

Kapitel 4

Kraftpakete auf Rädern: Brennstoffzellen im mobilen Einsatz

4.1 Die mobile Gesellschaft

Eine Ameise legt am Tag einen halben Kilometer mehr Wegstrecke zurück als ein Mensch zu Fuß, sagt der Wirtschaftspolitiker Johann Eeckhoff. Nur einen Kilometer laufen wir täglich. Aber mit dem Auto fahren die deutschen Durchschnittsbürger immerhin 25 Kilometer. Die Weissagung des Philosophen Roger Bacon hat sich bewahrheitet. Vor 800 Jahren prognostizierte er: „Doch wird es möglich sein, Wagen zu bewegen, welche sich ohne Zugtiere mit unvorstellbarer Kraft bewegen.“

Mobilität ist zu einem wesentlichen Bestandteil unserer Gesellschaft geworden. Sie sichert die reibungslose Versorgung mit Rohstoffen und Gütern. Sie schafft zahlreiche Arbeitsplätze. Sie ermöglicht Sozialkontakte und die Befriedigung elementarer Bedürfnisse, und sie ist ein Spaßfaktor.

Doch zugleich wächst der Mobilitätssektor beängstigend schnell (Abbildung 4.1). Allein die Anzahl der Kraftfahrzeuge hat sich innerhalb von 40 Jahren von 8 Millionen auf fast 51 Millionen (2000) erhöht. Die Verkehrsleistung im Personenverkehr hat sich im selben Zeitraum fast vervierfacht. Im Güterverkehr hat die Verkehrsleistung ähnlich stark zugenommen.

In dieser Expansion finden das ausgeprägte Bedürfnis der Menschen nach Mobilität, ihr wachsender Wohlstand und der anschwellende Warenstrom einer globalisierten Wirtschaft ihren Ausdruck. Und die meisten Szenarien gehen davon aus, dass dies auch so weitergeht. Immer mehr Single-Haushalte haben Autos, mit denen sie lange Wegstrecken zurücklegen. Immer mehr Familien werden durch hohe Grundstückspreise aus den Kernstädten getrieben und nehmen große Pendeldistanzen auf sich. Die Suburbanisierung schreitet voran,

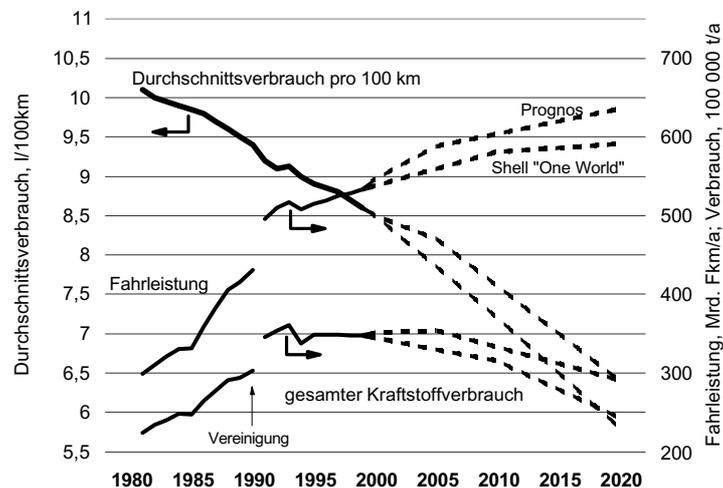


Abbildung 4.1: Der Durchschnittsverbrauch der PKWs in Deutschland sinkt, die Fahrleistungen – also die gefahrenen Kilometer – steigen: Insgesamt stagniert daher der Kraftstoffverbrauch, zukünftig könnte er nach verschiedenen Prognosen auch leicht sinken.

die Supermärkte ziehen auf die grüne Wiese. Zugleich wird die Lagerhalle auf die Straße verlagert. Um Lagerkosten zu sparen, liefern LKWs auf die Minute genau, just in time, Güter bei den Firmen an. Zunehmend internationale Märkte treiben die Transportdistanzen von Rohstoffen oder Lieferteilen in die Höhe.

Diesen Wachstumstendenzen folgend stiegen in der Vergangenheit Kraftstoffverbrauch und verkehrsbedingte CO₂-Emissionen ebenfalls kräftig. Fast ein Viertel der gesamten CO₂-Emissionen verursacht der Verkehr. Dabei sinkt der Durchschnittsverbrauch der deutschen PKW-Flotte: Er lag 1980 noch bei über 10 Liter pro 100 Kilometer. Heute sind es 8,5 Liter pro 100 Kilometer (Abbildung 4.1). Allerdings kauften die Deutschen schwerere Autos mit mehr Leistung unter der Kühlerhaube. Dadurch wurde ein großer Teil der möglichen Energieeinsparungen kompensiert.

Immerhin stagniert der Kraftstoffverbrauch der PKWs seit etwa 1995. In den Jahren 2000 und 2001 ist der Verbrauch an Benzin und Diesel sogar erstmalig etwas zurückgegangen. Nicht zuletzt die weiterhin steigenden Güterverkehrstransporte werden es zukünftig jedoch weiterhin schwierig machen, die CO₂-Kurve des Verkehrs nach unten zu biegen. Der Transportsektor wird in vielen Ländern der einzige Bereich sein, der von deutlich steigenden CO₂-Emissionen geprägt ist. Der Verkehr wird somit zum Prüfstein für die Einhaltung der in Kyoto verabredeten Klimaschutzziele werden.

Ganz anders sieht es bei den Luftschadstoffen aus. Stiegen diese bis etwa 1990 noch stetig an, so sind sie seither infolge verschärfter Abgasvorschriften, neuer Motor- und Abgastechnologien und saubererer Kraftstoffe deutlich zurückgegangen. Die weitere Absenkung der Abgasgrenzwerte – ab 2005 sind in Europa beispielsweise die Euro-4-Grenzwerte verpflichtend – werden zu einer weiteren Verminderung dieser Emissionen in den nächsten zwei Jahrzehnten auf etwa ein Zehntel ihrer Spitzenwerte von Anfang der Neunzigerjahre führen.

4.2 Die mobilen Anwendungen

Um dem Klima- und Ressourcenproblem beizukommen, braucht der Verkehrsbereich also vor allem effiziente Antriebe mit niedrigem Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß. Doch das heutige Auto ist das genaue Gegenteil dessen.

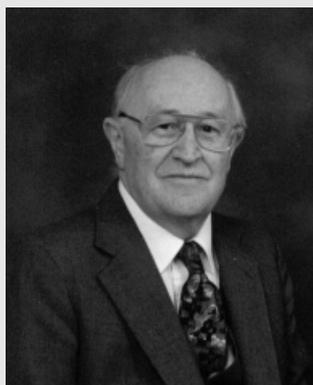
Viele Autohersteller sehen in der Brennstoffzelle den technischen Hoffnungsschimmer für diesen Problembereich. Sie wollen dem Verbrennungsmotor den Garaus machen und setzen auf das Elektroauto mit einer Brennstoffzelle als



Abbildung 4.2: Ein Hauch von Nostalgie: das erste Brennstoffzellen-Auto auf öffentlichen Straßen.

Stromquelle. Bereits 1959 wurde ein Traktor mit Brennstoffzellen ausgerüstet. In den Sechzigerjahren wurde ein General-Motors-Lieferwagen umgerüstet. 1970 stellte Karl Kordesch einen Austin A-40 auf Brennstoffzellen um. Die sechs Kilowatt brachten das Auto zwar nur auf 45 Stundenkilometer, aber das erste fahrbereite Brennstoffzellen-Auto auf öffentlichen Straßen war geschaffen. Das Schild „Smoking in the car not allowed“ im Fahrzeuginneren war eine Auflage der Behörden für die Fahrerlaubnis des Autos.

Karl Kordesch entwickelt seit Jahrzehnten Batterie- und Brennstoffzellen-Anwendungen. Nach vielen Jahren in Amerika, vor allem bei der Firma Union Carbide Corporation (UCC), war er anschließend Professor an der Technischen Universität Graz. Schon in den Sechzigerjahren baute er Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf der Basis alkalischer Brennstoffzellen.



Herr Kordesch, woher rührt Ihre Begeisterung für Brennstoffzellen?

Meine Begeisterung für Brennstoffzellen entwickelte sich über Luftsauerstoffzellen, die ich schon als frisch gebackener Doktor phil. an der Universität Wien 1948 baute. Geholfen hat mir damals der Ingenieur Adolf Marko, der als Elektroniker an der Universitätsklinik Gehirnenzephalographen entwickelte und unbedingt bessere Batterien brauchte. Als ich dann 1953, als Österreich noch keinen Staatsvertrag hatte, in die USA zum Signal Corps nach New Jersey eingeladen wurde, nahm ich zwei meiner Mitarbeiter mit. Nach zwei Jahren übersiedelte ich dann 1955 zu der Union Car-

bide Corporation (UCC) in das neue Forschungslabor in Parma, Ohio. Dort leitete ich schließlich zwei Forschungsgruppen, eine arbeitete an den neu entwickelten alkalischen Braunsteinbatterien, die andere Gruppe an verschiedenen Brennstoffzellen, vorwiegend aber alkalischen Typen.

Das Arbeitsklima war ausgezeichnet, die Arbeit ein Vergnügen. Ich hatte nach einigen Jahren große Freiheit in der Forschung und Entwicklung meiner Ideen. Viele Patente entstanden in den 22 Jahren bei UCC. Für jedes Patent bekam ich zuerst einen Dollar, dann wurde der Betrag auf zwei Dollar erhöht.

Wie kamen Sie auf die Idee, in Brennstoffzellen einen Baustein für einen zukünftigen Antrieb zu sehen?

Wir produzierten für die US Navy und später für Ford größere alkalische Brennstoffzellen. Für General Motors rüsteten wir ab 1965 den GM ELECTROVAN mit einer 160-Kilowatt-Wasserstoff-Sauerstoff-Anlage aus. Einer technischen Entwicklungsgruppe gelang es, die nötigen Brennstoffzellen in Handarbeit herzustellen, eine zweite Ersatzeinheit wurde sogar in zwei Sommermonaten hergestellt, um das damalige Herbstmodell damit auszurüsten. Der Preis der Anlage wurde nie genau bekannt gegeben, aber wir schätzten sie auf etwa 8 Millionen Dollar. Das war damals sehr viel Geld.

Auch zu der Zeit waren die Autohersteller also „freigebig“. Es war aber nicht verwunderlich, dass die Manager von General Motors aufatmeten, als damit bewiesen wurde, dass zwar die Brennstoffzellen-Technologie funktionierte, aber nicht marktbereit war.

Wie haben Sie damals den Austin gebaut? Gab es Schwierigkeiten?

Ich habe schon gesagt, dass ich bei UCC große Freiheiten hatte. Deshalb entschloss ich mich, selbst ein Auto mit einer Brennstoffzellen-Anlage auszurüsten. Eigentlich wollte ich Ammoniak als Energieträger verwenden, ein leicht verflüssigbares Gas unter geringem Druck, allgemein verfügbar, nicht explosiv. Leider waren aber damals nur kleine Ammoniak-Cracker verfügbar, so blieb ich beim Wasserstoff in Stahlflaschen.

Das Fahrzeug, ein Austin A-40, Baujahr 1965, konnte ich von einem Nachbarn, der den Motor wegen Öl-mangel ruinierte, in sehr gutem Zustand billigst kaufen. Die 6-Kilowatt-90-Volt-Brennstoffzelle wurde von meiner Assistentin Marge Macechko mithilfe der Elektroden, die vom Electrovon übrig geblieben waren, gebaut. Die Zubehöraggregate wurden in der UCC-Werkstätte nach meinen Zeichnungen kostenlos hergestellt. Der eigentliche Umbau des Austin A-40 erfolgte in meiner Garage in meiner Freizeit.

Zuerst war es etwa ein Jahr lang als reines Bleibatteriefahrzeug zugelassen und auch als Familienfahrzeug in Verwendung. Dann erfolgten der Einbau der Brennstoffzellen-Anlage im Kofferraum und das Montieren der Wasserstoffzylinder am Dach. Der Wagen konnte immer noch vier Personen und unseren Hund Coco befördern. Einen Kofferraum gab es aber leider keinen mehr.

War das Fahrzeug denn richtig einsatzfähig?

Eine Begrenzung war durch die Versorgung mit Wasserstoff gegeben. Auf Reisen, z. B. bei Fahrten zu Tagungen oder Ausstellungen, wurde der Wagen an unser Auto angehängt. Da die Kombination mit der Bleibatterie auch jeden Kaltstart und jede Bergfahrt ermöglichte, war kein Unterschied im Vergleich zu dem früheren Batteriefahrzeug bemerkbar, aber die Fahrstrecke zwischen den Tankfüllungen war etwa sechsmal länger (300 statt 50 Kilometer).

Manchmal waren die Bleibatterien durch zu hohen Stromverbrauch tief-entladen. Dann wurde eine Kaffeepause eingelegt, um eine schädliche Zellenumkehr in der Bleibatterie zu vermeiden. Die Brennstoffzellen luden die Batterien in kurzer Zeit wieder auf die durchschnittliche Kapazität auf.

Sie haben auch ein Motorrad gebaut ...

Ja, das Motorrad wurde mit einer 1-Kilowatt-Hydrazin-Luft-Brennstoffzelle parallel mit einer Ni-Cd-Batterie betrieben. [Hydrazin, N_2H_4 , wird der Kalilauge in der AFC zugefügt und bildet an der katalytischen Oberfläche der Elektrode Wasserstoff und Stickstoff.] Die Fahrstrecke mit einem Liter Hydrazin betrug ungefähr 100 Kilometer. In Ohio war es mit einem normalen Kennzeichen lizenziert,

und ich fuhr damit oft ins Labor und auch zu Ausstellungen.

Hydrazin wurde aber dann als schädlich für die Gesundheit erklärt und damit musste auch die Weiterarbeit daran eingestellt werden. Das Motorrad habe ich nach Graz mitgenommen. Dort haben noch Studenten Lehr-Rundfahrten damit durchgeführt. Jetzt steht es als Ausstellungsstück herum und wird wahrscheinlich einmal in einem Museum enden.

Sie haben bereits in den Sechzigerjahren die ersten Brennstoffzellen-Fahrzeuge vorgestellt. Wie reagierte die Öffentlichkeit? Wurden Sie damals als Pionier oder als wissenschaftlicher „Exot“ gesehen?

Die Öffentlichkeit war nicht beeindruckt. Bei einer Autoausstellung in Cleveland bekam ich den ersten Preis wegen der seltsamen Idee, rote Zylinder auf dem Dach mitzuführen. Ich triumphierte über die chromblitzenden Konkurrenten. Die Brennstoffzellen selber wurden nicht sehr beachtet. In Ohio gab es den Ohio Electric Automobile Club. Einige Zeit war ich Präsident. Die Mitglieder hatten alle Bleibatterie-Fahrzeuge. Der Austin A-40 wurde oft gebührend bestaunt, aber weil er nicht zu kaufen war, hielt sich das Interesse in Grenzen. Viel Interesse fand ich bei Vorträgen in Schulen, bei Lehrern und einmal bei den „Girl Scouts“, die ich im Lager besuchte, denn meine Frau war eine begeisterte Pfadfinderführerin.

In den Siebzigerjahren kehrten Sie nach Österreich ...

Ja, 1977 ging ich mit 55 Jahren bei UCC in Pension. Zu dieser Zeit war ein Tiefstand in der Hochtechnologie eingetreten. Die NASA musste sparen, man entließ viele Physiker, die als Astrophysiker in der Weltraumforschung tätig waren. Die Apollo-Mondfahrt-Hochstimmung war verflogen.

Brennstoffzellen- und Batterietechnologie war nicht mehr sehr gefragt. UCC entließ keine Wissenschaftler, bot aber die Frühpension an. Für mich war es die Gelegenheit, rechtzeitig nach Österreich zurückzukehren. Ich nahm einen Ruf nach Graz an. Bedingung war, dass man noch 15 Jahre

dem Staat dienen konnte, bis man mit 70 Jahren das Pensionsalter erreichte. Die österreichische Staatsbürgerschaft erhielt ich bei der Berufung zurück, die amerikanische konnte ich behalten.

Welche Bedeutung messen Sie der Brennstoffzelle heute im Verkehr zu?

Meine Ansicht über die zukünftige Rolle der Brennstoffzellen im Verkehr ist sehr positiv, aber die Frage ist die Wirtschaftlichkeit. Solange die Preise des gegenwärtigen Verbrennungsmotors mit einem Faktor von vielleicht zwei oder drei nicht erreicht werden können, sind die Chancen fast null.

Der alkalischen Brennstoffzelle sage ich eine Wiederbelebung voraus. Sie kann mit zirkulierendem Elektrolyten jederzeit völlig abgeschaltet und wieder schnell angeschaltet werden. Wie ein Automobil. In der Kombination mit einer aufladbaren Batterie ist ein fast ideales System gegeben.

Dem Brennstoff steht auch noch eine Auslese bevor. Flüssiger Wasserstoff ist nicht als Ziel anzustreben. Meiner Meinung nach hat Ammoniak ausgezeichnete Chancen. Ammoniak ist ein Weltprodukt, unentbehrlich für die Landwirtschaft, kann leicht in Wasserstoff umgesetzt werden. Der Geruch ist vorteilhaft als Warnung bei einem undichten Gerät. Vergiftungen sind völlig reversibel. Dies ist ein wichtiger Unterschied zu Methanol.

Das hängt natürlich auch von den künftigen Ölpreisen ab. Die Verwirklichung der Brennstoffzellen-Träume für Automobile könnte sich um einige Jahrzehnte hinausschieben.

In der Zwischenzeit werden solche Autos nicht mehr privat von enthusiastischen Professoren gebaut, sondern von internationalen Multikonzernen. Nahezu alle namhaften Autofirmen sind dabei, Personenkraftwagen auf Brennstoffzellen-Basis zu entwerfen. Um deren Entwicklung voranzubringen, fallen sogar die Grenzen der Unternehmen. War früher der so genannte Erlkönig der Konzerne, also die erste Version eines neu entwickelten Fahrzeugs, ein streng gehütetes Geheimnis, kooperieren sie nun, um die anspruchsvolle und teure Forschung und Entwicklung innovativer Antriebe zu schultern. Dabei suchen sich die meisten Hersteller „strategische Allianzen“. Ein Stack-Hersteller, ein oder mehrere Automobilfirmen und verschiedene Zulieferer schließen sich zusammen und bearbeiten arbeitsteilig die Fortentwicklung.

Besonders auffällig ist die Allianz der beiden Autogiganten Ford und DaimlerChrysler mit Ballard. Durch geschickte Arbeitsteilung und einige Subfirmen pushen diese Konzerne den neuen Antrieb mit großer Energie. Um die komplizierten Schnittstellen zwischen den eigentlichen Brennstoffzellen und dem Gesamtsystem besser in den Griff zu bekommen, haben sie ihr kompliziertes Firmengeflecht kürzlich neu sortiert und dabei auch Stellen abgebaut. Nun stellt die kanadische Firma Ballard nicht nur die Brennstoffzelle bereit, sondern auch den Rest des Antriebs. Dafür sitzen die Autokonzerne im Aufsichtsrat und kontrollieren einen Großteil der Aktien. Andere Autofirmen wie Opel/General Motors oder Honda haben sogar den Ehrgeiz, eigene Brennstoffzellen-Stacks zu entwickeln und zu bauen.

Doch die hoch gespannten Erwartungen der ersten Jahre weichen allmählich einer realistischeren Einschätzung. Die Ankündigung von DaimlerChrysler – damals noch Daimler-Benz –, bis zum Jahr 2004 die Serienfertigung von Brennstoffzellen zu realisieren, sorgte vor einigen Jahren für Aufruhr. Alle ehrgeizigen Firmen verkündeten in der Folge, Ähnliches vorzuhaben. Doch nach und nach stecken die Konzerne zurück und verwässern ihre Zeitmarken. Jetzt heißt es bei vielen Firmen, der Beginn von Vermarktung und Verkauf beginne im Jahr 2010. Volkswagen spricht sogar von 2020 als realistischem Eintrittstermin für Wasserstoff-Fahrzeuge.

Auch Shell hat seine Prognosen modifiziert. Sagte der Mineralölkonzern noch in einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2000 im innovationsfreudigen Szenario 20 Prozent alternative Antriebe am Bestand des Jahres 2020 voraus – das bedeutet, dass jedes zweite neu zugelassene Auto im Jahr 2020 ein Brennstoffzellen-Auto sein sollte –, so senkte er diesen Wert nur ein Jahr später auf die Hälfte. „Der Brennstoffzellen-Antrieb mit seinen unbestrittenen Vorzügen hinsichtlich des Wirkungsgrades und lokaler Emissionen dürfte den Verbrennungsmotor zunächst allerdings nur ergänzen“, heißt es in der Studie „Mehr Autos, weniger Verkehr“ ernüchtert. Im zweiten, pessimistischeren Szenario erreichen die elektrochemischen Autos sogar nur drei Prozent. „Otto- und Dieselmotoren, in denen Shell noch ein erhebliches Optimierungspotenzial sieht, bleiben also für lange Zeit die Nr. 1 im Straßenverkehr“, resümiert Shell.

Auf dem Boden, im Wasser, in der Luft

Während die Markteinschätzungen nach einer ersten Euphorie sehr vorsichtig werden, verlaufen die technischen Entwicklungen dennoch so rasant, dass ihre Schilderung immer nur hinterherhinken kann. Aktuelle Internetseiten sind hier die zeitnaheste Informationsquelle (Kapitel 8). Interessant ist in jedem Fall, dass die meisten Automobilhersteller bereits mehrere Generationen von PKWs vorgestellt haben. Den Necar aus dem Hause Daimler gibt es beispielsweise bereits in fünfter Generation. Waren die beiden ersten Necars noch schwerfäll-



Abbildung 4.3: Der Nekar 5: bislang letztes Fahrzeug einer Serie von Brennstoffzellen-Autos aus dem Hause DaimlerChrysler.

lige Autos mit reduzierter Nutzfläche, so gelang es den schwäbischen Ingenieuren bei Nekar 4 und Nekar 5, Wasserstoff- bzw. Methanolantrieb in die berühmte A-Klasse zu integrieren. Mittlerweile ist die Miniaturisierung so weit vorangeschritten, dass die Systeme größtenteils in den Zwischenboden der Fahrzeugkarosserien passen. Das ist eine enorme ingenieurtechnische Leistung, die nur durch Basteln, Optimieren, Simulieren und viel Versuch und Irrtum zum Ziel geführt hat.

Opel und General Motors testen ihre Fahrzeuge schon unter extremsten Bedingungen. In den Wüsten Arizonas fuhren Tester den Wagen bei 43 °C Tagestemperatur. Der Zafira ist viel herumgekommen in der Welt. Olympiade in Sydney, Beijing, Brüssel, Sacramento: Noch ist jeder Auftritt des Brennstoffzellen-Autos ein Presseereignis. 120 Kilowatt Spitzenleistung, 80 Kilowatt Dauerlast bringt der HydroGen 1, ein auf Wasserstoff umgerüsteter Zafira. Den ein Meter langen Flüssigwasserstoff-Speicher haben die Autobauer unter dem Rücksitz versteckt. 16 Sekunden von Null auf Hundert – das ist angesichts des schweren Pilotfahrzeugs schon ganz beachtlich.

Bis jetzt ist der Zafira ein Einzelstück. Kostenpunkt: eine Million Euro. Aber unzählige Techniker in Mainz und im amerikanischen Rochester arbeiten fieberhaft daran, dass ein solches Auto eines Tages vom Band laufen kann. HydroGen 2 ist startklar, HydroGen 3 zumindest angedacht.

Jack Smith, Vorstand von General Motors, rechtfertigt die enormen Summen, die der Konzern in die neue Technologie investiert. Kein Autokonzern werde überleben, der nur auf den Verbrennungsmotor setzt, meint Smith. Opel und der Mutterkonzern General Motors favorisieren zwar letztendlich Wasserstoff als Kraftstoff. Aber parallel entwickeln sie auch Benzin-Reformer, die



Abbildung 4.4: Nach dem Praxistest: ein stolzes Männerteam vor „seinem“ Hydro Gen 1.

den altbekannten Kraftstoff in Wasserstoff umwandeln. Im September 2001 stellte General Motors den weltweit ersten Pickup-Truck mit Benzin-Brennstoffzellen-Antrieb vor. Der passte auf die halbe Ladefläche des Fahrzeugs.

Alter Kraftstoff, neuer Antrieb: Die Benzinreformierung

Das wäre doch ideal: Solange es keine Wasserstoffinfrastruktur gibt, betanken wir unsere Brennstoffzellen-Fahrzeuge mit Benzin und wandeln diesen im Auto in Wasserstoff um. Allerdings ist die Reformierung von Benzin außerordentlich anspruchsvoll. Denn die Verbindung zwischen Kohlenstoffatomen lässt sich wesentlich schwerer aufbrechen als die Bindung der OH-Gruppe an das Kohlenstoffatom bei Methanol ($\text{CH}_3\text{-OH}$). Im Klartext heißt das: Die Temperaturen des Reformers müssen höher sein (über 800°C im Vergleich zu 300°C bei Methanol). Auch der Wirkungsgrad ist um einige Prozentpunkte schlechter als der eines Methanolreformers. Wenn man die aufwändige Herstellung eines solchen Fahrzeugs berücksichtigt, schneidet ein solches Auto in der Gesamt- CO_2 -Bilanz nicht unbedingt besser ab als ein moderner Ottomotor. Und die Ingenieure kämpfen noch mit weiteren Problemen, z. B. der Bildung feiner Rußpartikel und dem Kaltstart.

Auch Toyota verfolgt eine Doppelstrategie, wenn es um die Auswahl des Kraftstoffes geht. Der FCHV-4, ein im Jahr 2001 vorgestelltes Fahrzeug mit

vier Wasserstoff-Drucktanks, soll schon ab 2003 zu kaufen sein – wenn man dafür 90.000 Euro bezahlt. Eine Reichweite von 250 Kilometern hat das Auto und eine große Speicherbatterie mit Bremsenergieerückspeisung. Der größere Bruder des Fahrzeugs mit dem Namen FCHV-5 setzt anstelle des Drucktanks für Wasserstoff auf einen Reformer für Kohlenwasserstoffe. Zwar kann der Reformer das Benzin von heute nicht bewältigen, wohl aber veredelte und gesäuberte Benzinvarianten oder synthetisch aus Kohle oder Erdgas hergestellte Kraftstoffe.

Das Vehikel aus dem Haus Honda heißt ganz ähnlich. Mit 140 km/h Spitzengeschwindigkeit, einer Reichweite von 300 Kilometern und einem in den Fahrzeugboden integrierten Wasserstofftank macht sich auch der FCX-V4 schon ganz gut. Fiat und Peugeot, Volkswagen und Mazda, Renault und Nissan bauen ebenfalls Brennstoffzellen in ihre PKWs ein.

Brennstoffzellen können aber durchaus nicht nur im Personenkraftwagen eingesetzt werden. Im Gegenteil, die ersten Anwendungen wird es im Bereich der Flottenfahrzeuge und Busse geben. Denn im Busbetrieb ist der Einsatz von Wasserstoff wesentlich einfacher. Vor allem ist mehr Platz auf dem Dach für Wasserstoffspeicher verfügbar. Zudem ist die tägliche Fahrstrecke von Bussen begrenzt; bei Spritmangel kann der Bus zum Depot zurückkehren. Der Einsatz von Brennstoffzellen ist nicht nur einfacher, sondern auch attraktiver. Denn gerade in den städtischen Ballungsräumen, die oft von Abgaslawinen und Verkehrslärm besonders geplagt sind, sind schadstofffreie, leisere Nahverkehrssysteme gefordert.

Brennstoffzellen-Busse fahren daher schon mancherorts. Die erste Busgeneration hat bereits mehr oder weniger erfolgreich ihre Testversuche in Chicago und Vancouver hinter sich gebracht. DaimlerChrysler und das Tochterunternehmen EvoBus beabsichtigen, bis 2003 in Europa 30 ihrer Citaro-Busse auf Brennstoffzellen umzurüsten und in die Erprobung zu schicken. Ab Ende 2002 sollen diese ersten kommerziellen Busse in acht europäischen Städten operieren. In Kalifornien sollen immerhin 20 Busse gekauft werden, für 1,2 Millionen amerikanische Dollar pro Bus. Die Busbauer MAN, Scania und Neoplan begeben sich mit eigenen Entwicklungen ins Rennen. Von Stuttgart bis Reykjavik, von Perth in Australien bis Porto: Alle wollen solche sauberen Busse haben.

Auch einige Entwicklungsländer möchten von diesen neuen Technologien profitieren. Gerade in den luftbelasteten Mega-Citys ist der Zustand der Busflotte oftmals desolat. Zugleich spielen Busse in vielen dieser Länder eine ungleich größere Rolle als der Individualverkehr, weil sich die meisten Bewohner kein Auto leisten können. Die Global Environment Facility, eine Organisation der Vereinten Nationen, die den Einsatz sauberer Technologien in Entwicklungsländern fördert, wird die Einführung von Brennstoffzellen in fünf Nationen unterstützen. Brasilien, Mexiko, China, Indien und Ägypten können mit

einer Unterstützung von 60 Millionen Dollar rechnen. Damit sollen die Mehrkosten von einigen Dutzend Brennstoffzellen-Bussen zum Teil übernommen werden.

In Entwicklungsländern ist das Problem der Kosten allerdings ein weitaus drängenderes als hierzulande. Noch sind Brennstoffzellen-Busse 20-mal teurer als ein Dieselbus. Dabei scheiterte selbst der Einsatz von Gasbussen in vielen Ländern so manches Mal am Geld. Die kostengünstigste und zugleich wirkungsvolle Option zur Verbesserung der Luftqualität ist dort die nachträgliche Ausstattung der Dieselbusse mit Filtern.

„Die Erfindung des Jahres 2001“ nannte das *Time Magazin* ein Brennstoffzellen-Bike des italienischen Motorroller-Fabrikanten Aprilia mit einer Brennstoffzelle von Manhattan Scientific. Immerhin 30 km/h rollt das elektrische Fahrrad, dessen Brennstoffzelle nicht einmal ein Kilogramm wiegt. Ab 2003 soll es für 2300 US-Dollar verkauft werden. „Wir denken an die 100 Millionen motorisierten Zweiräder weltweit“, sagt Jack Harrod, Chef von Manhattan Scientific. Allein in China wurden in einem Jahr zehn Millionen Motorroller verkauft. „Vor allem in den überfüllten Städten Asiens könnten Brennstoffzellen-Roller einen bedeutenden Beitrag zum Umweltschutz leisten.“ Die Firma entwickelt daher auch einen leistungsstärkeren Roller mit 50 km/h Höchstgeschwindigkeit und einer 3-Kilowatt-Brennstoffzelle, die vom deutschen Ableger NovArs GmbH produziert wird.

Der Brennstoffzellen-Boom macht jedoch nicht bei den Bodenfahrzeugen Halt. Eine Leipziger Firma beispielsweise hat ein Boot gebaut. Gemächlich schippert „Hydra“ auf Gewässern in Deutschland und befördert bis zu zwanzig Ausflügler. Vor allem in ökologisch sensiblen Gewässern ist der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff durchaus sinnvoll. Auf dem Königssee bei Berchtesgaden beispielsweise ist lediglich der Einsatz von Elektrobooten erlaubt. Hier haben Brennstoffzellen ihren Platz.

Nicht auf See, sondern unter See möchten sich die Erbauer des Tauchfahrzeuges „Deep C“ mittels Brennstoffzellen bewegen. Dank der elektrochemischen Zellen soll es 60 Stunden lang unabhängig vom Mutterschiff operieren können. Auf der Suche nach guten Einsatzfeldern für Brennstoffzellen im Transportsektor denken andere an Minenlokomotiven. Denn im Bergbau lässt man es sich etwas kosten, wenn auf die offene Flamme und die Auspuffgase einer Diesellokomotive verzichtet werden kann.

Der Einsatz in Lastwagen oder im normalen Schienenverkehr hingegen scheint nicht so attraktiv zu sein. Dies liegt vor allem an den Fahrzyklen einer Lokomotive oder eines LKWs. Lokomotiven bringen den Zug voll in Fahrt und schalten dann ab, weil sie den Zug rollen lassen. Das heißt, dass eine Brennstoffzelle im Zugverkehr vor allem in Volllast und in „Null“last betrieben würde. Lastwagen fahren meist mit hoher Geschwindigkeit auf der Autobahn. Auch sie fordern den Antrieb bei maximaler Leistung. Da die Brenn-



Abbildung 4.5: Die „Hydra“ schippert mit einer alkalischen Brennstoffzelle über einen See in Bonn.

stoffzelle ihre Wirkungsgradvorteile vor allem in Teillast entfaltet, ist die Kraftstoffersparnis gar nicht so groß. Schwere Nutzfahrzeuge seien daher die „letzte Bastion“, die Brennstoffzellen stürmen müssen, meint Ferdinand Panik, Leiter des Projekthauses Brennstoffzelle bei DaimlerChrysler.

Auch in die Luft streben einige Unternehmen. Schon seit längerem wird an Wasserstoffflugzeugen gearbeitet. Dabei stehen Flugzeuge mit Gasturbinen im Vordergrund. Die Entwicklung elektrischer Flugzeuge, auch mit Brennstoffzellen, hinkt dem hinterher. Im Juli 2001 wurde das erste Konzept für ein kleines Maschinchen vorgestellt. Die Karosserie des Flugkörpers besteht aus Kohlenstoff und wiegt lediglich so viel wie zwei Erwachsene. Der Erfinder und Direktor der „Foundation for Advancing Science and Technology Education“, James P. Dunn, hat Erfahrung in der Fortentwicklung von elektrischen Speichersystemen. Er gilt als einer der Väter des Laptops. Sein „E-Plane“ soll 2002 zunächst mit Lithium-Ionen-Batterien ausgestattet werden. Doch Dunns Ehrgeiz ist es, zum 100. Jubiläum der Erfindung des Flugzeugs durch die Brüder Wright eine Wasserstoff-Brennstoffzelle einzubauen und dadurch die Reichweite des Flugzeugs auf 800 Kilometer zu erhöhen. 2003 müsste er dann fertig sein.

„Wenn ich anderen erzähle, dass ich ein elektrisches Flugzeug baue, fragen sie zuerst: Wie lang ist denn das Kabel?“, erzählt Dunn. Für die Testfahrten hat Dunn Prominenz organisiert, unter anderem Kunstflieger und einen ehemaligen Space-Shuttle-Astronauten.

Die Elektrifizierung des Autos

Ein großer deutscher Autobauer fällt hinsichtlich der Euphorie für die Brennstoffzelle ein wenig aus der Reihe. Die Bayerischen Motorenwerke sind zwar von Wasserstoff begeistert, doch sie wollen ihn nicht in der Brennstoffzelle verstromen, sondern in einem ganz normalen Verbrennungsmotor verbrennen. Und sieht man mal von kleineren Problemen ab, schluckt ein Ottomotor den Wasserstoff auch ganz gerne.

Viele wundern sich: die aufwändige Wasserstoffherstellung, eine Umstellung einer ganzen Infrastruktur mit Tausenden von Tankstellen, nur damit am Ende der Kette wieder der gute alte Ottomotor mit Energie gefüttert wird? Sicherlich hat das BMW-Konzept dennoch seine Berechtigung, denn Wasserstoff führt auch im Verbrennungsmotor zu deutlich geringeren Emissionen als Benzin oder Diesel. Außerdem legt BMW Wert auf die regenerative Herkunft des Wasserstoffs. Nur dann ist der Einsatz dieses Kraftstoffs sinnvoll. Und nicht zuletzt ist auch die Herstellung eines solchen Fahrzeuges mit geringeren Umwelteinwirkungen verbunden.

Aber auch BMW verschließt sich der Brennstoffzelle nicht ganz. Sie entwickelt, gemeinsam mit Delphi Automotives, eine Festoxid-Brennstoffzelle. Diese soll nicht etwa die Räder zum Rollen bringen. Vielmehr dient sie zur Speisung des elektrischen Bordnetzes. Die Brennstoffzelle soll also nicht den Motor, sondern die Batterie ersetzen. Mit fünf Kilowatt kann sie genug Power für Standheizung, Klimatisierung, Beleuchtung und all die anderen technischen Feinheiten einer Oberklasse-Limousine bereitstellen.

Ob wir es begrüßen oder nicht, der Trend geht zu dem immer stärker elektrisierten Auto. Viele Dutzend Elektromotoren, in manchen Fahrzeugen über hundert, nehmen uns auch noch die kleinste körperliche Anstrengung beim Autofahren ab. „Die Lichtmaschinenleistung ist in den vergangenen 30 Jahren um 30 Prozent angestiegen, die Batterieleistungen gar um 200 Prozent“, erklärt BMW-Vorstand Burkhard Goeschel. Angesichts einer Vielzahl elektrischer Anwendungen im Auto – Wasserpumpen, elektrisch unterstützte Lenkungen oder Bremsen, aber auch elektrisch geheizte Katalysatoren – erwartet er eine Verdopplung des Stromverbrauchs im Fahrzeug. „Mit der Brennstoffzelle sind wir doppelt so effizient wie das heutige System Motor/Lichtmaschine/Batterie.“ Die besondere Herausforderung: BMW will Diesel und Benzin direkt in der Brennstoffzelle in Wasserstoff umwandeln. Bis zum Jahr 2006 will BMW das System so weit entwickelt haben, dass es reif ist für den Serieneinsatz. Bis dahin ist allerdings noch viel zu tun. Die Reformierung – die Umwandlung des Kraftstoffs in Wasserstoff – funktioniert noch nicht zufrieden stellend, und vor allem wiegt der Batterieersatz immer noch satte 100 Kilogramm.

Viele Umweltschützer sehen diese Anwendung kritisch, da sie das Ziel in der Bekämpfung der Ausstattungsspirale sehen, die das Gewicht und den



Abbildung 4.6: Hier hat die Brennstoffzelle bei BMW ihren Platz: als Stromlieferant für Klimaanlage, Beleuchtung und andere elektrische Verbraucher.

Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge in die Höhe treibt. Eine Brennstoffzelle macht es hingegen noch leichter, luxuriöse elektrische Geräte zu integrieren. BMW hingegen vertritt die Meinung, dass diese Entscheidung von den Käuferinnen und Käufern der Autos zu treffen sei.

4.3 Emotion statt Emission: Die Brennstoffzelle, die Umwelt und die Kundschaft

Das Brennstoffzellen-Auto soll ein „grünes“ Auto werden. Umweltwirkungen haben die Befriedigung des Bedürfnisses der Menschen nach Mobilität zwar schon immer begleitet. Früher waren es allerdings andere Probleme. Das New York der vorletzten Jahrhundertwende machte sich Sorgen über die 1000 Tonnen Mist, die 300.000 Liter Urin und die zahlreichen Pferdekadaver. In den Siebziger- und Achtzigerjahren waren die Auspuffgase Gegenstand der umweltpolitischen Diskussion. Dieselpartikel und Treibhausgase prägten die automobilen Ökodiskussion des letzten Jahrzehnts.

Viele Umweltnachteile, die sonst mit dem Automobil assoziiert werden, vor allem der stinkende Auspuff, werden bei Brennstoffzellen-Autos passé sein. „Nur Wasser aus dem Auspuff“, das ist der Spruch der Autobranche. In zwei Aspekten kann die Brennstoffzelle ökologisch vor allem punkten: bei Emissionen und bei der Effizienz. Im Kern geht es um die Frage: Bieten Brennstoffzellen-Autos genug ökologische Vorteile, damit ein über Jahrzehnte etablierter Antrieb abgelöst und eine völlig neue Verkehrsinfrastruktur aufgebaut wird?

Eine These ist jedoch, dass es weniger die ökologischen Vorteile sein werden, die dem Brennstoffzellen-Auto zu einem Durchbruch verhelfen könnten.

Vielmehr könnten es ganz andere Vorteile sein, die sich als Zugpferde einer neuen Autogeneration entpuppen könnten.

Sprit sparen statt Benzin schlucken: Die Effizienz

Doch in der Werbung der Automobilkonzerne steht immer noch die Umwelt im Vordergrund. Nicht zu Unrecht. Denn der herkömmliche Verbrennungsmotor ist eine wahre Energieschleuder. Nur knapp ein Fünftel der Energie des Erdöls kommt an der Antriebswelle an, und davon wird der größte Teil zur Überwindung von Luft- und Rollwiderstand gebraucht (Abbildung 4.7). Das fängt an bei den Verlusten der Benzinherstellung und Verteilung. Von 100 Litern des schwarzen Goldes aus dem Bohrloch landen noch 87 Liter im Tank. Die Herstellung von Kraftstoffen aus Rohöl ist also vergleichsweise effizient.

Im Fahrzeug muss der Kraftstoff aber in Bewegungsenergie umgesetzt werden. Hier geht die meiste Energie verloren. Ein typischer Ottomotor hat einen Wirkungsgrad von 21 Prozent in einem mittleren Fahrstil, neuere Motoren von vielleicht 23 Prozent (Tabelle 4.1). Dieser Wirkungsgrad, der auch Tank-zu-Rad-Wirkungsgrad heißt, beschreibt, wie viel Prozent der Energie des Kraftstoffs im Tank als Bewegungsenergie genutzt werden. Von den 87 Litern der Energie des Rohöls im Tank (Abbildung 4.7) werden bei 23 Prozent Wirkungsgrad also nur 20 Liter in Antriebsenergie umgesetzt. Zwar schielen die Fahrzeugbauer auch hier auf höhere Werte, doch vor allem das schlechte Verhalten des Ottomotors bei niedrigen und mittleren Leistungen macht sich in den Verbrauchszahlen bemerkbar. Der Dieselmotor ist zwar etwas effizienter, aber auch bei ihm sind Wirkungsgrade von 27 Prozent eher die Ausnahme als die Regel.

Hinzu kommt, dass die heutigen Autos so stark motorisiert sind, so viele PS haben, dass die Motoren fast immer bei niedriger Leistung betrieben werden. In Teillast sind Verbrennungsmotoren aber ausgesprochen ineffizient. Der Trend zum starken Auto ist also nicht nur wegen des hohen Gewichts des Motors, sondern auch wegen des schlechteren Wirkungsgrades problematisch.

Wie sieht es beim Brennstoffzellen-Auto aus? Nehmen wir ein Auto mit Wasserstoff als Beispiel und fangen diesmal umgekehrt mit dem Antrieb an. Der große Vorteil des Brennstoffzellen-Autos ist der sehr gute Wirkungsgrad des Antriebs. Von den 61 Kubikmetern, die aus der Energie des Erdgases im Tank als Wasserstoff landen, werden 37 durch die Brennstoffzelle in Strom umgesetzt. Ein Wirkungsgrad von über 60 Prozent also.

Aber leider sind die Brennstoffzellen-Stapel nicht der gesamte Antrieb. Eine Reihe von kleinen Ventilatoren, Verdichtern, Ventilen und elektronischen Steuerungen sorgen dafür, dass alles ordnungsgemäß abläuft. Das Kühlwasser muss umgepumpt werden, der Gleichstrom in Wechselstrom umgewandelt werden. Außerdem hat der Elektromotor, der den Strom der Brennstoffzelle in Kraft an der Radwelle umsetzt, auch Verluste, selbst wenn die neuesten Gene-

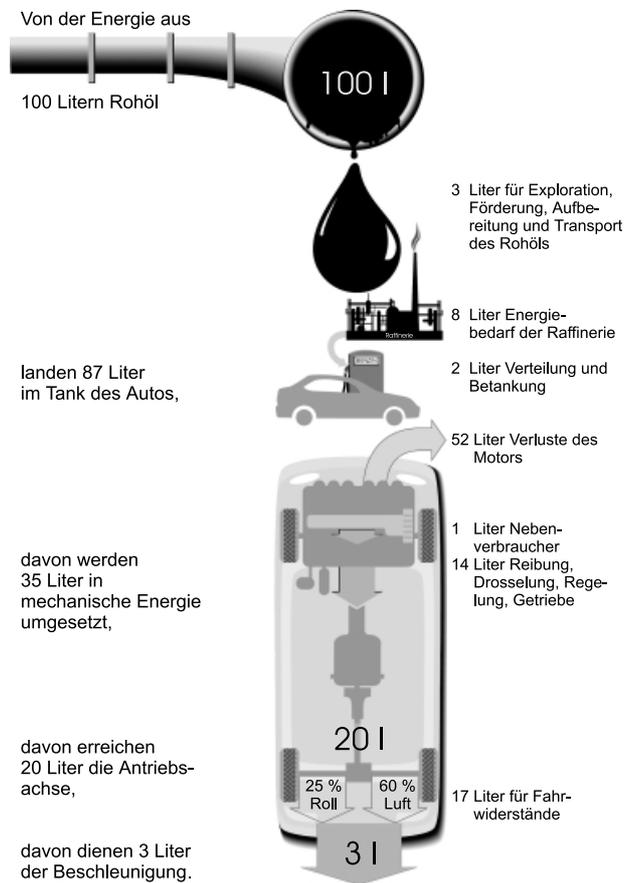


Abbildung 4.7: Die Energiebilanz eines Benzin-PKWs: Nur ein Fünftel der Energie des Erdöls kommt an der Antriebswelle an.

rationen von Motoren extrem effizient sind. Dieses ganze Drumherum hat einen Wirkungsgrad von ungefähr 65 Prozent. Also ist der Tank-zu-Rad-Wirkungsgrad 61 Prozent multipliziert mit 65 Prozent, d.h. circa 40 Prozent. Das ist dennoch fast doppelt so gut wie die 23 Prozent des Ottomotors.

Vergleicht man nicht die Wirkungsgrade, die nur beschreiben, wie effizient der Kraftstoff genutzt wird, sondern den Kraftstoffbedarf (Tabelle 4.1), so wird der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugkonzepten ein wenig verringert. Dies liegt daran, dass ein Brennstoffzellen-Auto mehr wiegt. Es braucht also mehr mechanische Leistung, mehr Kraft an der Welle, um in Bewegung gesetzt zu werden.

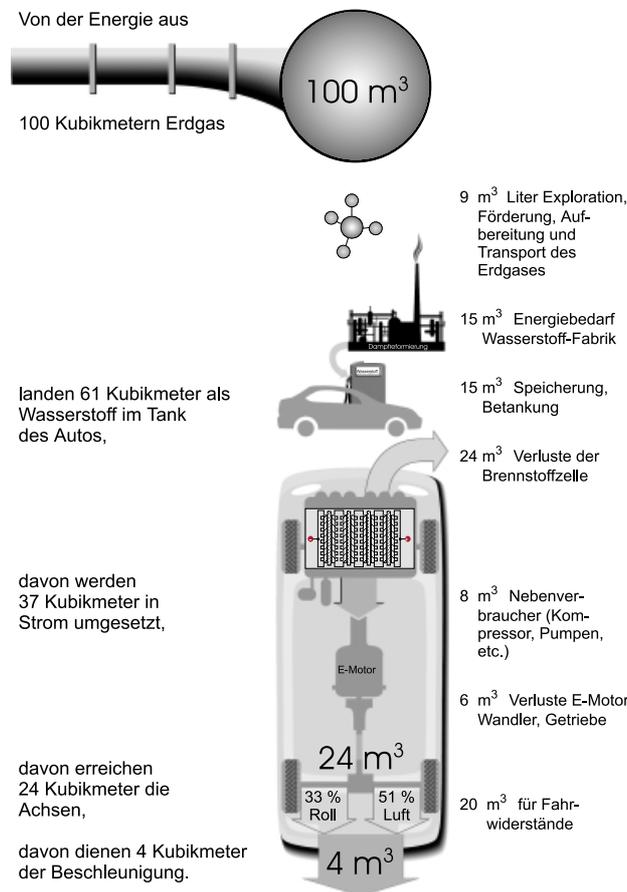


Abbildung 4.8. Die Energiebilanz eines Brennstoffzellen-PKW's am Beispiel eines Wasserstoffautos (Wasserstoff aus Erdgas): Der Antrieb ist viel effizienter, die Kraftstoffherstellung aber energieintensiver als beim Benzinauto.

In unserem Gesamtvergleich fehlt nun noch die Herstellung des Kraftstoffs. Solange die Produktion von Wasserstoff aus erneuerbaren Energieträgern noch auf sich warten lässt, wird Wasserstoff vor allem aus Erdgas gewonnen. Dieser Prozess ist leider nicht so effizient wie die Umwandlung von Rohöl in Benzin. Von der Energie aus 100 Kubikmetern Erdgas kommen nur noch 76 als Wasserstoff aus der Fabrik. Weitere 15 werden für die Speicherung und Betankung verbraucht. Summa summarum landen daher auch nur 24 Energieeinheiten an der Antriebswelle der Fahrzeuge.

Tabelle 4.1: Wirkungsgrade und Kraftstoffverbrauch im Neuen Europäischen Fahrzyklus plus Autobahnfahrt: Prognostizierte Werte für zukünftige Kompaktfahrzeuge (ohne Leichtbau)

Antrieb	Wirkungsgrad	Kraftstoffverbrauch (l Benzinäquivalente/100 km)
Ottomotor heute	21	6
Ottomotor zukünftig (Direkteinspritzer)	23	5
Dieselmotor heute	23	5,5
Dieselmotor (zukünftig)	26	4,5
Dieselmotor (Hybrid)	33	3,5
Brennstoffzellen-Fahrzeug (Wasserstoff)	40	3,1
Brennstoffzellen-Fahrzeug (Methanol)	33	3,9
Brennstoffzellen-Fahrzeug (Benzin)	30	4,8

Solange die Energie für Brennstoffzellen-Autos aus fossilen Energieträgern hergestellt werden muss, kann man damit also nicht viel Primärenergie einsparen.

Werden andere Kraftstoffe im Fahrzeug eingesetzt, so sinkt der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen-Autos weiter. Denn Methanol, Benzin oder was auch immer im Auto als Kraftstoff mitgeführt wird, müssen in Wasserstoff umgesetzt werden. Die Reformer machen einen Teil des wertvollen Wirkungsgradvorteils zunichte und bringen zusätzliches Gewicht mit sich. Ein Brennstoffzellen-Auto mit Methanol hat beispielsweise nur noch einen Wirkungsgrad von 33 Prozent in einem typischen Fahrzyklus. Damit schmilzt die Differenz zum heutigen Benziner. Besondere Konkurrenz erwächst den Brennstoffzellen-Autos auch durch die Hybridfahrzeuge, die einen Verbrennungsmotor mit einem Elektromotor kombinieren. Sie zeichnen sich durch sehr hohe Wirkungsgrade aus.

Zugleich muss man aber auch würdigen, dass der Kraftstoffbedarf von Verbrennungsmotoren im Verlauf von hundert Jahren in kleinen Schritten optimiert wurde. Spätestens seit den Siebzigerjahren und den bedrohlichen Ölkrisen waren die Fahrzeugbauer bemüht, durch Motorenoptimierung und andere technische Kniffs die Liter pro Kilometer runterzubringen. Große Fortschritte erlaubte vor allem die Entwicklung der Mikroelektronik. Kleine Chips schufen durch intelligente Motor-, Pumpen- und Düsensteuerung neue Möglichkeiten. So erst übersprang der Verbrennungsmotor die Marke von 20 Prozent Wirkungsgrad. Daher: Im Vergleich zu diesen kleinen Schritten erlauben Brennstoffzellen einen wirklichen „Quantensprung“ im Wettlauf um niedrige Verbrauchswerte.

Wasserdampf als Auspuffgas: Die Emissionen

Der zweite Vorteil: Das Nullemissionsauto rückt näher. Noch vor einem Jahrzehnt, vor der Einführung des Katalysatorautos, waren graue Auspuffwolken, gefüllt mit Stickoxiden, Partikeln, Kohlenmonoxid oder unverbrannten Kohlenwasserstoffen, gang und gäbe. Der Katalysator hat bereits drastisch Abhilfe geschaffen. Aber auch mit noch so guten Reinigungstechnologien wird der Verbrennungsmotor Emissionen nie ganz los werden.

Denn bei der Verbrennung des Kraftstoffes mit Luft wird bei den hohen Temperaturen im Brennraum immer auch ein Teil des Luftstickstoffs zu Stickoxiden verbrannt. Diese Stickoxide sind giftig, versauern Waldböden und Seen und sind für die Entstehung von Sommersmog entscheidend.

Im Verbrennungsmotor wird es sich auch nicht ganz vermeiden lassen, dass unverbrannte Kraftstoffteilchen, also Kohlenwasserstoffe, oder kleine und äußerst schädliche Partikel (vor allem im Diesel) den Auspuff verlassen. Außerdem verdunstet Kraftstoff oder tropft beim Tanken auf den Boden.

Das Wasserstoff-Brennstoffzellen-Auto ist hingegen ein Nullemissionsauto, so wie es die kalifornische Regierung gerne sieht. Nullemissionsauto heißt also: im Betrieb null Emissionen. Weder beim Tanken noch beim Fahren wird ein einziges Schadstoffmolekül ausgestoßen. Nur Wasserdampf kommt aus dem Auspuff.

Brennstoffzellen-Autos mit anderen Kraftstoffen als Wasserstoff sind zwar keine echten Nullemissionsautos, aber ihr Schadstoffausstoß ist sehr gering. Neben der Verdunstung des Kraftstoffs gibt es Emissionen aus dem Reformerbrenner, der die Wärme für die Umwandlung des Brennstoffes in Wasserstoff bereitstellt. Dieser Brenner arbeitet jedoch bei niedrigen Temperaturen. Die Emissionen sind, außer beim Kaltstart des Fahrzeugs, kaum messbar.

Entgegen manchmal geäußerter Befürchtungen ist Wasserdampf ein absolut unproblematisches Auspuffgas. Es ist zwar richtig, dass Wasserdampf zwei Drittel des gesamten Treibhauseffektes erzeugt und damit das wichtigste „natürliche“ Treibhausgas ist. Aber da geht es um immense Mengen dieses Dampfes. Die zusätzlichen, durch Menschen verursachten Mengen an Wasserdampf aus einer Wasserstoffwirtschaft sind jedoch marginal. Selbst wenn der gesamte heutige Primärenergiebedarf via Wasserstoff gedeckt würde, wären die Wasserdampfmengen aus natürlicher Verdunstung 20.000-mal größer.

Wasserdampf wird erst dann besonders wirksam, wenn er in bestimmten Höhen emittiert wird. Mit steigender Höhe nimmt die Treibhauswirkung zu, weil der Dampf länger dort verweilt. Gedanken muss man sich daher über den Einsatz von Wasserstoff in Flugzeugen machen: Unter zehn Kilometer Reise-flughöhe schneidet das Wasserstoffflugzeug immer noch deutlich besser ab als ein Kerosinflugzeug. Über fünfzehn Kilometer hingegen fällt die Bilanz negativ für Wasserstoff aus.

Von der Wiege bis zur Bahre: Gibt es überhaupt Nullemissionsautos?

Wenn das Brennstoffzellen-Fahrzeug also über die Autobahn gleitet – nur Wasser aus dem Auspuff, mit doppelter Effizienz –, ist der ökologische Traum emissionsfreier Fortbewegung nahe. Aber ein Nullemissionsauto gibt es nicht; leider ist der Umweltvergleich noch nicht ganz am Ende. Schon bei der Herstellung des Fahrzeuges, aber auch bei der Produktion der Kraftstoffe, kommt es nämlich zu Umwelteinwirkungen. Einen solchen Umweltvergleich, der alle Phasen des Lebensweges berücksichtigt, nennt man Ökobilanz (Abbildung 4.9).

Ein Beispiel: Herr Müller fährt einen Kilometer mit seinem neuen, kompakten Modell eines großen Fahrzeugherstellers von seiner Garage zur Arbeit. Hätte er ein modernes Benzinfahrzeug (das Fahrzeug Benzin 2010 in Abbildung 4.10, das dem Standardfahrzeug in zehn Jahren entspricht), so hätte sein moderner, aber durchschnittlicher Ottomotor 5 Liter Benzin pro 100 Kilometer verbraucht (Tabelle 4.1). Dabei entstehen 120 Gramm Treibhausgase, die auch CO₂-Äquivalente genannt werden. Aber auch das Benzin muss hergestellt werden. Dazu wird das Rohöl gefördert, transportiert, in Raffinerien aufbereitet, in Tankwagen verteilt: macht noch einmal 20 Gramm CO₂. Die Herstellung des Autos selber schlägt mit 20 Gramm CO₂ zu Buche. Schließlich müssen ja der Stahl, die Kunststoffe, das Glas hergestellt, zu Blechen, Scheiben, Stoßdämpfern geformt und zu einem funktionierenden Fahrzeug zusammengesetzt werden. Insgesamt macht das also 160 Gramm CO₂.

Müllers neues Brennstoffzellen-Mobil fährt dagegen mit Wasserstoff. Da Brennstoffzellen so effizient sind, liegt sein Kraftstoffbedarf nur noch bei gut drei Liter benzinäquivalenter Energie. Den Wasserstoff hat Herr Müller an der örtlichen Tankstelle gekauft. Aus seinem Auspuff kommt nun kein CO₂ mehr, weil im Wasserstoff kein Kohlenstoff enthalten ist, der zu CO₂ reagieren könnte.

Aber woher kommt der Wasserstoff? Heute wird er noch überwiegend aus Erdgas und anderen Kohlenwasserstoffen produziert (Abschnitt 3.3). Das meiste CO₂ fällt jetzt am Ort der Kraftstoffproduktion an, denn der Kohlenstoff aus dem Erdgas wird hier als CO₂ freigesetzt. Hinzu kommen die Methanemissionen, die bei der Produktion von Erdgas entstehen, denn auch Methan ist ein Treibhausgas. Macht 95 Gramm. Dann muss der Wasserstoff transportiert und in der Tankstelle auf hohen Druck verdichtet werden. Das führt zu weiteren fünf Gramm CO₂. Nun muss auch das Brennstoffzellen-Fahrzeug hergestellt werden. Ein solches Fahrzeug ist schwerer und hat exotischere Materialien als ein normaler Ottomotor. Deswegen sind die CO₂-Emissionen der Herstellung eines solchen Autos auch doppelt so hoch wie die des Benziners. Zu Buche schlagen unter anderem die hohen Umwelteinwirkungen, die mit den Katalysatormaterialien verbunden sind. Das macht knapp 40 Gramm CO₂. In der Summe emittiert Herrn Müllers Brennstoffzellen-Mobil also 140 Gramm

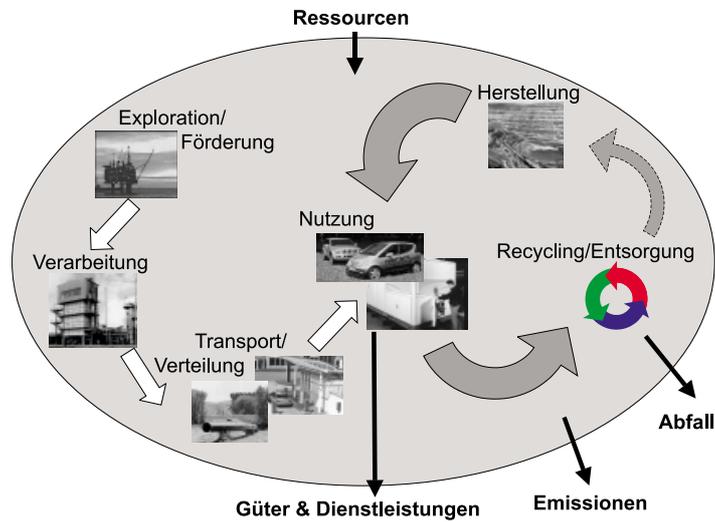


Abbildung 4.9: Der Lebenszyklus einer Brennstoffzelle: erst wird sie produziert, dann genutzt, dann entsorgt, und auch der Kraftstoff muss erzeugt werden.

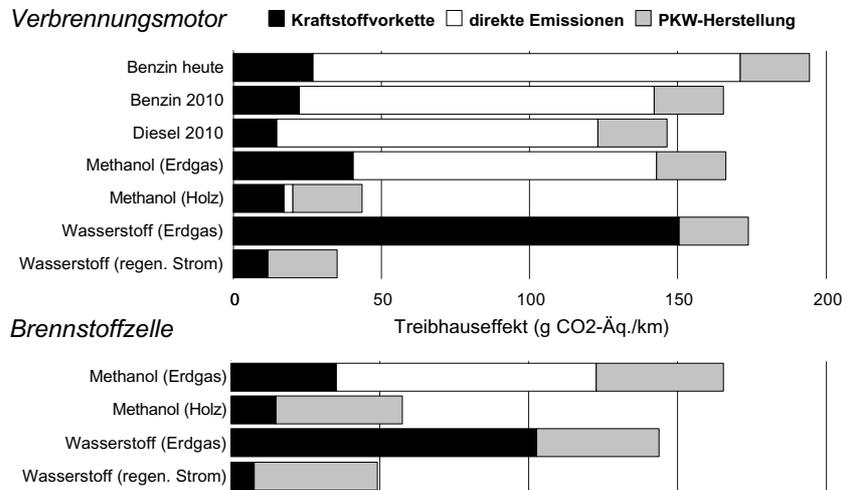


Abbildung 4.10: Wie viele Treibhausgase pustet ein Auto für einen Kilometer Fahrt hinaus? Dies sind Resultate von Ökobilanzen mit allem, was dazugehört: Der Kraftstoff wird hergestellt und transportiert (schwarz), das Fahrzeug produziert, gewartet und entsorgt (grau) sowie genutzt und gefahren (weiß). „Regen. Strom“ bedeutet, dass der Wasserstoff durch Elektrolyse mit regenerativem Strom produziert wurde.

CO₂, das sind knapp 15 Prozent weniger als beim fortschrittlichen Benzinwagen.

Anders sieht die Rechnung aus, wenn der Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen kommt. Dann entstehen bei der Kraftstoffherzeugung nur rund zehn, bei der Fahrzeugherstellung abermals knapp 40 Gramm CO₂ für den Kilometer.

Das Methanol-Brennstoffzellen-Auto wiederum hat höhere CO₂-Emissionen als das zukünftige Benzinauto, solange das Methanol aus Erdgas produziert wird. Das liegt daran, dass es einen zusätzlichen Umwandlungsschritt gibt: Erdgas wird in Methanol umgewandelt, Methanol in Wasserstoff, Wasserstoff in Strom, Strom in Kraft und Kraft schließlich in Bewegung.

Es ist also immer wichtig, die Fahrzeuge „von der Wiege bis zur Bahre“ zu beurteilen, um die echten Umwelteffekte eines Umstiegs von Verbrennungsmotoren auf Brennstoffzellen beurteilen zu können. Die vielen Kombinationsmöglichkeiten von Kraftstoffen und Antriebsarten führen dazu, dass das Gesamtbild sehr kompliziert wird. Aber bei allen Teufeln im Detail: Einige Kernaussagen bleiben gleich:

- Solange wir es mit einem fossilen Kraftstoffsystem zu tun haben, bieten Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeuge leichte Vorteile gegenüber den Verbrennungsmotoren. Vor allem der Ausstoß an Schadstoffen – auch über den Lebenszyklus betrachtet – wird reduziert. Die ausgestoßenen Treibhausgase liegen ebenfalls niedriger. Aber der innovative Verbrennungsmotor ist dennoch bei weitem nicht mehr die Dreckschleuder von Anno dazumal. Das heißt, dass auch mit Verbrennungsmotoren die Luft in Zukunft immer weniger belastet werden wird.
- Der Übergang zu einem Verkehrssystem auf Basis regenerativen Wasserstoffs führt dazu, dass die CO₂-Emissionen aus Betrieb und Kraftstoffbereitstellung nahezu auf Null gesenkt werden. Die klimarelevanten Emissionen, die noch übrig bleiben, sind die aus der Fahrzeugherstellung. Sowohl Brennstoffzellen-Fahrzeuge wie auch Verbrennungsmotoren sind in diesem System klimamäßig ähnlich gut einzuschätzen. In einem solaren Wasserstoffsystem liegen die Vorteile von Brennstoffzellen eher im technisch-wirtschaftlichen Bereich: Durch den höheren Wirkungsgrad wird weniger Wasserstoff verbraucht. Dadurch kann der Tank kleiner ausgelegt werden. Auch mit Druckgas tanks kann man so eine ordentliche Reichweite erzielen. Da regenerativer Wasserstoff zudem teurer sein wird, werden die Betriebskosten des Brennstoffzellen-Fahrzeugs mit seinem niedrigeren Wasserstoffverbrauch geringer sein als die eines Verbrennungsmotors.
- Alle anderen Kraftstoffoptionen für Brennstoffzellen-Fahrzeuge, vor allem Methanol und Benzin, werden Zwischenlösungen bleiben. Mit diesen Kraftstoffen kann die Brennstoffzelle ihre Vorteile nicht richtig ausspielen. Solche

Lösungen machen nur als strategische Lösungen Sinn: Wenn die Fahrzeughersteller jetzt schon Brennstoffzellen-Autos auf den Markt werfen wollen beziehungsweise – um die hohen Entwicklungskosten zu rechtfertigen – müssen, so bleibt nichts anderes, als auf Benzin oder Methanol zu setzen, weil die Wasserstoffinfrastruktur noch nicht da ist. Ein Königsweg ist dies aber nicht.

Leiser Motor, laute Reifen: Der Lärmschutz

Als im bayerischen Alpenort Oberstdorf Busse eingeführt wurden, die im Ortskern auf Elektroantrieb schalten, forderten Kritiker, man müsse einen Geräuschgenerator mit künstlichem Diesellärm installieren, damit die Kurgäste den Bus überhaupt hören und er nicht zum Unfallrisiko wird. Auch manchen enttäuschten Liebhabern eines satten Motorgeräusches sind Brennstoffzellen-Autos zu langweilig. Allen kann man es nie recht machen.

Aber Lärm ist ein großes Thema, wenn es um Beeinträchtigungen der Bevölkerung durch den Verkehr geht. Mehr als die Hälfte der Bevölkerung fühlt sich z.B. durch Straßenlärm deutlich belästigt. Technologien zur Lärmreduzierung sind daher dringend erwünscht. Und Lärmreduzierung steht auch auf der Liste der Vorteile, die Brennstoffzellen-Autos bieten sollen.

Zwar ist noch wenig über Lärmemissionen von Brennstoffzellen-Autos bekannt. Bei dem großen, vom Reifenhersteller Michelin in Kalifornien veranstalteten Rennen „Challenge Bibendum“ bekamen die Prototypen von Daimler und Ford im Lärmtest nur ein „befriedigend“ bis „ausreichend“. Lediglich Honda und Opel erreichten bessere Noten.

Ein Filmemacher, der das Werbematerial der Brennstoffzellen-Branche sichtete, stellte fest, dass bei den ästhetischen Aufnahmen eines über ein Rollfeld gleitenden Brennstoffzellen-PKWs kein Ton mitgeliefert wurde. Die Hersteller wussten warum: Die künstlerische Atmosphäre der Bilder wäre zu nichts gemacht worden. Bei einem anderen Video über einen Brennstoffzellen-Bus hingegen vermutete das Filmteam einen Schaden auf der Tonspur, bis sich herausstellte, dass die unangenehmen Geräusche auf dem Videoband vom Kompressor auf dem Dach des Busses stammten.

Es ist auch kein Wunder, wenn die Fahrzeuge heute noch nicht alle Erwartungen in puncto Lärmschutz erfüllen, stehen doch die Probleme mit der grundsätzlichen technischen Machbarkeit im Vordergrund. Aber die Erfahrung mit anderen Elektroautos, die man in der Vergangenheit ordentlich vermessen hat, zeigt, dass das Antriebsgeräusch eines Elektroautos deutlich geringer als das von Verbrennungsmotoren ist. Im Stadtverkehr, insbesondere bei der so genannten „beschleunigten Vorbeifahrt“, bei der Verbrennungsmotoren hin und wieder richtig ins Röhren kommen, bringen Elektroautos, und damit auch solche mit Brennstoffzellen, deutliche Lärmreduzierungen.

Bei höheren Geschwindigkeiten verursachen die Rollgeräusche jedoch mehr Lärm als die Antriebe: Das Walken der Reifen, Schwingungen, Aufschlagen und Ausschnappen sind bei Tempo 130 die Hauptgeräuschquelle. Aber auch Brennstoffzellen-Autos haben Reifen, und sie sind schwerer. Auf der Autobahn oder der Landstraße werden daher so gut wie keine Vorteile zu erkennen sein.

Hinzu kommt ein Gewöhnungsproblem. „Wir haben die Erfahrung gemacht, dass Brennstoffzellen-Busse objektiv leiser sind, aber lästigere Geräusche machen“, schildert Karl Viktor Schaller, Leiter der Vorentwicklung bei der MAN Nutzfahrzeuge AG und verantwortlich für die Entwicklung von Brennstoffzellen-Bussen bei MAN. Die messbaren Lärmemissionen seien geringer, berichtet er, aber manche Fahrgäste beklagen sich über jaulende und quietschende Geräusche. „Der Kunde kennt die Laufgeräusche eines Verbrennungsmotors.“ Der Klang von elektrischen Antrieben, Luftkompressoren oder Pumpen für den Bremskraftverstärker ist dagegen gewöhnungsbedürftig. Wie ein verendender Staubsauger klinge der Necar 4, charakterisiert auch *Geo-Autor* Reiner Klingholz die Geräuschkulisse.

„Tempo 30 in der Stadt: dann würden die Lärmvorteile des Brennstoffzellen-Fahrzeuges deutlich werden“, fordert daher Reinhard Kolke, Brennstoffzellen-Experte am deutschen Umweltbundesamt. Zusammen mit rollwiderstandsarmen Reifen, die nicht nur die Lärmemissionen reduzieren, sondern auch noch Sprit sparen, und einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen ließe sich insgesamt eine deutliche Lärminderung erzielen. Das Muster bleibt das gleiche: Brennstoffzellen-Autos bieten Vorteile, aber die Rahmenbedingungen müssen stimmen, damit sie sich voll entfalten.

Wie ein Muskel

Aber es sind eben nicht nur die ökologischen Vorteile, die Kundinnen und Kunden zum Kauf eines Autos bewegen. Man muss es eher umgekehrt formulieren: Heutzutage kann man eigentlich froh sein, wenn es auch ökologische Kriterien sind, nach denen sich die Auswahl eines Autos richtet. Der heutige Trend beim Autokauf scheint eher weg von der ökologischen Ratio zu weisen: immer mehr Autos, immer größere Autos, immer komfortablere Autos.

Daher wird in vielen Konzernen die Brennstoffzelle nicht so sehr als Ökotechnologie verfolgt, sondern unter dem Gesichtspunkt eines neuen, fahrkräftigen Autos mit der Aura der Innovation und Perfektion.

Die Brennstoffzelle bietet zahlreiche neue automobiler Möglichkeiten. Zum Beispiel kann die Fahrgastzelle völlig neu gestaltet werden. Durch einen Brennstoffzellen-Antrieb fallen mechanische Komponenten weg, der Schwerpunkt des Fahrzeugs liegt tiefer, und es könnten völlig neue Sicherheitskonzepte realisiert werden.

Ein voll elektrisches Fahrzeug erlaubt noch weitere technische Raffinessen. Drive-by-wire heißt die Entwicklung hin zu einem Auto, dessen Steuerung wie im Flugzeug mit einem Steuerknüppel statt mit Lenkrad und Gaspedal erfolgt. In Verbindung mit Navigationscomputern und Online-Verbindung könnte ein Elektroauto der Zukunft Staus umfahren, den kürzesten Weg finden und automatisch den richtigen Abstand halten. Fahren ohne lästige Schaltvorgänge und surrende Elektromotoren vermitteln ein Flair von Zukunft.

Viele schwärmen auch vom Fahrverhalten eines Elektroautos. Friedrich Wilhelm Korff schrieb über die Probefahrt mit dem Versuchsfahrzeug Necar 2 in der *Frankfurter Allgemeinen Zeitung*: „Der Bus setzt sich in Bewegung, nimmt rasch und dynamisch Fahrt auf. Die 68 PS sind mit ihrem hohen Drehmoment gleich verfügbar wie ein Muskel, der ja auch auf kaltem Wege chemische Energie in Bewegungsenergie verwandelt. Ohne zu ruckeln und seltsam linear Geschwindigkeit aufnehmend, rollt der schwere Bus los. Aus dem Auspuff: ... nichts zu riechen. Nur ein Hauch von Waschküche. Vergiften kann man sich an der Brennstoffzelle nicht.“ Vielleicht ist es gerade das emotionale Verhältnis vieler Menschen zum Automobil, zu Beschleunigung und Kontrolle, das der Brennstoffzelle zu großer Beliebtheit verhelfen könnte.

Wenn, ja wenn die Gewohnheiten überwunden werden. Gewohnheiten, die ein Gefühl von Stärke und Macht im Geräusch des Motors, in der Größe des Hubraums oder der Zahl der Zylinder verorten. „Emotion statt Emission“ ist daher ein einprägsamer, wenngleich nicht risikoloser Slogan, mit dem Daimler-Chrysler für seine Brennstoffzellen-Fahrzeuge wirbt.

4.4 Die sieben Ks oder: Die großen Herausforderungen an einen neuen Antrieb

Warum hat es 160 Jahre gedauert, bis die Brennstoffzelle als Batterieersatz im Fahrzeug auf der Forschungsagenda der großen Unternehmen steht? „Sieben Ks sind es, die den Einsatz von Brennstoffzellen erschweren“, versucht Bernd Höhle, Wissenschaftler am Forschungszentrum Jülich, eine Antwort. Und zählt auf: „**K**osten, **K**raftstoff, **K**ühlung, **K**altstart, **K**ilogramm, **K**unde, **K**atalysator.“ Neben den gravierenden Problemen der Kraftstoffspeicherung und -infrastruktur sind es technische Probleme, die die Autoentwickler in den Griff bekommen müssen. Die Kilogramm des Antriebs beispielsweise. Ein Brennstoffzellen-Auto braucht nicht nur einen Brennstoffzellen-Stack, der nach heutigem Stand der Technik immer noch ein Kilogramm pro Kilowatt wiegt. Auch der Elektromotor, der Reformer (wenn kein Wasserstoff als Kraftstoff verwendet wird), die Gasreinigung und anderes mehr bringen einiges an Zusatzgewicht auf die Waage.

Ein weiteres Problem-K ist der **Kaltstart**. Selbst bei -40 °C muss die Brennstoffzelle betriebsbereit sein. Innerhalb kürzester Zeit sollen die Komponenten und das Kühl- und Prozesswasser auf Temperatur gebracht werden. Der Opel-Brennstoffzellen-Stack beispielsweise braucht nur noch 30 Sekunden, um bei -20 °C zu starten. Das Ziel sind zehn Sekunden. „Wir glauben, dass wir das Ziel fast erreicht haben“, sagt Ingenieur David Wetter. Für das Gesamtsystem – und nicht nur für den Stack – ist der Kaltstart aber nach wie vor ein großes Thema.

Manchmal ist es der Brennstoffzelle auch nicht zu kalt, sondern zu heiß. Dann muss eine effektive **Kühlung** dafür sorgen, dass die Brennstoffzelle ihre Betriebstemperatur nicht überschreitet. Der gesamte Wasserhaushalt muss kontrolliert werden. Er ist eine der großen technischen Schwierigkeiten, mit denen die meisten Autobauer noch kämpfen müssen. Die Zellen müssen in Alaska oder Ägypten gleichermaßen gut befeuchtet sein, damit die Membran funktioniert. Zugleich darf das Wasser nicht frieren. Man darf nicht zu viel Wasser verbrauchen, sonst müsste man es immer nachfüllen, aber auch nicht zu viel produzieren, weil dann die Zellen überschwämmt würden.

Auch die **Kundschaft** selbst kann zum Problem werden. Denn der Kunde oder die Kundin muss das Fahrzeug kaufen, muss die Umweltvorteile und das gute Fahrverhalten schätzen, sich mit einer – zumindest anfangs – geringeren Tankstellendichte abfinden und die Mehrkosten eines solchen Autos akzeptieren. Dass Kundinnen und Kunden nicht unbedingt bereit sind, für ökologische Produkte mehr auszugeben, sieht man an der vergleichsweise geringen Nachfrage nach Bionahrungsmitteln, Ökokühlschränken oder grünem Strom. Der über lange Jahre hinweg geringe Anteil der im Betrieb kostengünstigeren Dieselfahrzeuge ist ebenfalls ein Indiz dafür, dass hohe Kaufpreise abschrecken, selbst wenn die Spritkosten niedriger sind. Das Geld, das in der Tasche bleibt, zählt immer noch am meisten. Brennstoffzellen-Firmen müssen daher vor allem am Anfang deutlich machen, dass mit einem solchen Auto etwas ganz Besonderes gekauft wird und dass auch einige Euro mehr gut investiert sind.

Die Kostenkur

Die **Kosten** bereiten den Automobilbauern also besonders starke Kopfschmerzen. Kosten: Das sind nicht nur die Kosten des neuen Kraftstoffs und des neuen Tankstellen- und Raffinerienetzes, sondern auch die des Fahrzeugs selbst. Für die Kosten eines heutigen Verbrennungsmotors bekommt man noch nicht einmal den Katalysator eines heutigen Brennstoffzellen-Antriebs. Bei einer ausgereizten Fertigungstechnik und jährlichen Produktionsvolumina von mehreren Millionen Verbrennungsmotoren ist es allerdings kein Wunder, dass Otto- und Dieselmotoren extrem billig sind.

Damit Brennstoffzellen-Einheiten überhaupt konkurrenzfähig werden, müssen einschließlich Reformer bei Methanolbetrieb, Elektromotor und Elek-

tronik Zielwerte von 100 Euro pro Kilowatt unterschritten werden. Und das bei mindestens 5000-stündiger Lebensdauer während einer 10-jährigen Nutzungszeit.

Die Unternehmensberatung Arthur D. Little hat einmal ausgerechnet, wie sich die Kosten eines Brennstoffzellen-Antriebes (ohne Elektromotor) zusammensetzen würden, wenn wir die heutige Technik mit hohen Stückzahlen koppeln würden. Ihr Ergebnis ist ernüchternd. 15.000 Euro würde ein Antrieb mit 50 Kilowatt Brennstoffzellen-Leistung kosten. Der Löwenanteil dieser Kosten wird von den eingesetzten Materialien verursacht, vor allem dem Platin. Der Weg zu einem großflächigen Einsatz von Brennstoffzellen-Antrieben ist also noch weit.

Kosten senken durch Lernen und Erfahrung

Autokonzerne gehen davon aus, dass bei Stückzahlen um 100.000 Einheiten pro Jahr die Kosten eines Brennstoffzellen-Antriebs bei 100 bis 200 Euro pro Kilowatt liegen können. Dies erfordert noch beträchtliche Kostensenkungen gegenüber den heutigen Prototypen und hohe Stückzahlen in der Produktion.

Die Vergangenheit zeigt, dass mit steigenden Herstellungszahlen eines Produktes die Kosten erheblich gesenkt werden können. Zum einen durch Rationalisierungsmaßnahmen und günstigere Einkaufsbedingungen, aber auch durch zunehmende Lerneffekte und Erfahrung bei der Produktion. Wenn die Kosten bei Verdopplung der gesamten Produktion um 25 Prozent gesenkt werden können, spricht man von einem Lernfaktor von 75 Prozent. Gasturbinen erreichten anfangs Lernfaktoren von 81 Prozent; Solarzellen liegen bei 78 Prozent, Windkraftanlagen bei 87 Prozent. Die als Blockheizkraftwerk vermarktete phosphorsaure Brennstoffzelle lag anfangs bei günstigen Lernfaktoren um 75 Prozent, in letzter Zeit sind die Kosten jedoch wieder gestiegen.

Die zu einer angestrebten fertigungsseitigen Kostensenkung erforderlichen Stückzahlen hängen bei gegebenem Lernfaktor sehr sensibel von den Einstiegskosten zu Beginn der Serienfertigung ab. Geht man von 500 Euro pro Kilowatt für das komplette Antriebssystem in einer Pilotserie aus, so ist bei einem optimistischen Lernfaktor von 75 Prozent und einem Anfangsbestand von 2000 Fahrzeugen eine Steigerung des Bestandes auf 100.000 erforderlich, um den angestrebten Systempreis von 100 Euro pro Kilowatt zu erreichen.

Dabei hat sich heute schon extrem viel getan. Beispiel Membran: Kostete früher ein Quadratmeter der Polymermembran 1000 Euro, liegt sie heute bei 80 Euro. Zielwert sind zehn Euro. Beispiel Platin: Statt einigen Kilogramm werden jetzt nur noch einige zehn Gramm des Edelmetalls für einen Pkw benötigt. Beispiel Bipolarplatten: Sie werden heute nicht mehr mechanisch aus Grafit gefräst, sondern in vergleichsweise billige Platten aus einem grafitischen Material eingedruckt.

Aber nicht nur die Brennstoffzelle selber ist zu teuer. „Die eigentliche Schlacht wird in der Peripherie geschlagen“, sagt Bernd Höhle vom Forschungszentrum Jülich. Viele neue Teile braucht eine Brennstoffzelle. Elektromotor, Verdichter, Gasreiniger, Wassermanagement, Kraftstoffspeicher und noch einiges mehr stehen auf der Beschaffungsliste der Antriebsentwickler.

Jede Komponente des Brennstoffzellen-Antriebs wird einer Kostenkur unterzogen. Neue Materialien, ein besseres Verständnis der Vorgänge im Inneren der Brennstoffzelle, eine verstärkte Integration von Komponenten in einen kompakten Stack, aber auch viel Alchemie und Experimentiererei sorgen dafür, dass die Brennstoffzellen nicht mehr um Welten von den Kostenzielen getrennt liegen. Aber immer noch kostet der Necar-4-Antrieb 35.000 Euro, der herkömmliche Verbrennungsmotor nur 3000 Euro.

Der Katalysator

Das Angenehme an der PEFC ist ihre niedrige Temperatur. Das Fahrzeug muss nicht lange auf Trab gebracht werden, bevor der Stromfluss beginnt. Doch das hat auch eine Kehrseite: Damit die elektrochemische Reaktion beginnt, müssen Katalysatoren – ein weiteres Problem-K – eingesetzt werden, die den Wasserstoffmolekülen helfen, sich in Protonen aufzuspalten, und die den Sauerstoffmolekülen die notwendige Aktivierung verleihen. Ausgerechnet das Edelmetall Platin und seine chemischen Verwandten, z.B. Ruthenium, haben exzellente katalytische Eigenschaften für diesen Zweck. Auch in den katalytischen Reformerbrennern und den Gasreinigungsmembranen kommen die so genannten Platingruppenmetalle zum Einsatz.

Zwar ist es in der Vergangenheit gelungen, den Platingehalt von Brennstoffzellen drastisch zu senken. In den frühen Zellgenerationen für die Raumfahrt waren pro Kilowatt Brennstoffzellen-Leistung zwei Kilogramm Platin enthalten. Heute sind es 2000-mal weniger. Einige zehn Gramm werden allerdings auch in zukünftigen Fahrzeugen zu finden sein, je nach Fortschritt der Wissenschaft mehr oder weniger. Zum Vergleich: In typischen Drei-Wege-Katalysatoren, wie sie heute jedes Auto hat, sind gerade mal circa drei Gramm.

Die Katalysatoren sind aber teuer. Ein Fünftel der Materialkosten wird bei heutigem Stand der Dinge durch Platingruppenmetalle bedingt. Der Preis dieser Metalle ist zusätzlich eine sehr unzuverlässige Größe. In den letzten fünf Jahren

schwankte der Platinpreis zwischen zehn und 20 US-Dollar pro Gramm. Der Preis von Ruthenium, einem besonders seltenen Metall, verdreifachte sich allein im Jahr 2000. Manchmal reichen Ankündigungen, wie vor einigen Jahren die Entwicklung eines Palladium-freien Katalysators, um binnen weniger Stunden die Preise zu verschieben. Auch ein einmonatiger Streik in den südafrikanischen Minen trieb die Preise in kürzester Zeit in die Höhe. Und anders als bei Gold oder Rohöl haben die Staaten keine Stützreserven gebunkert. Eine rasante Nachfragesteigerung nach den edlen Metallen könnte daher den Preis gehörig in die Höhe treiben.

Zugleich rostet Platin nicht. Das heißt, dass das aus dem Erz gewonnene Platin nicht grundsätzlich verschwindet, sondern wiedergewonnen werden kann. Das geht so lange, bis die Ressourcengrenze erreicht wird. Und das ist durchaus nicht in utopischer Ferne. Ingrid Råde von der Universität Göteborg hat einmal ausgerechnet, wie viel Platin wir benötigen würden, wenn 2050 die Hälfte der produzierten Autos Brennstoffzellen-Fahrzeuge wären. Dabei nimmt sie optimistische Zahlen für Recycling und Platinbeladung, allerdings extrem hohe Fahrzeugzahlen an. „Bereits im Jahr 2050 erreichen wir die Reser-
vengrenze, zehn Jahre später die Ressourcengrenze“, berechnet sie. Zugleich mahnt sie: „Die Platinvorkommen sind geografisch extrem konzentriert. 94 Prozent der Reserven liegen in Südafrika.“

Eine solche hohe Nachfrage könnte nur unter enormen Anstrengungen der Minenbetreiber bereitgestellt werden. Erforderlich wären mittlere Wachstumsraten von jährlich 3 Prozent. Zum Vergleich: In den letzten 30 Jahren lag die Wachstumsrate unter einem Prozent.

Katalysatoren sind auch ökologisch relevante Materialien. Sie werden nämlich aus sulfidhaltigen Erzen gewonnen. Ein Teil des Schwefels, der in den Gesteinsbrocken enthalten ist, wird bei der Weiterverarbeitung der Metalle als saures Schwefeldioxid (SO_2) freigesetzt. Aber genauso wichtig können die Abraumhalden der Minen, die „Tailings“, sein. Dort wirbelt der Wind kleine Gesteinsteilchen auf. Auch dadurch kann Schwefel in die Luft gelangen und wird zu Schwefeldioxid oxidiert.

In den russischen Nickel- und Platinminen hat dies enorme Konsequenzen. Die bekannte Mine Noril'sk gilt als die größte SO_2 -Quelle der Welt. In weitem Umfeld sind die Bäume verdorrt. Zum Glück liegen aber die großen Reserven in Südafrika. Die dortigen Minen sind deutlich moderner. Ein Großteil des SO_2 wird dort abgefangen. Die Abraumhalden werden bepflanzt, um den Teilchenflug zu reduzieren. Aber dennoch, die Katalysatormaterialien tragen wesentlich dazu bei, dass Brennstoffzellenfahrzeuge über den Lebensweg betrachtet doch kein Nullemissionsauto sind.

Dreifach wichtig ist es also, das Platin zu rezyklieren, wenn das Auto auf den Schrottplatz kommt: aus Kosten-, Umwelt- und Ressourcengründen. Technisch ist es durchaus möglich, mehr als 90 Prozent des Platins wiederzugewin-

nen. Aber die Frage ist, wie viele Autos tatsächlich einer ordnungsgemäßen Entsorgung zurückgeführt werden. Viele Autos werden nach Osteuropa exportiert, andere wild entsorgt. Außerdem wird es in den ersten Jahrzehnten, in denen die Nachfrage nach Brennstoffzellen-Produkten rapide wachsen könnte, gar nicht genug Fahrzeuge zum Rezyklieren geben.

Auf jeden Fall wird sich die Automobilwirtschaft etwas einfallen lassen müssen, um die Platinstoffflüsse zu schließen. Beispielsweise wäre ein hohes Pfand oder eine Rückgabebelohnung für alte Stacks denkbar. Oder man least das Auto und gibt es am Ende seiner Lebensdauer wieder zurück.

Andere Firmen denken noch weiter. Sie möchten Platin als Katalysatormaterial ganz loswerden. Der Chemiekonzern Celanese und andere Membranhersteller arbeiten z. B. an der Entwicklung einer temperaturbeständigen Membran. Sie hält auch höhere Temperaturen aus. Dadurch kann der Bedarf an Katalysatoren gesenkt werden. General Motors untersucht Hämoglobin – Bestandteil der roten Blutzellen – und organometallische Verbindungen als Materialien. Byron McCormick, einer der Chefforscher des Konzerns, sagt selbstbewusst: „Wir beginnen gerade erst, die Katalyse zu verstehen. Platin ist für uns kein Problem.“

Die Konkurrenz

Ein weiteres Hemmnis-K: die Konkurrenz. Im Verkehrsbereich gab es sie schon seit den Anfangsjahren des Automobils. Erbittert war der Kampf vor allem zwischen Elektromotor und Verbrennungsmotor. Anfangs hatte das Elektroauto die Nase vorne. Der Coburger Andreas Flocken nannte schon 1888 ein Elektroauto sein Eigen. Im Jahr 1900 schwärmte der Autojournalist Baudry de Saunier vom Elektroauto als dem „köstlichsten aller mechanischen Fahrzeuge“, und seit 1899 kann man Elektroautos der Firma Vollmar & Kühlstein kaufen. Und auch Ferdinand Porsche, in dessen Konzern heute Elektroautos keine Rolle mehr spielen, verblüffte auf der Pariser Weltausstellung mit 2,5 PS. Das Manko aller dieser Fahrzeuge: das große Gewicht der notwendigen Batterien.

Der Verbrennungsmotor überholte das Elektroauto. Schon wenige Jahre nach Daimler und Consorten war der Batterieantrieb vergessen. Erst die heutige Debatte, nicht zuletzt die Diskussion um die Brennstoffzelle, befreit den Elektromotor aus der Nische.

Die Debatte um den Klimaschutz hat die Autobauer aus einem Dornröschenschlaf erlöst. Nach Jahrzehnten, in denen es um Design, Fahreigenschaften und Absatzmärkte ging, rückt der Spritverbrauch wieder in den Fokus der Ingenieure. Die Automobilindustrie hat sich zu deutlichen Verbesserungen beim Spritverbrauch verpflichtet. Um ihrem Ziel näher zu kommen, gibt es verschiedene Möglichkeiten: der Bau leichter Autos, der Verzicht auf allerlei energieschluckenden Schnickschnack, windschlüpfrige Autos, die besser rollen, und die Optimierung der Antriebssysteme und Getriebe.



Abbildung 4.11: Das ist das vermutlich erste Elektroauto der Welt aus Coburg.

Die ersten Punkte sind etwas, wovon Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen-Autos in gleichem Maß profitieren. Im Gegenteil: Sollten zukünftige Autos durch Leichtbaumaterialien, rollwiderstandsarme Reifen und Karosserien mit minimiertem Luftwiderstand zukünftig besonders wenig Energie zum Antrieb erfordern, so wäre es wesentlich weniger schwierig, die Brennstoffzelle einzusetzen. Ein Beispiel: Würde man statt 70 PS für ein Kompaktklasse-Auto zukünftig nur noch 50 PS benötigen, so könnte man auf 20 teure Brennstoffzellen-Pferdestärken verzichten. Die Mehrkosten im Vergleich zum Verbrennungsmotor würden schrumpfen. Ein geringerer Kraftstoffbedarf aufgrund eines leichteren und schnittigeren Fahrzeuges heißt zugleich: weniger Wasserstoff, dadurch kleinere Wasserstofftanks, die heute noch kostspielig, schwer und technisch unausgereift sind.

Der Leichtbau

Eine Gewichtsverringering ist gleich aus mehreren Gründen wichtig. Der Rollwiderstand wird reduziert, der Energiebedarf zum Beschleunigen und Bergauffahren reduziert, und der Antrieb kann kleiner ausgelegt werden.

Bis zu 30 Prozent Gewichtsverringering heutiger Autos sind ohne weiteres möglich. Die Ingenieure, die im Auftrag von Greenpeace den Renault Twingo abgespeckt haben, reduzierten beispielsweise dessen Gewicht um 23 Prozent – ohne exotische Materialien, nur durch einen kleineren Motor sowie leichtere Innenausstattung und Räder.

In anderen Fahrzeugen, z. B. dem Audi A2 oder dem Dreiliter-Lupo von VW, kommen Leichtbaumaterialien zum

Einsatz. Das sind Materialien mit geringerer Dichte. Allerdings sind dem Leichtbau ökologische Grenzen gesetzt. Aluminium und Kohlenstofffaser sind z. B. sehr energieintensiv in der Herstellung. Bei der Produktion von Magnesium wird Schwefelhexafluorid eingesetzt, ein hochpotentes Treibhausgas. Und so weiter. Dem Einsatz solcher Materialien sollte daher eine sorgfältige Prüfung der ökologischen Vorteilhaftigkeit vorhergehen.

Spannend wird es im Kampf zwischen Brennstoffzellen und dem Verbrenner beim letzten Punkt: der Wirksamkeit der Antriebssysteme. Zum Leidwesen der Brennstoffzellen-Entwickler schläft auch die konventionelle Konkurrenz nicht. Besonders beim Ottomotor gibt es ein großes Potenzial zur Kraftstoffreduktion. Der normale Ottomotor muss mit einer Drosselklappe den Sauerstoffzufluss regulieren, damit immer genau die erwünschte Menge zufließt. In Teillast muss der Motor gegen eine mehr oder weniger geschlossene Klappe ansaugen – manche vergleichen dies mit dem Trinken mit einem verstopften Strohhalm. Außerdem verkräftet der Ottomotor, anders als der Diesel, keinen Luftüberschuss, der für eine vollständige – und damit effiziente – Verbrennung förderlich ist.

Der Benzindirekteinspritzer vermeidet diese Verluste, indem er den Dieselmotor nachahmt. Durch eine komplizierte Strömungsführung der Luft wird es möglich, Luft und Kraftstoff erst im Brennraum zu mischen. An der Zündkerze ist das Verhältnis Luft/Kraftstoff dergestalt, dass es problemlos zündet; über den Brennraum gemittelt gibt es dagegen einen Sauerstoffüberschuss. Außerdem kann die Drosselklappe wegfallen.

Das „Greenpeace-Smile“-Konzept setzt auf eine andere Technologie. Der Smile hat ein drastisch verringertes Hubraumvolumen. Dadurch befindet sich der Motor in den meisten geforderten Fahrsituationen näher am Punkt niedrigsten Kraftstoffverbrauchs, der bei mittleren Drehzahlen liegt. Herkömmliche Motoren sind nämlich überdimensioniert und auf Fahrsituationen ausgelegt, die nur in Extremfällen auftreten. Die Beschleunigungsreserve des Smile wird durch Erhöhung des Luftdrucks im Zylinder („Aufladung“) erreicht.

Der Hybridantrieb ist eine besonders harte Konkurrenz für die Brennstoffzelle: ihn kann man nämlich schon von einigen Firmen kaufen. Bereits 1997 führte Toyota den ersten Hybridwagen, den Prius, weltweit ein. Bis Oktober 2001 wurde er 70.000-mal verkauft. Das Hybridauto kombiniert einen Elektromotor und einen Verbrennungsmotor. Die Bewegungsenergie kommt je nach Bedarf nur aus dem Verbrennungsmotor, nur aus dem Elektromotor oder aus beidem. Immer dann, wenn der Verbrennungsmotor ineffizient wäre, also z. B. bei niedrigen Geschwindigkeiten in der Stadt, übernimmt der Elek-

troantrieb das Zepter. Der Elektroantrieb erhält seinen Strom entweder aus einer Batterie oder aus einem Generator, der von dem Verbrennungsmotor angetrieben wird.

Mittlerweile folgten andere Firmen dem Beispiel. Nicht nur der Verbrauch kann durch den Hybridantrieb gesenkt werden. Auch die Emissionen liegen deutlich niedriger, weil der Motor viel ruhiger in definierten Betriebszuständen betrieben werden kann. Wesentlicher Nachteil des Hybridantriebs: Er ist deutlich schwerer und komplexer, weil im Prinzip zwei unabhängige Antriebssysteme eingesetzt werden.

Neben kontinuierlichen Verbesserungen des Kraftstoffverbrauchs tut sich auch auf der Emissionsseite bei den Verbrennern einiges. Neue Katalysatoren vermindern die Auspuffgase drastisch. Die meisten Emissionen werden dann ausgestoßen, wenn der Motor noch kalt und der Katalysator weit von seiner Betriebstemperatur entfernt ist. Ein Kilometer zum Zigarettenautomaten mit einem kalten Auto setzt beispielsweise bei einem Euro-4-Fahrzeug genauso viel Kohlenwasserstoff-Emissionen frei wie 30 Kilometer gleichmäßiger Fahrt auf der sommerlichen Autobahn, im Winter sogar deutlich mehr.

Da setzen die meisten Katalysatorkonzepte an. Speicherkatalysatoren binden beispielsweise Stickoxide, die in den ersten Minuten nach dem kalten Motorstart entstehen, und geben sie wieder ab, sobald der eigentliche Katalysator Betriebstemperatur hat. Andere Konzepte setzen auf Heizungen, die einen Katalysator schnell auf Temperatur bringen, auf die Rückführung des Abgases, auf Verbesserungen des Verbrennungsraums, Aktivkohle- oder Partikelfilter.

Die neuen Abgasnormen, die ab 2005 europaweit verpflichtend sind, halbieren bis dritteln die meisten Emissionen im Vergleich zu den heutigen Euro-3-Grenzwerten. Umweltexperten schlussfolgern, dass auch mit zukünftigen Verbrennungsmotoren die Luftqualitätsziele erreichbar sein könnten. Auch hier also: Der Abstand zum Brennstoffzellen-Fahrzeug wird geringer, der Konkurrenzkampf härter. Wenn die Brennstoffzelle die Kostenziele nicht erreicht, wird es in der nahen Zukunft eng.

Konkurrenz kommt übrigens nicht nur von den Benzin- und Dieselfahrzeugen. Selbst innerhalb der Fraktion der Wasserstoffautos gibt es Wettbewerb. Das Beispiel BMW zeigt: Auch der Verbrennungsmotor kann mit Wasserstoff gut arbeiten. Fünfzehn BMW 750 hL posieren fotogen vor dem Brandenburger Tor und demonstrieren die Machbarkeit des Antriebs. Vor dem Konferenzhotel einer Wasserstoffkonferenz in München im Jahr 2000 standen die ersten wasserstoffbetriebenen, am Fließband gefertigten Fahrzeuge Schlange, um die besonders prominenten Teilnehmer von ihrer Funktionstüchtigkeit zu überzeugen. „Clean Energy“ prangt in großen Buchstaben auf den Limousinen. Auf Wasserstoff umgerüstete MAN-Gasbusse transportieren auch auf dem Münchener Flughafen Passagiere zu ihren Maschinen. Der Einsatz auf dem Flugha-

fen ist klug gewählt. Es gibt nur wenige Bereiche, in denen Zuverlässigkeit und Sicherheit mehr zählen als auf dem Rollfeld.

Schon lange rüsten die großen Autohersteller, auch die heutigen Brennstoffzellen-Befürworter, einzelne Verbrennungsmotoren auf Wasserstoff um. Daimler-Benz begann damit 1973. Ford entwickelt ebenfalls parallel zu seinen Brennstoffzellen-Vehikeln den Verbrenner fort und lässt es auf einen Wettkampf der Technologien ankommen.

Die Unternehmen müssen sich umschauen

Sollte das Brennstoffzellen-Auto die zahlreichen Hemmnis-Ks überwinden, so wären die Konsequenzen für die Autoindustrie enorm. Vor allem die Zulieferunternehmen würde es treffen. Die Hersteller von Zylinderkolben, Nockenwellen oder Zündkerzen würden bei einem Siegeszug der Brennstoffzelle zukünftig weniger zu verkaufen haben als die Produzenten von Membranen, Elektromotoren, Wechselrichtern oder Reformern. Heute wird im Fahrzeugbau gegossen, geschleift, gewalzt, gehärtet, geschmiedet. Bei einer Brennstoffzelle geht es um Beschichtungsverfahren, um Elektrochemie, um Fügen, Plasmaspritzen und Laserschweißen. „Die Wertschöpfung der Fahrzeugindustrie verringert sich durch Einführung von Brennstoffzellen-Systemen erheblich zu Gunsten der Elektrotechnik und der Chemiebranche“, warnt der Verfahrenstechniker und Unternehmensberater Hans Gerd Düsterwald. Plötzlich dringt die Elektronik- und Softwarebranche in den Autobereich. Der Anteil elektronischer Komponenten an den Gesamtkosten eines Fahrzeugs könnte bei dieser neuen Fahrzeuggeneration von einem Zehntel auf ein Drittel ansteigen, mutmaßt er. „Die Zukunft des Verkehrs ist elektrisierend“, wortspielt auch eine amerikanische Internetseite mit dem bezeichnenden Titel „Your next car“. Wenn sich Autofirmen nicht zum Aufbau eigener Kompetenz durchringen können, so mahnt Düsterwald, sollten sie sich zumindest in Unternehmensnetzwerke einbinden.

Doch gerade die mittelständische Industrie muss auch aufpassen, dass sie nicht zu früh dem Sog der Brennstoffzelle folgt und sich umorientiert und die großen Unternehmen derweil mit wohlmeinenden Formulierungen einen Rückzug von der Brennstoffzellen-Front vollziehen. Hier ist umsichtiges Management gefragt.

4.5 Sind Brennstoffzellen-Autos nachhaltig?

Nachhaltigkeit, Sustainability, Zukunftsverträglichkeit – diese Begriffe haben Konjunktur. Eine Technologie, die zukünftig Chancen haben soll, muss zukunftsfähig sein. Das ist nicht so tautologisch, wie es klingt. Denn mit den Be-

griffen „Zukunftsfähigkeit“ oder „Nachhaltigkeit“ wird auf ein umfangreiches Konzept verwiesen.

„Nachhaltigkeit“ kam in den Achtzigerjahren in Mode und war der Dreh- und Angelpunkt des berühmten „Erdgipfels“ in Rio 1992. Mit der nachhaltigen Entwicklung wird eine alte Weisheit aus der Forstwirtschaft aufgegriffen, dass man nur so viele Holzbestände ernten dürfe, wie durch Neupflanzungen nachwachsen können. Nachhaltige Entwicklung bezeichnet eine Entwicklung, wenn sie „die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“, wie eine Kommission unter Leitung der späteren norwegischen Premierministerin Gro Harlem Brundtland 1987 definiert hat.

Damit ist eine Verantwortung für Gerechtigkeit sowohl *zwischen* den Generationen als auch *innerhalb* jeder Generation angesprochen: Gerechtigkeit zwischen Arm und Reich, Alt und Jung oder heutigen und zukünftigen Generationen. Nachhaltigkeit bezieht sich nicht nur auf Umweltprobleme, sondern gleichermaßen auf Fragen einer dauerhaften Gestaltung unseres Wirtschaftssystems, einer sozial gerechten Verteilung von Lasten und Nutzen und der Reform unserer Institutionen, die eine nachhaltige Entwicklung fördern. Man spricht auch von den drei bzw. vier Säulen der Nachhaltigkeit: die Ökologie, die Ökonomie und das Soziale, manchmal auch die Institutionen und Organisationen.

Auch Verkehr sollte sich, wenn man den Forderungen der Rio-Konferenz folgt, an der Messlatte der Nachhaltigkeit messen lassen. „Ist Mobilität nachhaltig verkehrt?“, fragen Wissenschaftler vom Heidelberger Institut für Energie- und Umweltforschung. Zur Beantwortung dieser Frage spielen viele Aspekte eine Rolle. Zum einen natürlich die schonende Behandlung der endlichen Ressourcen und die Minimierung der Risiken im Zusammenhang mit Mobilität, vor allem die Verkehrssicherheit. Die Regenerations- und Anpassungsfähigkeiten unserer Ökosysteme dürfen nicht überschätzt werden. Erhaltenswerte Stadt- und Landschaftsbilder gilt es zu schützen.

Aber Mobilität hat auch eine sehr starke soziale Komponente. Allen Menschen, Regionen oder Generationen sollte ein adäquater Zugang zu einer Grundversorgung mit Verkehrsdienstleistungen gewährleistet sein. Dazu sind verschiedene gesellschaftliche Gruppen an Entscheidungsprozessen über die Gestaltung der Transportsysteme zu beteiligen. Zugleich muss die Wirtschaftlichkeit der Verkehrs- und Transportsysteme in einem umfassenden Sinn gesichert sein. Das heißt, die Verkehrssysteme sind möglichst kostengünstig zu erstellen, sie müssen für alle erschwinglich sein, und, das wird oft vergessen, sie müssen die externen Kosten – soweit diese ermittelbar sind – reflektieren. Diese externen Kosten umfassen solche, die durch die Benutzung von Verkehrsmitteln entstehen, die aber niemand bezahlt, angefangen von den Kosten der Renovierung des Kölner Doms, dessen Fassade unter den Auspuffgasen ex-

trem gelitten hat, bis hin zu Kosten durch Minderungen der Immobilienwerte entlang viel befahrener Straßen.

Die Vielzahl der Nachhaltigkeitsaspekte macht die Beantwortung der Frage „Sind Brennstoffzellen-Autos nachhaltig?“ so komplex. Schwierig ist vor allem, dass es eine Reihe von Bewertungskriterien gibt, die einander auch widersprechen können. Es kann also zu Nachhaltigkeitskonflikten kommen. Weniger Auto fahren schont die Umwelt, kann aber Arbeitsplätze in der Automobilbranche kosten. Verdichtetes Wohnen auf weniger Raum verbraucht weniger Fläche und reduziert den Verkehr. Vielleicht kommt es dadurch aber verstärkt zu sozialen Konflikten. Und so weiter.

Einfacher ist es daher oft, Nachhaltigkeit nur vergleichend zu bewerten: Die eine Option ist nachhaltiger als eine andere. Und das ist auch wichtig im Zusammenhang mit Brennstoffzellen. Brennstoffzellen-Autos sind sparsamer und emittieren weniger Schadstoffe als normale Autos. Sie sind deshalb in Bezug auf diese Aspekte nachhaltiger. Aber sie sind nicht im Sinne der Brundtland-Definition absolut gesehen nachhaltig. Denn auch Brennstoffzellen-Autos müssen auf Straßen fahren, die die Landschaft zerschneiden. In Stoßzeiten wird es Brennstoffzellenauto-Staus genauso geben wie Benzin- und Dieselauto-Staus. Und die innovativen Fahrzeuge werden genauso in Verkehrsunfälle verwickelt sein wie die jetzige Fahrzeugflotte.

Hinzu kommt, dass der Fortschritt durch effiziente, saubere Fahrzeuge in der Vergangenheit zum Teil durch das enorme Verkehrswachstum zunichte gemacht wurde. Selbst mit innovativen Antrieben und erneuerbaren Kraftstoffen wird es also schwierig sein, die Emission von Treibhausgasen aus dem Verkehrssektor zu senken, geschweige denn die ehrgeizigen Reduktionsziele der Bundesregierung oder der Enquête-Kommission zu erfüllen.

***Der automobile Verkehr und die Umwelt:
Nicht nur Schadstoffe zählen***

Nicht nur die Schadstoffe aus dem Auspuff bedeuten einen Eingriff in das ökologische Gleichgewicht:

Flächenverbrauch und -zerschneidung: *Zwölf Prozent der Fläche Deutschlands werden für Siedlungs- und Verkehrsflächen in Anspruch genommen. Die Hälfte dieser Flächen ist durch Asphalt, Beton oder anderes versiegelt. Die Länge des Straßennetzes nimmt kontinuierlich zu – um 80 Prozent allein zwischen 1955 und 1999.*

Nicht nur die Zubetonierung von Fläche durch Straßen erweist sich als kritisch für den Schutz von Ökosystemen und der Artenvielfalt. Wichtig ist vor allem, dass Tier- und Pflanzenarten unzerschnittene, zusammengehörige Räume

zur Verfügung haben. Besonders empfindlich sind Greifvögel und Rotwild. Straßen, natürlich auch Eisenbahnlinien, zerschneiden die Bundesrepublik in 118.000 kleine Teilstücke, hat das Bundesamt für Naturschutz errechnet.

Verkehrssicherheit: Die Zahl der Verkehrstoten nimmt ab. Das ist die gute Nachricht. Aber noch immer sterben in Deutschland jährlich 7800 Menschen im Verkehr, und zwar fast ausschließlich auf der Straße.

Lärm: Straßenverkehr ist die wichtigste Ursache für Lärm-belästigungen. Mehr als die Hälfte der Bevölkerung fühlt sich durch Straßenlärm belästigt, über 30 Prozent ist nachts Schallpegeln von mehr als 50 dB(A) ausgesetzt: Bei solchen Lärmbeeinträchtigungen treten bereits Schlafstörungen auf. Dabei ist Lärm nicht nur lästig, sondern auch gesundheits-schädlich. Schlafstörungen, Schädigungen des Innenohrs, selbst ein Zusammenhang zwischen Lärmbelästigung und Herzinfarkten wurden beobachtet. 12 Millionen Bundes-bürger müssen mit einem erhöhten Risiko lärmbedingter Herzkrankheiten rechnen.

Staus: Auf über 100 Milliarden Euro beziffert eine Studie von BMW die Verluste durch zeitweilig behindertes Fortkommen – sprich Staus. Mehr als drei Tage eines Jahres verbringen die Deutschen im Schnitt stehend auf der Fahrbahn – mehr Zeit als beim Sex. Auch der enorme und weiter zuneh-mende Straßengüterverkehr trägt zu diesen Erlahmungser-scheinungen bei.

Es kristallisiert sich also heraus, dass der Einsatz von Brennstoffzellen im Mobilitätsbereich sehr sinnvoll sein kann, dass aber zugleich wir als Verkehrskunden, als Nachfrager der Dienstleistung Transport nicht ganz ungeschoren davonkommen werden. Die Notwendigkeit, technische Verbesserungen – wie den Einsatz von Brennstoffzellen – zu koppeln mit Maßnahmen auf der Kundenseite, zeigt sich übrigens in vielen gesellschaftlichen Bereichen. Beispielsweise wird es zukünftig notwendig sein, effizientere, ökologisch orientierte landwirtschaftliche Anbaumethoden zu koppeln mit einem geringeren Fleischkonsum. Oder den Einsatz von Informationstechnologien zur Optimierung der Güterlogistik mit einer regional orientierten Produktpalette. Oder die Verwendung nachwachsender Rohstoffe für Verpackungen mit langlebigeren, mehrfach einsetzbaren Waren.

Zur Charakterisierung der unterschiedlichen Nachhaltigkeitsstrategien wurden einige schicke Begriffe eingeführt: Effizienz, Suffizienz und Konsistenz. Effizienz bedeutet, die eingesetzten Rohstoffe möglichst produktiv zu nutzen, also den Stoff- und Energieverbrauch für ein Produkt oder eine Dienstleistung möglichst weit zu reduzieren. Brennstoffzellen sind Bestandteil einer solchen Effizienzstrategie. Suffizienz hingegen meint auch den Verzicht auf Konsum, die Einschränkung der Nutzung von Gütern. Dies bedeutet vor allem: Lebensstile müssen sich ändern. Der Restbedarf, der dann noch verbleibt, sollte konsistent gedeckt werden. Konsistent heißt einverträglich mit den natürlichen Stoffkreisläufen, auf erneuerbaren Ressourcen beruhend, ohne die Umwelt als Senke über die Grenzen ihrer Belastbarkeit hinaus zu beanspruchen. Nur wenn diese drei Strategien miteinander verzahnt sind und nicht gegeneinander ausgespielt werden, wird ein nachhaltiger Verkehr gelingen.

In der Verkehrswissenschaft spricht man in diesem Zusammenhang von den „Vs“: der Vermeidung von Verkehr, der Verlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsträger, der Verbesserung der Fahrzeuge und der Verflüssigung und Beruhigung der Verkehrsströme.

Die Vs eines umweltverträglichen Verkehrssystems

Verkehr vermeiden: Weniger Verkehr ist immer der beste Weg zu weniger Umweltbeeinträchtigungen. Verkehr kann man auf verschiedenen Ebenen vermeiden. Eine kluge Standortplanung, die auf Dezentralisierung setzt und Schlafstädte oder riesige Einkaufsmeilen vermeidet, eine städtebauliche Aufwertung und eine Verdichtung der Städte durch das Schließen von Baulücken, ein Wirtschaftssystem, das auf regionale Produkte setzt, die Vermeidung überflüssiger Freizeitfahrten durch attraktive Naherholungsgebiete oder eine clevere Verkehrsorganisation: Dies sind Bausteine einer Verkehrsvermeidung, die auf Strukturwandel setzt. Verkehrsvermeidung kann genauso gut bedeuten, dass sich das Mobilitätsverhalten durch Wertewandel und Verzicht ändert. Schließlich kann aber auch das Verkehrsaufkommen durch die Erhöhung des Ausnutzungsgrades der vorhandenen Verkehrsmittel reduziert werden: z. B. Fahrgemeinschaften oder Bordcomputer, die einem den kürzesten Weg anzeigen.

Verlagerung auf umweltfreundliche Verkehrsträger: Die Fahrten, die nach der Umsetzung von Vermeidungsstrategien verbleiben, sind mit möglichst umweltfreundlichen Verkehrsträgern durchzuführen. In der Fachsprache heißt

dies: Der Modal Split muss geändert werden. Durch den Ausbau eines Radwegenetzes, Vorrangmaßnahmen für den öffentlichen Verkehr, Park and Ride, eine gute logistische Vernetzung im Güterverkehr, aber auch durch höhere Kraftstoffpreise oder -steuern könnte eine solche Verlagerung vorangebracht werden.

***Verbesserung der Fahrzeuge und Kraftstoffe:** Dieses V ist Gegenstand des gesamten Kapitels. Neue Antriebe und alternative Kraftstoffe, verbesserte Motoren, neue Filtertechnologien und langlebigere, sparsamere Fahrzeuge: Das Auto von morgen kann ein ökologischeres Auto sein als das heutige.*

***Verkehrsberuhigung, -verhalten und -verflüssigung:** Das Fahrverhalten ist wesentlich für Kraftstoffverbrauch, Emissionen, aber auch die Verkehrssicherheit. Der Ökoführerschein könnte die Grundlagen umweltschonenden Fahrens vermitteln. Aber auch gesetzliche Maßnahmen (Tempolimit, Tempo-30-Zonen) und neue Informations- und Kommunikationssysteme (Bordcomputer, Leitsysteme etc.) können zu einem ruhigeren, flüssigeren und ökologischeren Verkehr beitragen.*

Etwas überspitzt könnte man sagen: Brennstoffzellen als alternative Antriebe und Wasserstoff als alternativer Kraftstoff sind möglich und notwendig. Sie sind aber nicht hinreichend für eine Nachhaltigkeit im Verkehrssektor. Nachhaltige Mobilität erfordert noch einiges mehr an Anstrengungen, sowohl im Klimaschutz als auch in vielen anderen ökologischen und sozialen Bereichen.

Der nachhaltigste Verkehr, das hat schon der weitgereiste Gelehrte Johann Gottfried Seume vor 200 Jahren erkannt, ist der aufrechte Gang: „Ich halte den Gang für das Ehrevollste und Selbständigste im Manne und bin der Meinung, dass alles besser gehen würde, wenn man mehr ginge. Man kann fast überall bloß deswegen nicht recht auf die Beine kommen, weil man zuviel fährt.“ Sein emphatisches Plädoyer schließt mit einer provokativen Spitze gegen alle, die heute auf motorisierte Mobilität setzen: „Fahren zeigt Ohnmacht, Gehen zeigt Kraft.“