

Welcher Antriebstechnologie gehört die Zukunft im Strassenverkehr?

rw. Die Forschung in der Schweiz zu den künftigen Antriebstechnologien im Strassenverkehr kennt im Wesentlichen vier Stossrichtungen. Neben der Weiterentwicklung der herkömmlichen Verbrennungsmotoren mit oder ohne Hybridantrieb stehen die Elektromobilität, hybride Gasmotoren sowie Brennstoffzellen-Autos im Fokus.

Als grosse Herausforderung stellt sich im Verkehrsbereich die Reduktion der CO₂-Emissionen dar. Diese sind in den vergangenen Jahrzehnten trotz markanten Verbesserungen der Fahrzeugtechnik stetig gestiegen. Wichtige Treiber bilden der gestiegene Mobilitätsbedarf (auf den Schweizer Strassen bewegten sich 2010 5,7 Mio. Strassenfahrzeuge; im Jahr 1990 waren es noch 3,9 Mio.) und veränderte Ansprüche an den Fahrzeugkomfort und an die Fahrzeugsicherheit.

Der Verkehr wird deshalb im Rahmen der Energiestrategie 2050 des Bundes ganz gezielt unter die Lupe genommen. Dabei wird nach neuen Wegen gesucht, wie einerseits in der Mobilität der Energieverbrauch gesenkt, andererseits aber auch die Verkehrsinfrastruktur für die Energieerzeugung genutzt werden können.

Für Bundesrätin Doris Leuthard ist der Bereich Verkehr für die gesamte Energiepolitik zentral und ein wichtiger Pfeiler der künftigen Entwicklung. Dies betonte sie abermals an der diesjährigen Jahrestagung des Verbandes Fernwärme Schweiz (VFS) am 26. Januar in Biel. Vor allem sei die Technologie in der Motorenentwicklung gefordert, die helfen müsse, den Treibstoffverbrauch im Verkehrssektor zu reduzieren. Auch brauche es neue Ansätze in der Elektromobilität. Damit könne durch einen veränderten Energiemix im Verkehr ein Beitrag zur Reduktion der fossilen Energien erreicht werden.

Stand der Forschung

Doch welcher Antriebstechnologie gehört denn nun die Zukunft? Diese Frage stellen wir den vier führenden Forschern im Bereich «Energie und Mobilität».

Hauptziel einer neuen oder optimierten Antriebstechnologie ist die Reduktion des CO₂-Ausstosses. Darin sind sich die For-

scher Konstantinos Boulouchos, Christian Bach, Philipp Dietrich und Lino Guzzella einig. Die vier Wissenschaftler suchen seit Jahren nach Lösungen und neuen Technologieansätzen, wie die CO₂-Emissionen von Motorfahrzeugen bei gleicher Leistung minimiert werden können.

Für Bach ist ein Status quo im Privatverkehr in Anbetracht der CO₂-Statistik nicht verantwortbar. Der Verkehr ist die grösste CO₂-Verursachergruppe in der Schweiz mit einem Anteil von 32 Prozent an den Gesamtemissionen. 77 Prozent der Emissionen innerhalb der Verursachergruppe Verkehr stammen wiederum von Personewagen. «Wollen wir eine Verbesserung der CO₂-Emissionen sehen, müssen wir also unbedingt die Personewagen anpacken», so Bach.

Zitierte Forscher

Prof. Dr. Konstantinos Boulouchos: Präsiert den Leitungsausschuss des Energy Science Center an der ETH Zürich. Seit 2002 ordentlicher Professor am Institut für Energietechnik an der ETH Zürich.

Christian Bach: Der Automobil-Ingenieur ist seit zehn Jahren Abteilungsleiter Verbrennungsmotoren bei der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa.

Dr. Philipp Dietrich: Geschäftsführer des Kompetenzzentrums für Energie und Mobilität (CEEM) am Paul Scherrer Institut.

Prof. Dr. Lino Guzzella: Professor für Thermotronik am Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik an der ETH Zürich.

Boulouchos, Bach und Dietrich waren Referenten an einer Veranstaltung des Schweizerischen Energierates am 20. Oktober 2011 an der ETH Zürich.

Auch für Boulouchos ist der CO₂-Ausstoss Angelpunkt, wobei sich seine Forschung am visionären Ziel der 1-Tonne-CO₂-Gesellschaft orientiert. Dabei soll der CO₂-Ausstoss pro Person vor dem Jahr 2100 auf *eine* Tonne pro Jahr stabilisiert werden, will man den mittleren Temperaturanstieg gegenüber dem vorindustriellen Stand auf 2°C beschränken. Heute werden in den USA 20 Tonnen CO₂ pro Kopf emittiert, in der Schweiz 5,2. Um das Ziel einer 1-Tonne-CO₂-Gesellschaft zu erreichen, «muss die Effizienz jedoch auf allen Stufen der Energieumwandlung besser werden. Eine Entkarbonisierung des Verkehrssektors allein ist nicht ausreichend», differenzierte Boulouchos.

Die vier Forschungsrichtungen

1. Elektromobilität

Die Elektromobilität ist im Volk sehr positiv konnotiert und dies eigentlich aus denselben Gründen, wie sie Jules Verne bereits vor über 100 Jahren in seinem 1904 erschienenen Roman «Der Herr der Welt» festhielt:

«Gewiss war nur, und es wurde von allen Leuten bestätigt, dass dieser keinen Rauch, keinen Dampf, ebenso aber auch keinen Geruch nach Petroleum oder einem anderen Mineralöl hinterliess. Man schloss daher, dass es sich um einen durch Elektrizität angetriebenen Apparat handelte, dessen in unbekannter Bauart hergestellte Batterien einen fast uner-schöpflichen Strom abzugeben schienen.»

Diesen kurzen Paragraphen hat der Journalist Bernd Flessner für einen NZZ-Artikel über Elektromobilität am 19. Oktober 2011 ausgegraben. Jules Vernes Worte brachten schon damals genau auf den Punkt, was auch heute noch zu den Vorzügen der Elektromobilität gehört: Elektromobile verbrennen keine fossilen Treibstoffe, sie hinterlassen keinen «unangenehmen Geruch». Die Elektromobilität hat neben dieser als positiv eingeschätzten Eigenschaft *einen* grossen Nachteil: die beschränkte Reichweite. Um mit einem Elektromobil gleich weit fahren zu können wie mit einem 50-Liter-Dieselauto, müsste man ein-tausend Kilo Batterien mitnehmen, rechnete Lino Guzzella in einem Interview im Tagesanzeiger-Magazin im Januar 2011 vor.

Bei der Elektromobilität gilt es ausserdem zu beachten, woher der Strom zum Aufladen stammt. Boulouchos betont, dass eine Elektrifizierung des Verkehrs nur Sinn macht, wenn der Strom aus CO₂-freien Quellen kommt. An eine Elektrifizierung des Verkehrs mit europäischem Strommix sei nicht zu denken, sagt er, denn die Wahrscheinlichkeit, dass die Elektrizität aus einem alten Kohlekraftwerk stamme, sei einfach zu gross. Deswegen sei die beste Situation, wenn sowohl die Batterie, als auch die Elektrizität in der Schweiz produziert würden.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Elektromobilität für alle Forscher zwar zur Mobilität der Zukunft beitragen, sie mittelfristig aber noch nicht bestimmen wird (s. *Grafik CO₂-Reduktionspotentiale Seite 17*).

2. Hybridfahrzeuge

Hybride Fahrzeuge, die einen herkömmlichen Verbrennungsmotor mit einer Batterie kombinieren, die man zu Hause an der Steckdose aufladen kann, haben im Vergleich zu Elektroautos mehrere Vorteile: Sie haben eine grössere Reichweite, ausserdem kann die bestehende Tankinfrastruktur für Benzin oder Diesel weiter genutzt werden.

Mit einem Erdgas-Elektrohybrid-Mittelklasse-Personenwagen kann laut Bach der CO₂-Ausstoss im Vergleich zu einem herkömmlichen Benziner um 36 Prozent reduziert werden und dies ohne Mehrkosten. Zwar lägen die Anschaffungskosten von Erdgas-Elektrohybriden rund 7000 Euro über denjenigen von modernen Benzin-Personenwagen, dafür könne man mit einem Erdgas-Hybridauto über 180'000 km rund 9000 Euro an Treibstoffkosten einsparen, rechnete er vor. Ein Erdgas-Bio-gas-Gemisch hat laut Bach ausserdem sehr gute Eigenschaften als Treibstoff. Die CO₂-Emissionen sind im Vergleich zu einem Benzinmotor tiefer mit 74 g/MJ bei Benzin und 55 g/MJ bei Erdgas.

Zusammen mit der ETH Zürich entwickelt die Empa derzeit einen hybridisierten VW Touran, der mit einem Elektromotor ausgerüstet ist und mit Gas betankt werden soll. Der Gasmotor soll Emissionswerte von deutlich unter 100 Gramm CO₂ pro Kilometer erreichen. Der vorgeschriebene gesetzliche Grenzwert von 130 Gramm

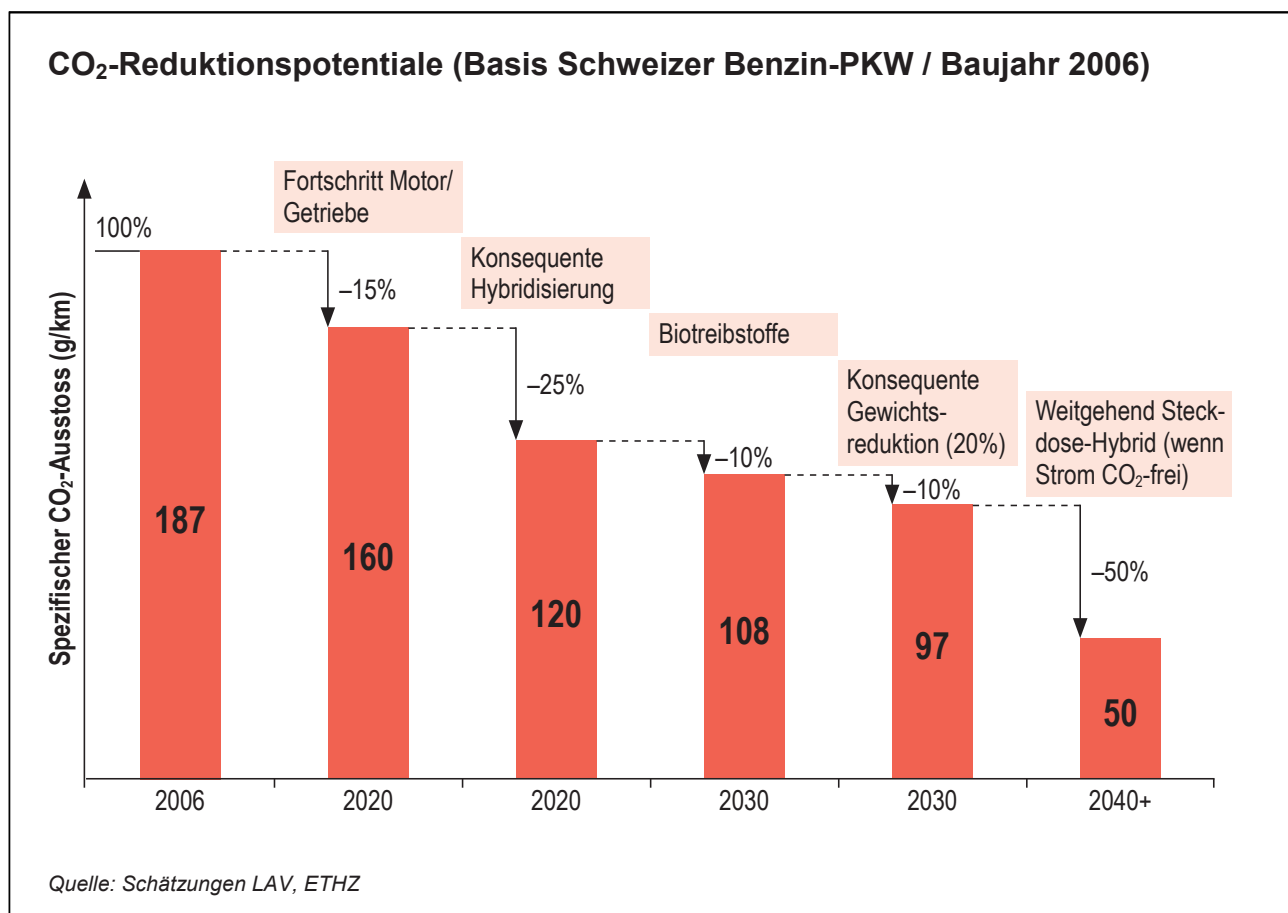
CO₂ pro Kilometer wird so unterschritten. Beim hybriden VW Touran untersuchen die Forscher die Potenziale neuer Brennvorgänge für Gasmotoren, überlegen sich, wie der thermodynamische Kreisprozess für Erdgas optimiert werden kann und legen das Fahrzeug auf Rekuperation (die Bremsenergie wird rückgespielt) aus. Damit kann die Effizienz des Motors weiter gesteigert werden.

Erdgas-Elektrohybride haben laut Bach einen weiteren Vorteil. Dem Erdgas lässt sich Biogas oder Wasserstoff beimischen. Wasserstoff lässt sich mittels Elektrolyse aus Wasser herstellen. Braucht man zum Beispiel überschüssige Wind- oder Sonnenenergie, um den Wasserstoff zu produzieren, so wird Wasserstoff sogar zum Speicher. Der Wasserstoff kann hergestellt werden, wenn die Sonne scheint, und kann dann ins Erdgasnetz eingespeist werden. Erdgasfahrzeuge mit Stahl-tanks können gemäss Bach bereits heute 2 Volumenprozent Wasserstoff nutzen, optimierte Erdgasfahrzeuge sogar bis zu 25 Volumenprozent.

3. Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb

Auch für Dietrich ist Wasserstoff ein zunehmend wichtiger Energieträger. Unter seiner Ägide hat das Paul Scherrer Institut zusammen mit der Swatch-Tochter-Gesellschaft Belenos Clean Power AG ein Brennstoffzellensystem mit Wasserstoff-technologie entwickelt und dafür im Januar 2011 den Energiepreis Watt d'Or des Bundesamtes für Energie erhalten. Das Brennstoffzellensystem hat einen sehr hohen Wirkungsgrad von 63 bis 70 Prozent (Verhältnis zwischen Energie-Output und Energie-Input). Brennstoffzellenfahrzeuge eignen sich laut Dietrich besonders für längere Strecken, mit Elektroautos lassen sich kürzere Strecken problemlos meistern. Fahrzeuge mit Brennstoffzellensystem sind zwar noch sehr teuer, Dietrich rechnet aber, dass die Kosten durch grössere Stückzahlen ab 2015 sinken werden.

In Brennstoffzellen reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff, dabei wird Strom produziert. Der Energieträger Wasserstoff muss





wie Benzin und Diesel getankt werden und ist erneuerbar, wenn er mittels erneuerbarer Energien erzeugt wird. Das gesamte Konzept der Firma Belenos (s. untenstehende Grafik «Belenos-Konzept») veranschaulicht die Zusammenhänge. In einem Eigenheim kann die Solarenergie genutzt werden, um durch Elektrolyse von Wasser Wasserstoff und Sauerstoff herzustellen. Die Energieträger werden gespeichert und getankt. Eine solche dezentrale Erzeugung ist zwar noch Zukunftsmusik, doch erlaubt ein Blick auf ein Projekt von PostAuto Schweiz eine Abstimmung mit der Realität. In Brugg baut PostAuto Schweiz eine erste Wasserstofftankstelle für Busse, die noch dieses Jahr in Betrieb genommen werden soll. Der grösste Teil des Wasserstoffs soll direkt an der Tankstelle mittels Elektrolyse aus Leitungswasser und Strom aus erneuerbaren Quellen hergestellt werden.

Die Brennstoffzellen-Technologie mit Wasserstoff hat aber auch Kritiker. Zu ihnen gehört Boulouchos. Für ihn gibt es die Antriebstechnologie der Zukunft nicht,

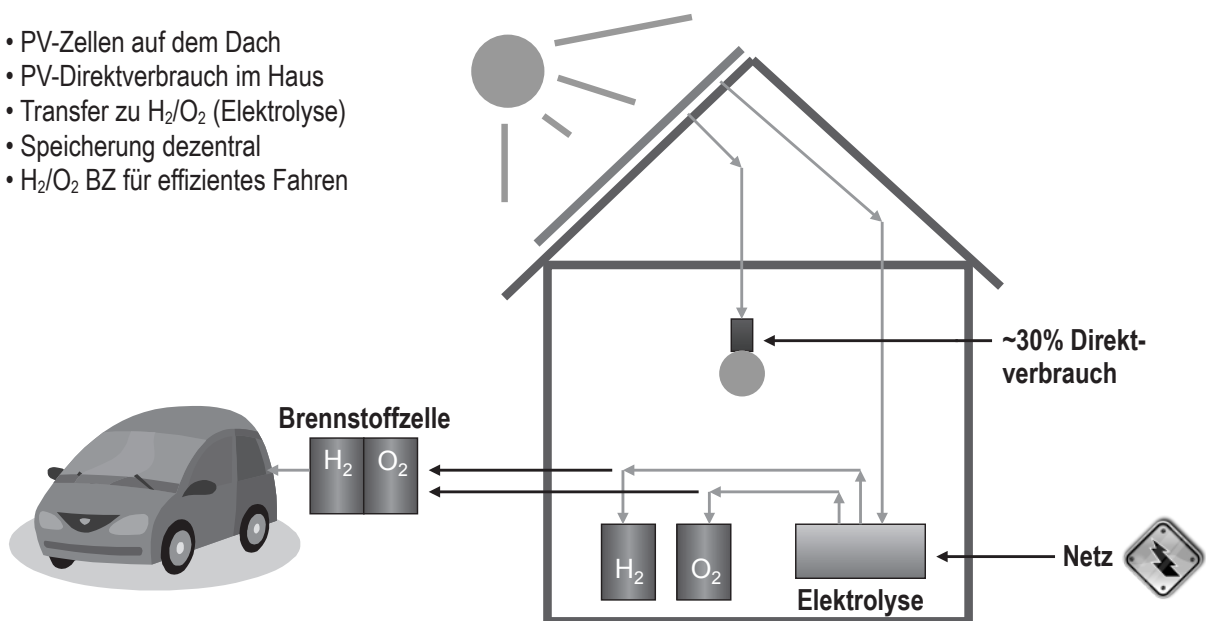
sondern nur wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche. Die Brennstoffzellen-Technologie gehört für ihn zu den weniger wahrscheinlichen. Das Problem sei nicht etwa die Energieumwandlung durch Brennstoffzellen, die sehr effizient ist, sondern der erforderliche Wasserstoff. Nicht nur ist eine neue flächendeckende Infrastruktur dafür sehr kostspielig, sondern die Effizienz der ganzen Kette «Strom-Wasserstoff-Antriebsenergie» habe einen äusserst schlechten Wirkungsgrad von etwa 30 Prozent. Der entsprechende Wert für das batteriebetriebene Fahrzeug liegt demgegenüber bei über 70 Prozent. Wegen der beschränkten Reichweite von Elektroautos sieht Boulouchos die Zukunft der individuellen Mobilität deswegen in einer Teilelektrifizierung durch einen Hybridantrieb mit vom Netz aufladbarer mittelgrosser Batterie (Plug-in-Hybrid).

4. Herkömmliche, verbrauchsärmere Verbrennungsmotoren

Lino Guzzella forscht ebenfalls seit Jahren an alternativen Antrieben für das Auto-

Belenos-Konzept: Brennstoffzellenfahrzeug mit dezentraler Speicherung

- PV-Zellen auf dem Dach
- PV-Direktverbrauch im Haus
- Transfer zu H_2/O_2 (Elektrolyse)
- Speicherung dezentral
- H_2/O_2 BZ für effizientes Fahren



Quelle: Paul Scherrer Institut

bil. Für Guzzella ist klar, dass der Verbrennungsmotor in den nächsten Jahrzehnten im Verkehr noch vorherrschend sein wird, wie er in einem Interview für das Tagesanzeiger-Magazin im Januar 2011 erklärte und gegenüber der Redaktion der Energie-Nachrichten bestätigte. Ein Grund ist die bereits erwähnte kleinere Reichweite von Elektroautos, ein weiterer die Kosten. Moderne Benzinere kosten immer noch weniger und sind laut Guzzella «praktisch emissionsfrei».

Mehr Chancen als Elektroautos rechnet Guzzella wie Boulouchos Plug-In-Hybriden ein. Plug-Ins lassen sich zu Hause aufladen. Die ersten 30 Kilometer fährt man elektrisch, danach springt der Benzinmotor ein. Der Nachteil der Hybriden sind laut Guzzella jedoch die hohen Kosten, weil die Autos zwei vollständige Motoren haben. Sein Team hat darum im Jahr 2008 einen Druckluft-Hybrid entwickelt. Dieser Hybrid hat nur einen Motor, Benzin oder Diesel, und ist deswegen billiger. Das Auto hat zusätzlich einen Drucklufttank, mit dem man Bremsenergie speichern und beim Beschleunigen wieder verbrauchen kann. So werden rund 30 Prozent Benzin gespart.

Das Auto der Zukunft ist für Guzzella leichter, kleiner, mit besserer Aerodynamik, besseren Reifen und kleinerem Motor. Unabhängig von der Antriebsart gehe es darum, den Verbrauch zu senken. Das Auto der Zukunft ist darum nicht so bequem wie heute, fährt vielleicht nur bis 140 km/h und beschleunigt weniger schnell, ist aber effizienter.

Ausblick

Künftige Autokäuferinnen und Autokäufer die auf die CO₂-Emissionen schauen, haben theoretisch also folgende Möglichkeiten:

- Sie kaufen ein Brennstoffzellenauto. Die Technologie nähert sich laut Dietrich stetig den Zielkosten und dürfte im Jahr 2015 Marktreife erlangen. Höhere Stückzahlen führen dann zu tieferen Kosten.
- Sie kaufen ein Elektroauto und schränken ihre Mobilität auf langen Strecken ein, nehmen in solchen Fällen öffentli-

che Verkehrsmittel oder haben ein Zweitauto für längere Strecken.

- Sie kaufen einen Erdgas-Elektrohybrid oder einen Benzin-Elektrohybrid. Beim Erdgas-Elektrohybrid nehmen sie in Kauf, dass die Tankstelle unter Umständen nicht gleich um die Ecke liegt.
- Sie kaufen ein kleines Auto mit einem herkömmlichen Benzin- oder Dieselmotor. Dieses ist verbrauchsärmer als das heutige Durchschnittsauto, da es leichter, weniger spritzig und aerodynamischer ist.

Gemäss Boulouchos liessen sich durch eine konsequente Hybridisierung 25 Prozent CO₂-Emissionen einsparen, wie Schätzungen der ETH Zürich (s. *Grafik CO₂-Reduktionspotenziale Seite 17*) zeigen. Nicht zuletzt spielt das Mobilitätsverhalten eine grosse Rolle. In den Worten von Bundesrätin Doris Leuthard ausgedrückt: «Wir sind ein Land, das sehr mobil ist und die Mobilität ist auch eine Wohlstandserscheinung. Tendenziell wird dieser Trend eher noch zunehmen, da die Arbeitswege länger werden, man mehr umzieht und 50 Prozent des Verkehrs Freizeitverkehr ist».

Für Bach scheidet das Einführen einer neuen Antriebstechnologie oft daran, dass es den Menschen an Überzeugung und Mut fehlt, am Kauf eines Autos mit neuer Technologie beim Autoverkäufer festzuhalten. «Wenn Sie ein Erdgasauto kaufen wollen und in eine Garage gehen, müssen Sie aufpassen, dass Sie nicht mit einem Dieselauto rauslaufen. Die Leute sind verunsichert.» Doch genau diese Hürde müssen verbrauchsärmere Autos noch nehmen, um den Sprung vom Early Adopter zum Mainstream zu schaffen.

Bei der ganzen Diskussion um die Antriebstechnologie der Zukunft dürfe schliesslich nicht ausser Acht gelassen werden, dass CO₂-Einsparungen im Verkehrssektor am teuersten sind, so das Fazit von Boulouchos. Darum müsse primär der Wärmebereich entkarbonisiert, parallel der Stromsektor auf erneuerbare Energien umgestellt werden und erst dann mache eine Elektrifizierung des Personenverkehrs wirklich Sinn. ■