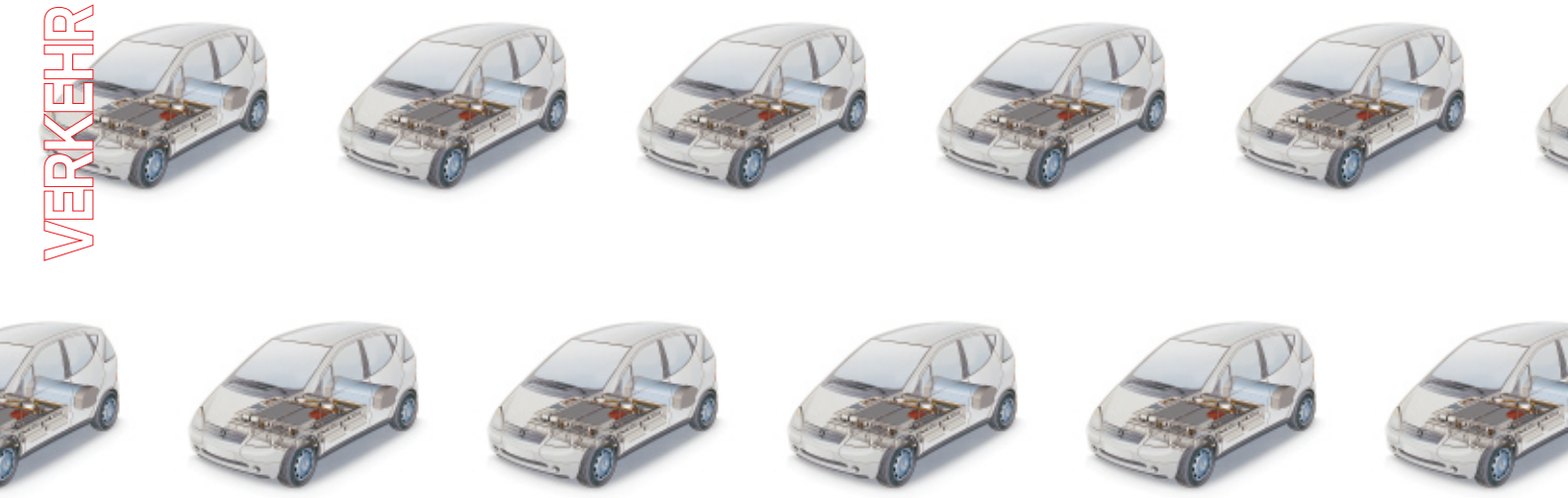




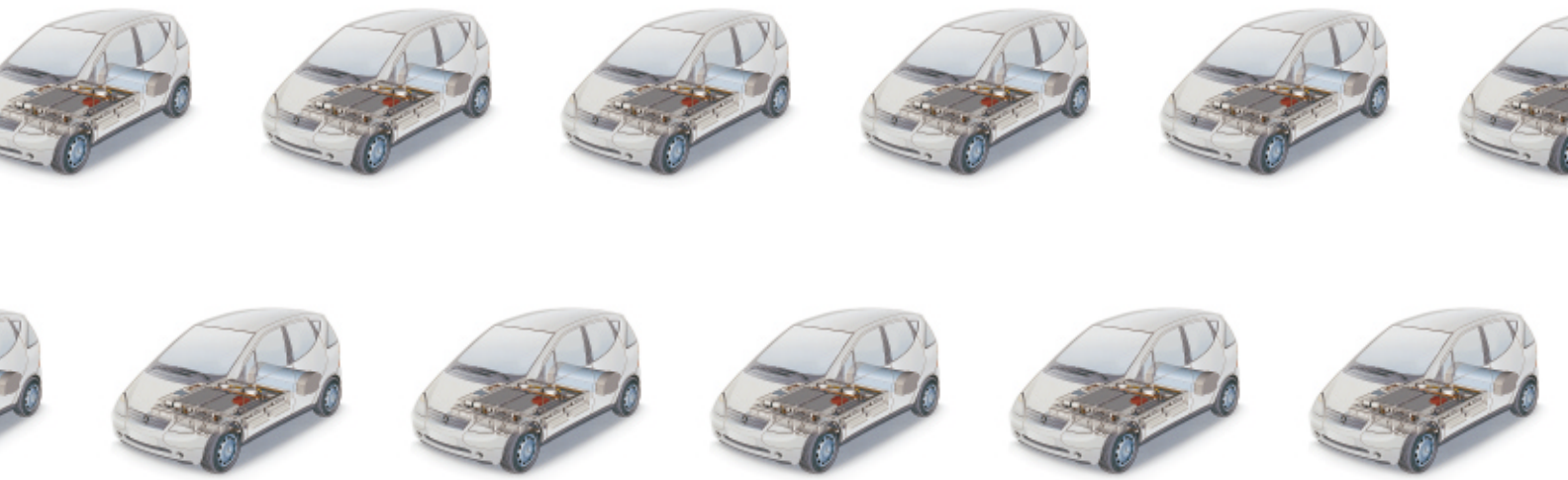
Energie- und Schadstoffbilanz

Neue Antriebskonzepte dürfen nicht nur nach der Effektivität des Fahrzeugantriebes selbst – gewissermaßen „vom Tank zum Rad“ – beurteilt werden. Darüber hinaus müssen auch die komplette Herstellungskette „neuer“ Kraftstoffe und die Problematik der erforderlichen



Von Joachim Nitsch, Constantin Carpetis, Martin Pehnt





neuer Fahrzeugantriebe

Änderungen der Infrastruktur in die Betrachtung einbezogen werden. Die Autoren haben an mehreren Untersuchungen zur vergleichenden Bewertung von Antriebssystemen und Treibstoffen mitgewirkt. Aktuelle eigene Ergebnisse werden hier übersichtsartig dargestellt.





Die umweltrelevanten Zielgrößen, die bei der Einführung neuer Fahrzeugkonzepte möglichst geringe Werte annehmen sollen, sind erstens der spezifische Treibstoff- und Primärenergiebedarf, zweitens die klimarelevanten Emissionen (als CO_2-Äquivalent aller klimarelevanten Gase) und drittens die lokal bzw. regional relevanten Schadstoffemissionen, beispielsweise Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffverbindungen (NMHC), Schwefeldioxide (SO_2) und Partikel.

Will man diese Zielgrößen minimieren, so ist dies im wesentlichen mit der Forderung nach niedrigerem spezifischem Energieverbrauch identisch. Der Einsatz kohlenstoffarmer Primärenergien wie Erdgas und langfristig vor allem die Nutzung regenerativer Energien hat zusätzlich eine positive Auswirkung auf die Höhe der klimarelevanten Emissionen. Im Fall lokal oder regional wirksamer Schadstoffe muss zusätzlich noch auf die Weiterentwicklung der Katalysatortechnik gesetzt werden. Sollen die 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 Elektrizität beim reinen Elektroantrieb oder Wasserstoff, welcher günstig in Brennstoffzellen eingesetzt werden kann. Die Brennstoffzelle löst dabei das Speicherungsproblem, 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 Nutzung von Kohlenwasserstoffen, vorwiegend Methanol, in Betracht gezogen, wobei dann deren Umwandlung zu Wasserstoff an Bord in Kauf genommen werden muss.

Ökobilanzen für verschiedene Kraftstoffe

Die Bereitstellung von Kraftstoffen ist mit unterschiedlich hohen Energieaufwendungen und Umweltauswirkungen verknüpft, die aus der Gewinnung der Primärenergie, dem Herstellungsprozess, dem Transport der Produkte bis zur Tankstelle und den Verwendungsmöglichkeiten von Nebenprodukten resultieren. Schließlich spielt auch der Kohlenstoffgehalt der Primärenergien eine wichtige Rolle. Benzin und Diesel können mit einem relativ geringen Aufwand an Primärenergie, der 13 bis knapp 18 Prozent ihres Heizwertes entspricht, bereitgestellt werden, was einem „Bereitstellungswirkungsgrad“ von 88,5 Prozent bzw. 85 Prozent entspricht. Für komprimiertes oder verflüssigtes Erdgas sind dazu 18 Prozent bzw. 24 Prozent erforderlich. Komprimierter Wasserstoff und Methanol aus Erdgas benötigen bereits einen energetischen Einsatz, der rund 70 Prozent ihres Heizwerts entspricht. Wird, wie im Kvaerner-Prozess, der bei der Umwandlung von Methan in Wasserstoff freigesetzte Kohlenstoff in Form von Ruß genutzt, verringert sich der energetische Aufwand deutlich durch die Gutschrift für das Nebenprodukt Ruß. Allen Kraftstoffen aus fossiler Primärenergie ist zusätzlich gemeinsam, dass ihre Verbrennung selbst den Verbrauch erschöpflicher Energie bedeutet. Die Nutzung regenerativer Energien zur Herstellung von Kraftstoffen benötigt dagegen nur einen relativ geringen Einsatz erschöpflicher Energie, der zudem von der „Kohlenstoffintensität“ der Energieinfrastruktur abhängt. Methanol aus Restholz erfordert

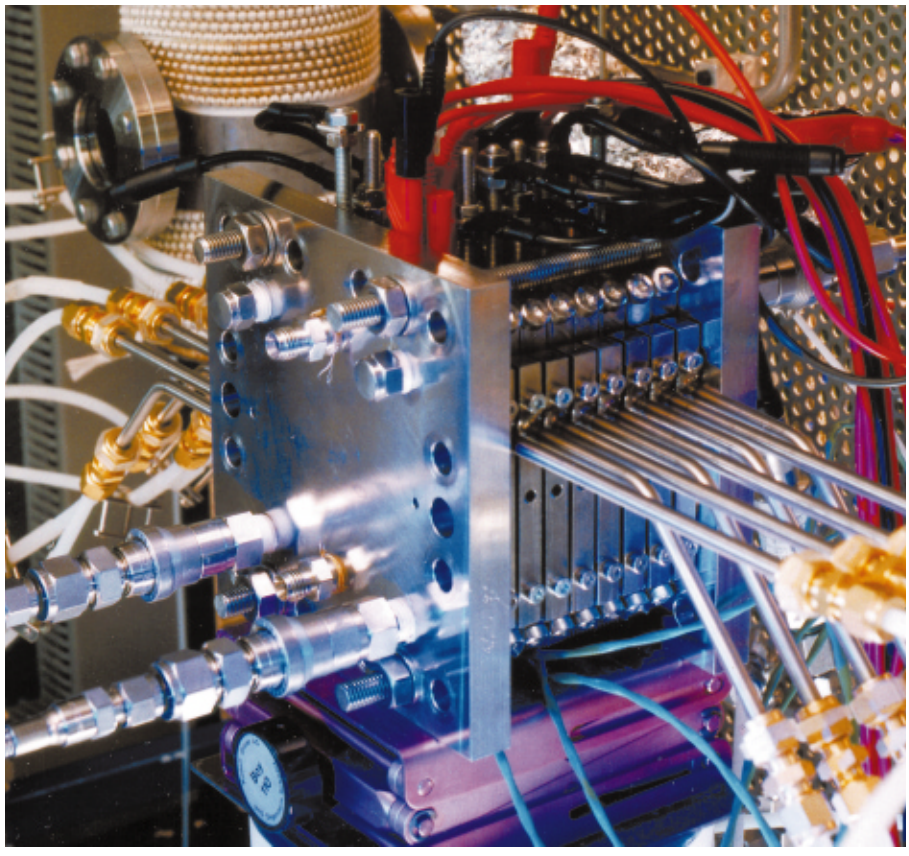
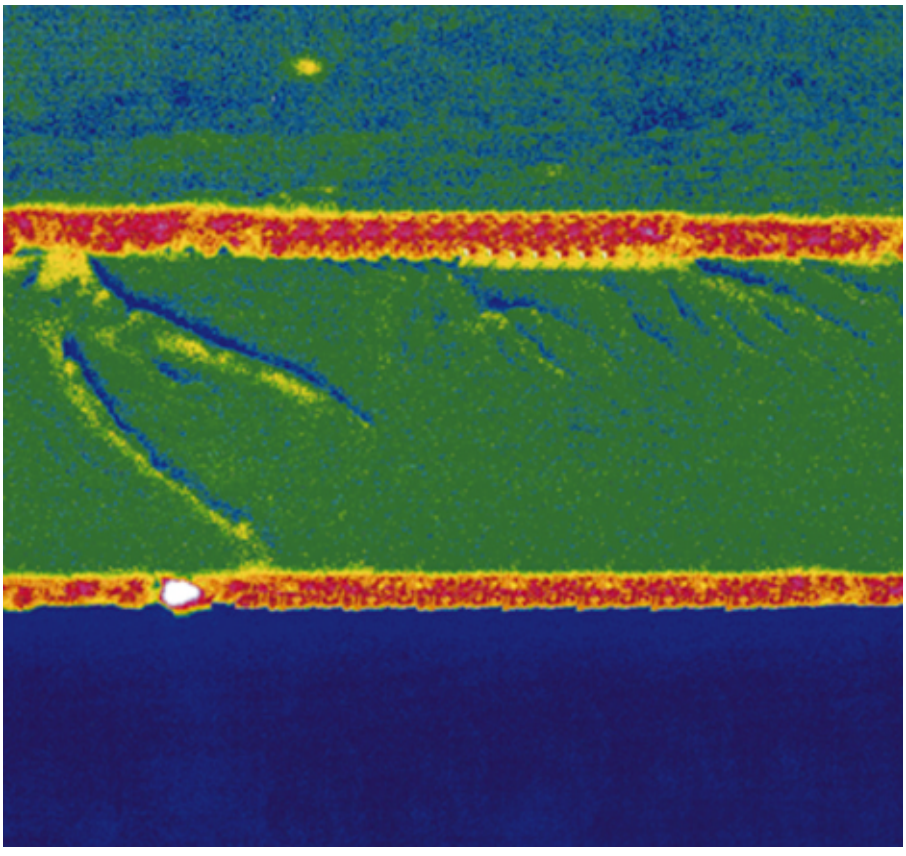


Abb.: Brennstoffzelle im Labor (links) und in mikroskopischer Vergrößerung (rechts).



einen zusätzlichen Einsatz erschöpflicher Energie von 13 Prozent; bei der Nutzung von Energiepflanzen steigt wegen des mitzubilanzierenden Anbaus dieser Energieeinsatz auf knapp 40 Prozent. Günstiger ist die Bereitstellung von Biodiesel zu bewerten, wenn Gutschriften für Nebenprodukte berücksichtigt werden. Die Herstellung von Bio-Ethanol ist dagegen mit 80 Prozent zusätzlichem Einsatz an erschöpflicher Energie relativ aufwendig. Der Aufwand an erschöpflicher Primärenergie für die Bereitstellung von komprimiertem gasförmigen Wasserstoff aus regenerativer Elektrizität mittels Elektrolyse liegt bei zehn Prozent seines Heizwertes, was ausschließlich durch seinen Transport und die Komprimierung an der Tankstelle bedingt ist. Wird der Wasserstoff verflüssigt, verdoppelt sich der Einsatz erschöpflicher Energie. Hinzu treten natürlich die Verluste an regenerativer Elektrizität beim Elektrolyseprozess in Höhe von rund 30 Prozent.

Alle Kraftstoffe auf der Basis fossiler Primärenergie haben hohe spezifische Emissionen an Klimagasen. Für Benzin und Diesel sind es 85 bis 90 g/MJ Heizwert, für Erdgas 75 bis 80 g/MJ. Gasförmiger Wasserstoff (GH_2) und Methanol aus Erdgas liegen bei 100 g/MJ, sie haben also gegenüber Benzin einen „Klimagas-Malus“ von ca. 10 Prozent. Günstiger schneidet Wasserstoff ab, der aus Erdgas mittels des Kvaerner-Prozesses gewonnen wurde, da der anderweitig genutzte Ruß nicht klimawirksam wird. Methanol und Wasserstoff auf der Basis regenerativer Primärenergie sind – bei Nutzung der heutigen Infrastruktur – zwar nicht frei von Klimagas-Emissionen, emittieren aber mit 12 bis 24 g/MJ nur ein Sechstel bis ein Viertel der Klimagasemissionen heutiger Kraftstoffe. Biodiesel und Bio-Ethanol erreichen dagegen mit 63 bis 70 g/MJ nahezu die spezifischen Emissionen heutiger fossiler Kraftstoffe, was vor allem auf die extrem treibhausgaswirksamen Lachgas-Emissionen aus Anbau und Düngemitteln zurückzuführen ist. Ersichtlich ist auch, dass die Herstellung von Elektrolysewasserstoff aus Emissionssicht sehr günstig ist, wenn die Primärenergie aus regenerativen Quellen stammt.



Energiebilanz von Antriebssystemen

Der Kraftstoffbedarf und somit auch die Emissionen eines Fahrzeuges hängen stark vom betrachteten Fahrzyklus ab, da sowohl die Fahrwiderstände als auch die Wirkungsgrade der Antriebskomponenten davon beeinflusst werden. Ferner ist der Kraftstoffverbrauch beim verkehrsbedingten Fahrzeugstillstand für verschiedene Antriebskonzepte sehr unterschiedlich. Ausschlaggebend für die Beurteilung sind Höhe und Verlauf über der Leistung der jeweiligen Gesamtwirkungsgrade der Antriebssysteme nach Abzug des Bedarfs für die eigene Versorgung und unter Einbeziehung aller Nebenaggregate (Elektromotor, Getriebe, Verdichter u.ä). Diese liegen deutlich unter den Wirkungsgraden der eigentlichen Wandler, also des Motors oder des Brennstoffzellenstapels. Für Antriebssysteme mit Verbrennungsmotor liegt der optimale Betrieb bei Volllast, weshalb eine niedrige Belastung der heute üblicherweise starken Motoren, etwa im Stadtverkehr, auch sehr niedrige Teillastwirkungsgrade zur Folge hat. Der Verlauf des Wirkungsgrades des Brennstoffzellenantriebs zeigt hingegen ein Maximum bei Teillast, dessen Position durch die Auslegung, d.h. der gewählten Leistung (welche wiederum eine Funktion der „zulässigen“ Masse bzw. der „zulässigen“ Kosten ist) bestimmt ist. Bei



Tabelle: Typische mittlere Antriebswirkungsgrade im Referenzfahrzyklus und resultierender Energieverbrauch je 100 Kilometer für ein Referenzfahrzeug mit 1.180 Kilogramm Gesamtmasse und einer Leistung von 60 Kilowatt (System 1). Werte für den Verbrennungsmotor: Ist = 2000; nahe Zukunft = 2005; für Brennstoffzelle: realistisch bis 2005 erreichbar.

Nr.	Primärenergie / Kraftstoff / Antrieb	Gesamtwirkungsgrad Antrieb in % Kraftstoffverbrauch in MJ/100 km (Pkw) Primärenergieverbrauch in MJ/100 km (PEV)		
		Wirkungsgrad %	Pkw MJ/100 km	PEV MJ/100 km
1	Mineralöl / Benzin / Motor, 2000	23,0	178	209
2	Mineralöl / Diesel / Motor, 2000	26,9	156	176
3	Erdgas / Motor	23,5	178	210
4	Erdgas / gasförm. Wasserstoff / Motor	24,6	178	292
5	Mineralöl / Benzin / Motor, 2005	26,0	157	185
6	Mineralöl / Diesel / Motor, 2005	29,0	145	164
7	Öl / Diesel / Hybrid Mot. + El. / BR	30,7 *)	123	139
8	Mineralöl / Benzin / Brennstoffzelle	28,7	180	211
9	Erdgas / Methanol / Brennstoffzelle	33,4	150	250
10	Erdgas / Wasserstoff / Brennstoffzelle	38,3	122	200
11	Erdgas / Wasser / Hybrid BZ + El. / BR	36,9*)	107	175

**) Wirkungsgrad ohne Bremsenergierückgewinnung (BR) in Höhe von ca. 15 Prozent*

Brennstoffzellenantrieben ist also bei sehr niedriger Last, aber auch bei Volllast (z.B. beschleunigte Autobahnfahrt) mit Wirkungsgraden unterhalb des Optimums zu rechnen.

Der hier betrachtete Referenz-Pkw besitzt in seiner Version mit Benzin-Verbrennungsmotor eine Nennleistung von 60 Kilowatt, eine Reichweite von 600 Kilometer und ein Gesamtgewicht einschließlich Nutzlast von 1.180 Kilogramm (Fahrzeug ohne Antrieb 800 Kilogramm, komplettes Antriebssystem 230 Kilogramm, Nutzlast 150 Kilogramm). Der Referenzfahrzyklus setzt sich zu 35 Prozent aus dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ), der Innerorts- und Außerortsfahrten abbildet, zu 34 Prozent aus Bundesstraßenfahrten und zu 31 Prozent aus Autobahnfahrten zusammen und ist repräsentativ für Fahrsituationen in Deutschland. Er verlangt eine verfügbare Antriebsleistung am Rad von 45 Kilowatt. Damit Fahrzeuge mit BZ-Antrieben die im Fahrzyklus geforderten Leistungen und das Fahrverhalten jederzeit erbringen können – was in der Simulationsrechnung auf Sekundenbasis überprüft wird – müssen sie aufgrund ihrer Leistungscharakteristik über höhere Antriebsnennleistungen verfügen. Diese Tatsache, sowie die im Vergleich zu Motorantrieben höhere spezifische Massen, erhöhen die Fahrzeugmasse entsprechend. Die Ergebnisse illustriert obenstehende Tabelle, wobei der Basiswert des Systems 1 mit 178 MJ/100 km Kraftstoffverbrauch einem Benzinverbrauch von 5,5 l/100 km entspricht.

Die über den gesamten Fahrzyklus bilanzierten Wirkungsgrade der Brennstoffzellenantriebe mit Wasserstoff und Methanol liegen deutlich über denjenigen der Motorantriebe. Der Vorsprung verringert sich jedoch bei den Kraftstoffverbräuchen infolge der bei gleichen Fahrleistungen höheren Massen für Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantriebe. Primärenergetisch ist kein Vorteil der Brennstoffzellenantriebe auf der Basis fossiler Primärenergien zu erkennen, da die Herstellungsaufwendungen für Wasserstoff und Methanol aus Erdgas die antriebsseitigen Vorteile zunichte machen. Besonders effiziente Antriebssysteme sind autonome Hybridantriebe, also Kombinationen von Verbrennungsmotor (oder Brennstoffzelle) mit Elektromotor und Pufferbatterie. Die hierbei mögliche Rückgewinnung von Bremsenergie in Höhe von rund 15 Prozent des Antriebsbedarfs ergibt die geringsten Kraftstoffverbräuche aller Kombinationen.

Werden die Anforderungen an das Fahrzeug hinsichtlich der Fahrleistungen reduziert, indem man z.B. auf Beschleuni-





gungsreserven bei Autobahnfahrten verzichtet, so reduziert sich die erforderliche Nennleistung, und die Energieverbräuche sinken sowohl bei Motor- als auch bei Brennstoffzellenantrieben, ohne dass sich obige Aussagen grundsätzlich ändern. Ähnliches gilt für gewichtsmindernde Maßnahmen, wobei allerdings der Brennstoffzellenantrieb längerfristig noch größere Potenziale besitzen dürfte.

Bei der Bilanzierung der klimarelevanten Emissionen wirken sich die unterschiedlichen Kohlenstoffgehalte der fossilen Primärenergien aus, was sich auf die Werte der entsprechenden Brennstoffzellenfahrzeuge günstig auswirkt. Das mit Wasserstoff betankte BZ-Fahrzeug erreicht mit 104 g CO_2-Äquivalent /km den ebenfalls niedrigen Wert des Motor-Hybrid-Fahrzeugs auf Dieselbasis und kommt in der Hybrid-Version deutlich unter 100 g/ km, was für die hier zugrunde gelegte Fahrzeugklasse einen sehr guten Wert darstellt. Mit Methanol aus Erdgas oder Benzin betankte BZ-Fahrzeuge besitzen dagegen keine Vorteile bei Klimagasemissionen gegenüber Fahrzeugen mit modernen Verbrennungsmotoren. Eine deutliche Reduktion klimarelevanter Emissionen ist erst durch den Übergang auf eine regenerative Primärenergiebasis zu erreichen. Bei der Nutzung von Biomasse ist Methanol dem Einsatz von Biodiesel oder Ethanol vorzuziehen, deren Treibhausgas-Emissionen nur wenig geringer als die der modernen Benzin- oder Dieselmotoren sind. Nahezu vernachlässigbare Emissionen besitzt elektrolytisch erzeugter Wasserstoff. Der Wirkungsgradvorteil von Brennstoffzellen relativiert sich vor diesem Hintergrund stark.

Allen Brennstoffzellenantrieben ist jedoch gemeinsam, dass sie lokal praktisch emissionsfrei sind. So entstehen beispielsweise NO_x-Emissionen lediglich bei der Herstellung der Kraftstoffe in Höhe von etwa 6 g/100 km (Methanol 10 g/100 km). Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor treten die am Fahrzeug entstehenden NO_x-Emissionen hinzu, welche sich bei Benzinfahrzeugen auf rund 10 g/100 km, bei Erdgasfahrzeugen auf 4 g/100 km und bei Dieselfahrzeugen auf 20 g/100 km belaufen. Auch neue Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor unterschreiten allerdings die zukünftigen strengen Emissionsstandards (EURO 4).

Eine vollständige Bewertung neuer Antriebssysteme muss auch sehr sorgfältig auf die zukünftigen Entwicklungspotenziale der einzelnen Technologien eingehen. Diese sind für die etablierte Technologie des Verbrennungsmotors sehr viel präziser abschätzbar als für das neuartige, nur in Versuchsträgern vorhandene Brennstoffzellensystem. Durch gesetzlich verschärfte Emissionsvorgaben, aber auch durch freiwillige Selbstverpflichtungen der Automobilindustrie werden derartige Potenziale bei den konventionellen Antrieben inzwischen zügig umgesetzt. Die „Messlatte“ für neue Antriebssysteme ist daher ständigen Veränderungen unterworfen, worauf die Angaben für Verbrennungsmotoren des Jahres 2005 hinweisen. Eine ähnliche Entwicklung dürften zwar auch Brennstoffzellenfahrzeuge durchlaufen, allerdings ist die entsprechende Datenbasis wesentlich unsicherer. Auch wird sich diese Entwicklung, ähnlich wie beim Verbrennungsmotor, über einen längeren Zeitraum erstrecken und der intensiven Rückkopplung aus dem Markt bedürfen.

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 Kraftstoffe in Kauf genommen werden müssen, solange diese aus fossilen Primärenergien stammen. Zum anderen wird die sehr hoch anzusetzende „Messlatte“ der konventionellen Antriebe sichtbar. Die daraus resultierenden Fähigkeiten von Brennstoffzellenantrieben hinsichtlich Ressourcenschonung und Klimaschutz lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Brennstoffzellenantriebe sind lokal emissionsfrei, dabei ist die Reichweite nicht – wie bei den Batteriefahrzeugen – begrenzt. Sie haben daher Einsatzvorteile bei besonders verschärften Emissionsstandards in Richtung Nullemission.
- Durch die Nutzung von Brennstoffzellenantrieben ist eine Reduzierung der globalen, klimarelevanten Emissionen im Vergleich zu Verbrennungsmotoren nur dann zu erreichen, wenn der Vorteil der hohen 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 Primärenergien nur erfüllbar, wenn bei BZ-Antrieben große technologische Fortschritte erzielt werden bzw. Wasserstoff als Kraftstoff eingesetzt wird. Einsparungen im Primärenergiebedarf sind dabei allerdings nicht zu erwarten. Relative Emissionsvorteile für die Brennstoffzellenantriebe sind dann zu erwarten, wenn Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle auf denselben Kraftstoff zurückgreifen müssen, also auf Methanol aus Biomasse oder Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen. Die klimarelevanten Emissionen sind dann allerdings insgesamt sehr gering, so dass antriebsseitige Vorteile weniger ausgeprägt sind. Die absolute Emissionshöhe wird sehr viel stärker durch die Art der Primärenergiequelle als durch das Antriebssystem beeinflusst.
- Brennstoffzellenantriebe müssen also in allen Versorgungsvarianten mit weiterentwickelten Verbrennungsmotoren wirtschaftlich konkurrieren können, da ihre Umweltvorteile nicht derart gravierend sind, dass sich daraus deutlich höhere anlegbare Kosten ableiten lassen. Die noch erforderliche Kostenreduktion dürfte für die absehbare Zeit die größte Hürde für ihre breite Einführung darstellen.

Dr.-Ing. Joachim Nitsch, Dr.-Ing. Constantin Carpetis und Dipl.-Phys. Martin Pehnt, DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart. ◄

