennstoffzellen-Antriebe sind lokal nahezu emissionsfrei; die Reichweite ist dabei nicht begrenzt wie bei den Batteriefahrzeugen. Sie haben daher Einsatzvorteile bei verschärften Emissionsstandards in Richtung Nullemission.
- Durch die Nutzung von Brennstoffzellen-Antrieben ist eine eindeutige Reduzierung des Primärenergiebedarfes und der globalen, klimarelevanten Emissionen im Vergleich zu

Verbrennungsmotoren nur dann zu erreichen, wenn der Vorteil der Effizienz der Wasserstoff-Luft-Reaktion in der Brennstoffzelle nicht durch zusätzliche Umwandlungsschritte (Synthese, Reformierung) bei der Kraftstoffbereitstellung bzw. -nutzung zunichte gemacht wird. Diese Bedingung ist beim Einsatz fossiler

Tabelle: Typische mittlere Antriebswirkungsgrade im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) sowie resultierender Energieverbrauch je 100 km (für den Verbrennungsmotor: moderne, neue Motoren; für die Brennstoffzelle:realistisch bis 2005 erreichbare Werte)

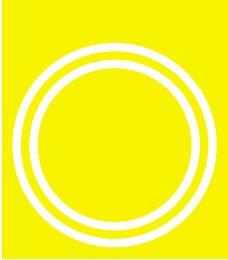
EUK	Kraftstoff / Antrieb	Wirkungsgrad des Antriebs in % Verbrauch des Pkw in MJ/100 km Primärenergieverbrauch (EUK) in MJ/100 km		
		PkW %	PkW MJ/100 km	EUK MJ/100 km
EUK 1:	Benzin (Öl) / Ottomotor	21	166	189
EUK 2:	Diesel (Öl) / Dieselmotor	24	146	160
EUK 3:	Erdgas (CNG) / Ottomotor	21	170	214
EUK 4:	Wasserstoff (CH ₂) /+ PEFC ⁴	32	113	182
EUK 5:	+ Elektro-Motor Methanol / BSR ³) + PEFC ⁴)	30	125	214
EUK 5a:	+ Elektro-Motor Methanol / ATR ²) + PEFC ⁴)	27	139	238
EUK 6:	+ Elektro-Motor Methanol / DMFC ¹) +	25	154	264
EUK 7:	+ Elektro-Motor Benzin / ATR ²) + PEFC ⁴)	22	177	200

1 DMFC = Direkt-Methanolbrennstoffzelle, 2 autothermer Methanolreformer, 3 beheizter Dampfpreformer, 4 Polymer Electrolyte Fuel Cell

Primärenergien erfüllbar, wenn bei Brennstoffzellen-Antrieben die noch durchzuführenden ehrgeizigen Entwicklungsarbeiten zum Erfolg führen.

- Werden dagegen Kraftstoffe aus regenerativen Quellen dem Vergleich zugrunde gelegt, also Methanol aus Biomasse oder Wasserstoff aus regenerativ erzeugtem Strom, dann sind die herstellungsseitigen Verluste für beide Antriebsarten identisch. Die höheren Wirkungsgrade des Brennstoffzellen-Systems wirken sich dann besonders vorteilhaft aus, wenn gleichzeitig bei weiterentwickelten Antrieben auch von einer vergleichbaren Masse ausgegangen werden kann.

Brennstoffzellen-Antriebe müssen für eine absehbare Zeit in Versorgungssystemen mit fossilen Kraftstoffen mit weiterentwickelten Verbrennungsmotoren wirtschaftlich konkurrieren können. Ihre Umweltvorteile, insbesondere bei den limitierten Emissionen, sind heute nur bedingt in einer Kosten/Nutzen-Analyse des Verkehrs quantifizierbar, so daß sich nicht von vornherein deutlich höhere anlegbare Kosten ableiten lassen. Ob ihre Marktein-



führung gelingt, wird daher bei den derzeit herrschenden Rahmenbedingungen wesentlich davon abhängen, ob sich in einer Serienfertigung eine Annäherung an die spezifischen Kosten heutiger Antriebssysteme erreichen läßt.

Literatur

- [1] Bericht der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages zum Thema Energie, BT-Drucksache 12/86000, Deutscher Bundestag, Bonn (1994)
- [2] R. Pruscek, et al.
„Ermittlung und Verifizierung der Potentiale und Kosten der Treibhausgasminde-
rung durch KWK in der Industrie“, Bericht an die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, Essen (1994)
- [3] W. Schulz, K. Traube
„Ermittlung und Verifizierung der Potentiale und Kosten der Treibhausgasminde-
rung durch KWK zur Fern- und Nahwärmeversorgung“, Bericht an die Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages, Bremer Energieinstitut, Bremen (1993)
- [4] R. Lux, E. Thöne
„Potentiale der KWK – ein Vergleich aktueller Potentialstudien“, Euroheat & Power 7-8 (1996) 437-445
- [5] J. Nitsch
„Potentiale und Märkte der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland“, OTTI-Technologie-Kolleg, Regensburg (1997), DLR-STB-Bericht Nr. 15 (1997)
- [6] R. Hofer
„Strom- und Wärmezeugungspotentiale von industriellen KWK-Anlagen“. BWK, Band 4 Nr. 11/12 (1995) 453-458
- [7] W. Suttor (Hrsg.)
„Praxis Kraft-Wärme-Kopplung“, Handbuch, Teile Technik und Ökonomie, C.F. Müller-Verlag, Heidelberg (1996)
- [8] K. Traube, W. Schulz
„Ökologische und ökonomische Wirkungen des Zubaus von KWK-Anlagen, insbesondere von BHKW in Deutschland“, Studie, Bremer Energie-Institut, Bremen (1994)
- [9] C. Beckervordersandforth, M. Uhrig
„Brennstoffzellen in der KWK — Stand der Technik und Entwicklungstendenzen“, VDI-Bericht Nr. 1193 (1995) 13-26
- [10] W. Weber
„Dezentrale KWK-Möglichkeiten und Grenzen“, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 46, Heft 7, (1996) 410-414
- [11] H. Pick
„BHKW-Option für die Energie- und Umweltpolitik“, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 46, Heft 7 (1996) 416-419
- [12] M. Fischer, J. Nitsch, W. Schnurnberger
„Technischer Stand und wirtschaftliches Potential der Brennstoffzellen-Technologie im internationalen Vergleich“, Gutachten im Rahmen des Monitoring-Vorhabens „Brennstoffzellen-Technologie“, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Stuttgart (1997)
- [13] D. Oertel
„Zum Entwicklungsstand der Brennstoffzellen-Technologie“, Arbeitsbericht Nr. 51, Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Bonn (1997)
- [14] „Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen“, Studienvorhaben Nr. 686, Forschungszentrum Jülich (B. Höhle, et al.), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart (J. Nitsch, et al.), Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik der TU München (U. Wagner, et al.) und FVV-Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Frankfurt, Heft 657 (1998)
- [15] P. Kraus
„Perspektiven der Karbonatschmelzen-Brennstoffzellen im Energiemarkt“, Tagungsband, Kongress „Brennstoffzellen im Energiemarkt“, Forum für Zukunftsenergie, Bonn und GEW, Köln (1996)
- [16] W. Moll, et al.
„Braunkohleverstromung in SOFC-Brennstoffzellen-Kraftwerken“, Tagungsband, Kongress „Brennstoffzellen im Energiemarkt“, Forum für Zukunftsenergie, Bonn und GEW, Köln (1996)
- [17] J. Reinecke, et al.
„Brennstoffzellen-Kraftwerke zur Verstromung von Wasserstoff aus fossilem Rohstoff und anderen Quellen“, VDI-Bericht Nr. 912 (1992) 103-124
- [18] „Innovation in der Kraftwerkstechnik“, Siemens AG, Bereich Energieversorgung, Siemens-Zeitschrift „Standpunkt“, Band 9, Heft 1/96 (1996)
- [19] C. Carpetis
„Energie- und Schadstoffbilanzen von Elektrofahrzeugen mit Batterien und/oder Brennstoffzellen-Antrieben im Vergleich zu Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren“, DLR-STB-Bericht Nr. 16, Stuttgart (1997)
- [20] B. Höhle, P. Biedermann
„Vergleichende Analyse von Pkw-Antrieben der Zukunft mit Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen-Systemen“, VDI-Bericht Nr. 1378, Dresden (1998)
- [21] B. Höhle, et al.
„Verkehrsemissionen und Sommermog“, Monographie Bank 26, Forschungszentrum Jülich (1996)
- [22] M. Pehnt
„Life Cycle Assessment of Biomass Fuels for Fuel Cell and Engine Combined Heat and Power (CHP) Production“, Proc. 10th EU Conf. and Technology Exhibition „Biomass for Energy and Industry“, C.A.R.M.E.N, Würzburg (1998)
- [23] G.A. Reinhardt
„Energie- und CO₂-Bilanzierung nachwachsender Rohstoffe“, Braunschweig/Wiesbaden (1992)
- [24] D. Wintzer, et al.
„Technikfolgenabschätzung zum Thema Nachwachsende Rohstoffe“, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Landwirtschaftsverlag Münster (1993)
- [25] M. Kaltschmitt, G.A. Reinhardt (Hrsg.)
„Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung“, ISBN 3-528-06778-0, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden (1997)
- [26] J. Nitsch, H. Dienhart, O. Langniß
„Entwicklungsstrategien für solare Energiesysteme und die Rolle von Wasserstoff am Beispiel der Bundesrepublik Deutschland“, VDI-Bericht Nr. 1321, (1997) 767-782
- [27] „Klimaschutz durch Innovationen im Kraftfahrzeugbereich“, Anhörung des Ausschusses für Umwelt und Verkehr des Landtags von Baden-Württemberg, Stuttgart (1998)
- [28] „Umwandlungssektor“, Teilprojekt 4 zum Projekt IKARUS des BMFT, IKARUS-Bericht Nr. 4-06(1), Forschungszentrum Jülich (1994)