

Hybride auf der Überholspur

Hybridfahrzeuge, die sowohl mit Benzin als auch mit elektrischem Strom fahren, gibt es erst seit wenigen Jahren. Jetzt kündigt sich eine neue Generation umweltschonender Automobile an.



Von Joseph J. Romm,
Andrew A. Frank und Reinhard Löser

Während Energiesparen in Europa schon lange populär ist, erfasst das Nachdenken über Energieverschwendung und Umweltschutz nun endlich auch die USA, bislang größter Energieverbraucher und Kohlendioxidproduzent der Welt. Europäische Autohersteller entwickeln seit Jahren verbrauchs- und emissionsärmere Motoren. Sie setzen dabei auf Leichtbau, verbessern mit Direkteinspritzung und Aufladung den Verbrennungsmotor und erproben regenerative Kraftstoffe sowie alternative Antriebe. Das Brennstoffzellenfahrzeug von DaimlerChrysler aus dem Jahr 1994 markierte dabei den ersten technologischen Meilenstein.

Doch die Euphorie der ersten Jahre ist inzwischen der Ernüchterung gewichen. Vor 2010 rechnet keiner mehr mit dem breiten Durchbruch der Brennstoffzellentechnologie. Stattdessen wird dem klassischen Verbrennungsmotor noch so manche Innovation zugetraut. Drei-Liter-Autos sind machbar, wissen die Ingenieure, scheitern aber an den Anforderungen der Autofahrer an Komfort, Sicherheit und Dynamik zu vertretbaren

Preisen. Lieber entscheiden sich die Europäer für den verbrauchsgünstigen Dieselmotor, der in den USA und Japan noch als behäbig, laut, stinkig und Rußschleuder gebrandmarkt wird.

Als 1995 in den USA der Benzinpreis die magische Drei-Dollar-per-Gallone-Grenze überschritt (gerade mal ein Euro pro Liter), setzte dort der Run auf eine neue alternative Antriebstechnik ein – das Hybridauto. Seine Kombination aus Verbrennungsmotor und batteriegestütztem Elektromotor hat Charme: Es offeriert sowohl günstigeren Verbrauch als auch mehr Fahrspaß; und umweltfreundlich ist es obendrein.

Noch bremst der Diesel die Verkäufe

Der Benzinverbrauch eines US-Fahrzeugs beträgt im Mittel zehn bis zwölf Liter pro 100 Kilometer, der eines europäischen Fahrzeugs liegt immerhin noch bei rund acht Litern. Dagegen begnügt sich das Vorbild eines Hybriden – der inzwischen flügge gewordene Toyota Prius, an dem sich alle anderen messen – mit knapp vier Litern. Dabei ist die Anschaffung nicht einmal kostspielig.

So verwundert es nicht, dass sich die Verkaufszahlen von Hybridautos, auch Hybride oder HEVs für *Hybrid Electrical Vehicles* genannt, in den USA von 2004

auf 2005 auf einen Schlag verdoppelten. Auch in Japan, dem Geburtsland der heutigen Hybridgeneration, gehen sie weg wie warme Semmeln. In Europa dämpfte der populäre Dieselantrieb einen raschen Schwenk in Richtung Hybride. Denn über 50 Prozent aller neu zugelassenen Autos in Europa tanken Diesel, Tendenz noch immer steigend.

Dennoch: Weltweit arbeiten inzwischen alle größeren Hersteller fieberhaft an HEVs, um den technologischen Vorsprung von Toyota, Honda & Co. aufzuholen. So haben BMW, DaimlerChrysler und General Motors 2005 eine Allianz geschlossen, um spätestens 2007 – wie auch Volkswagen – mit Hybridautos glänzen zu können. Renault und Fiat sitzen ebenfalls längst in den Startlöchern. Spätestens 2010 – so eine Studie der Unternehmensberatung Frost & Sullivan – werden alle Hersteller damit auf dem Markt sein. Es wird erwartet, dass die HEVs an den europäischen Pkw-Verkäufen einen Anteil von rund drei Prozent erreichen werden. Bereits 2015, so schätzt Julia Reuter, Analytikerin bei Frost & Sullivan, könnte die Marktsättigung bei acht bis zehn Prozent erreicht werden, wobei sich der Großteil aus »milden« Systemen (siehe Kasten S. 97) zusammensetzt. 2020 soll sogar von allen neuen



KENN BROWN

▲ So genannte Plug-in-Hybride können einfach an der Steckdose aufgeladen werden – etwa über Nacht, wenn der Strom billiger ist. Sie fahren mit Benzin- und Elektromotor.

Modellen immer auch eine Variante mit Hybridantrieb angeboten werden.

Während Autokäufer also noch die ersten benzin-elektrischen Hybridfahrzeuge beäugen, denken Forscher bereits über eine neue Generation von noch umweltfreundlicheren HEVs, so genannte Plug-in-Hybride, nach. Außer einem geringeren Kraftstoffverbrauch bieten sie dem Fahrer einen weiteren Vorteil: Ihre leistungsstarke und preiswerte Batterie wird am normalen Stromnetz aufladbar sein – mit billigem Strom über Nacht, aber auch tagsüber. Ein regulärer Tankstopp wäre nur noch hin und wieder nötig. Denkbar ist sogar, dass in der Autobatterie angesammelte überschüssige Elektroenergie gegen Vergütung ins Netz eingespeist wird, beispielsweise dann, wenn das Auto längere Zeit nicht gebraucht wird.

Zu den Vorteilen für den Verbraucher gesellten sich die volkswirtschaftlichen Effekte: geringerer Energieverbrauch für

Mobilität und Verkehr sowie insgesamt reduzierte Mengen an Treibhausgasen. Denn wenige, hocheffektive Kraftwerke emittieren derzeit zusammen weniger Treibhausgase als die Millionen von Fahrzeugen. Außerdem: Heute verfeuern die Kraftwerke überwiegend fossile Energieträger – Kohle, Öl oder Erdgas, doch im Trend liegen umweltfreundlichere Energiequellen, beispielsweise Wind-, Solar- oder Biogasenergie. Regenerative Energiequellen könnten die Kohlendioxid-Bilanz also weiter entlasten. Schließlich ließe sich das bei Kraftwerken anfallende CO₂ womöglich unterirdisch speichern (siehe SdW 3/2006, S. 72, »Können wir das Klimaproblem begraben?«).

Autos als Schluckspechte

Will man wissen, welche Entwicklung HEVs nehmen werden, lohnt ein Blick zurück in der Geschichte des Automobils. Seit über hundert Jahren dominiert der interne Verbrennungsmotor, mit Benzin oder Diesel als Kraftstoff. Immer wieder versuchten sich Ingenieure auch an Hybridantrieben, doch stets sprachen Kosten und Gewicht dagegen. Die Motorleistung konnte günstiger und technologisch einfacher mit größerem Hubraum gesteigert werden. Zudem war Benzin stets billig und überall verfügbar.

Also entwickelten sich die Autos zu Schluckspechten, vor allem in den USA.

In der ersten Ölkrise Anfang der 1970er Jahre wurde den Autofahrern bewusst, dass Größe, Gewicht und Leistung ihres mobilen Untersatzes etwas mit Verbrauch und Kosten zu tun haben. Hubraumverkleinerung war das Gebot der Stunde – also die Beschränkung auf kleinere, leistungsschwächere und demzufolge verbrauchsärmere Pkws. Während in Europa das wachsende Umweltbewusstsein sparsamere Antriebe forderte, kehrte in den USA mit dem Absinken des Ölpreises die Lust am verbrauchsfreudigen Fahren zurück. Die Autos bekamen wieder größere Hubräume und verschlangen mehr und mehr Kraftstoff. Erst die jüngste und derzeit anhaltende Energieverteuerung zwingt die Autofahrer auch dort erneut zum Spritsparen. Deswegen kämpfen die amerikanischen Hersteller mit ihren großen, schweren Pick-ups und Geländewagen, die auf 100 Kilometer bis zu 20 Liter schlucken, gerade mit massiven Absatzproblemen.

Um sowohl Kraftstoffverbrauch und Emissionen zu senken als auch gleichzeitig exzellente Beschleunigungswerte sowie ausreichende Reichweiten mit einer Tankfüllung zu erzielen, sind die Antriebe moderner Hybridfahrzeuge mit al- ▷

▷ lerneueter Computersteuerung und Leistungselektronik ausgerüstet. Sie sorgen dafür, dass der von der Batterie gespeiste E-Motor nur dann eingeschaltet wird, wenn seine Zusatzleistung wirklich gebraucht wird, beispielsweise beim Anfahren, beim kräftigen Beschleunigen oder an Steigungen. Sonst genügt ein gering dimensionierter Verbrennungsmotor.

Toyota Prius als Vorreiter

Jede Benzin sparende Technologie kann im Prinzip auch leistungssteigernd eingesetzt werden. Ebenso verbessern Hybridantriebe die Kraftstoffausnutzung, und die Elektromotoren liefern so beeindruckende Beschleunigungswerte, dass die Autohersteller sie sowohl zum Spritsparen als auch zur Leistungssteigerung verwenden. Beispielsweise verbraucht der Ford Escape Hybrid bei gleicher Fahrzeugleistung deutlich weniger Benzin. Selbst Fahrzeuge wie der Toyota Highlander Hybrid 4x4 SUV verbrauchen weniger und bieten dennoch eine höhere Leistung.

Ein größerer Speicher für Elektroenergie, der zusätzliche E-Motor und die notwendige Leistungselektronik schlagen sich unvermeidlich in einem höheren Preis für ein Hybridauto nieder. Die Zusatzkosten liegen im Bereich von 2500 bis 6000 Euro, im Mittel kostet ein HEV über 3000 Euro mehr als ein vergleichbares Benzinauto. Außerdem bringt das Paket von Elektromotor und Batterie mehr Gewicht auf die Räder; für den Honda Accord beträgt das ungefähr fünf Prozent mehr Last. Dieser Nachteil erhöht den Spritverbrauch wieder etwas.

Das gegenwärtige Paradebeispiel des Hybridautos – der Toyota Prius – ver-

braucht im EPA-Zyklus (Einstufung durch die amerikanische Umweltschutzbehörde EPA, die *Environment Protection Agency*) über 50 Prozent weniger Kraftstoff gegenüber einem Vergleichsfahrzeug mit klassischem Benzinmotor derselben Größenklasse und Leistung. Selbst wenn in Rechnung gestellt wird, dass von Land zu Land unterschiedliche Normzyklen für die Feststellung des Verbrauchs gelten, so Uwe Möhrstädt vom Automobilzulieferer Continental Automotive Systems, sind 25 bis 30 Prozent Benzineinsparung durchaus realistisch.

Angenommen, durch den kombinierten Antrieb sinkt der Benzinverbrauch von zehn auf fünf Liter pro 100 Kilometer, dann können bei einer jährlichen Fahrleistung von 15000 Kilometern und einem Benzinpreis von 1,50 Euro pro Liter über 1000 Euro gespart werden. In der Praxis dürften eher nur 500 Euro übrig bleiben. In den USA fällt der Effekt durch den geringeren Treibstoffpreis, den geringeren Anteil Stadtverkehr und die in der Regel größeren Kilometerleistungen pro Jahr etwas geringer aus. Doch auch dort bleiben im Jahr 400 bis 800 Dollar im Portmonnee. Bis zu 30 Prozent kann das Sparergebnis noch vom individuellen Fahrstil beeinflusst werden; vorausschauendes Fahren wird honoriert, Kavaliertests werden bestraft.

Die Europäer sparen vor allem mit dem Diesel. Auch dessen Kraftstoffeffizienz – neben anderen ökologischen Vorteilen, wie verringertem CO₂-Ausstoß – ist deutlich besser als der eines Benziners. Der Verbrauch liegt rund 5 bis 15 Prozent, die CO₂-Emissionen 10 bis 25 Prozent unter den Werten eines entsprechenden Benziners. Doch der Vergleich

hinkt, denn Dieselmotoren treiben meist PS- und hubraumstärkere Fahrzeuge mit größerem Gewicht an.

Die HEVs müssen sich in Europa auch mit Erdgasautos messen, die entweder Erdgas pur (»monovalent« wie beim Opel Combo CNG) oder mit Benzin in Kombination (»bivalent« wie beim Volvo Bi-Fuel) verbrennen können. Der günstige Preis und die Ausweitung des Tankstellennetzes haben in den letzten Jahren entscheidend zu ihrer steigenden Akzeptanz beigetragen. So kostet beispielsweise ein Kilogramm Erdgas derzeit rund 85 Cent, Flüssiggas sogar nur 55 Cent. Finanziell attraktiv ist Gas als Treibstoff zudem, weil örtliche Energieversorger diesen alternativen Kraftstoff fördern und bis 2020 eine Steuerbegünstigung festgeschrieben ist. Wie bei HEVs machen den Erdgasautos jedoch noch der Anschaffungspreis und die mangelnde Reichweite zu schaffen. Für 2000 bis 2500 Euro kann fast jedes Fahrzeug mit einer Gasanlage nachrüstet werden. Sie amortisiert sich ab zirka 30000 Kilometern im Jahr.

Batteriepreis mehr als halbiert

Natürlich brauchen Hybridautos einige Jahre, bis der höhere Anschaffungspreis durch geringere Ausgaben beim Tanken sowie steuerliche Vorteile für emissionsarme Fahrzeuge wettgemacht ist. Sollte der Ölpreis jedoch weiter steigen, wird sich auch der Kauf eines HEV schneller amortisieren. Sollten neuartige Produktions- und Batterietechnologien die Preise weiter senken, wird der Hybrid seine Vorteile schnell ausspielen. Immerhin hat sich der Preis für Nickel-Metallhydrid-Batterien, die bislang in HEVs eingebaut werden, von 1997 bis 2004 schon halbiert, ebenso ihr Gewicht. Dennoch: Die Batterien machen immer noch mehr als 50 Prozent der Extrakosten der heutigen Fahrzeuge aus. Allein weil Toyota in der nächsten Dekade weltweit eine Million Hybridfahrzeuge pro Jahr absetzen will, ziehen die anderen Hersteller nach. Mit einem weiteren Preisverfall durch die »economy of scale« kann somit gerechnet werden.

Hybridfahrzeuge unterscheiden sich vor allem hinsichtlich Größe und Einsatzziel der elektrischen Antriebskomponente. Ein Vollhybrid (fachlich »Full Hybrid«) nutzt ein ganzes Bündel unterschiedlicher Technologien, um den Verbrauch zu reduzieren. Eine abgespeckte Variante, der so genannte moderate oder ▷

IN KÜRZE

- ▶ Hybridfahrzeuge werden von einer **Kombination aus konventionellem Benzinmotor und Elektromotor** angetrieben. Weil die Technologie Kraftstoff spart, setzt weltweit eine stürmische Entwicklung ein.
- ▶ Noch sind Hybridantriebe **um einige tausend Euro teurer** als vergleichbare normale Autos. Ein Halter muss deswegen sein Fahrzeug einige Jahre fahren, bis sich der Zusatzaufwand amortisiert hat. Doch mit besserer Batterietechnik und größerer Stückzahl werden die Mehrkosten für einen Hybriden schnell sinken.
- ▶ **Bessere Batterietechniken** könnten sogar zur Entwicklung solcher Hybridautos führen, die sich an der Steckdose aufladen lassen (»Plug-in-Hybride«) – etwa über Nacht, um von den niedrigen Nachtstrompreisen zu profitieren.
- ▶ Weil Kraftwerke elektrischen Strom überwiegend aus heimischen Energiequellen wie Kohle, Kernenergie oder Wasserkraft erzeugen, würde die Verlagerung **von Benzin zu Elektroenergie** im Verkehr die Abhängigkeit von Ölimporten reduzieren.

Warum Hybridautos umweltfreundlich sind

Um Energie zu sparen, setzen Autoingenieure in Fahrzeugen mit Verbrennungs- und Elektromotor ganz unterschiedliche Technologien ein. Vollhybride erreichen Kraftstoffeinsparungen von

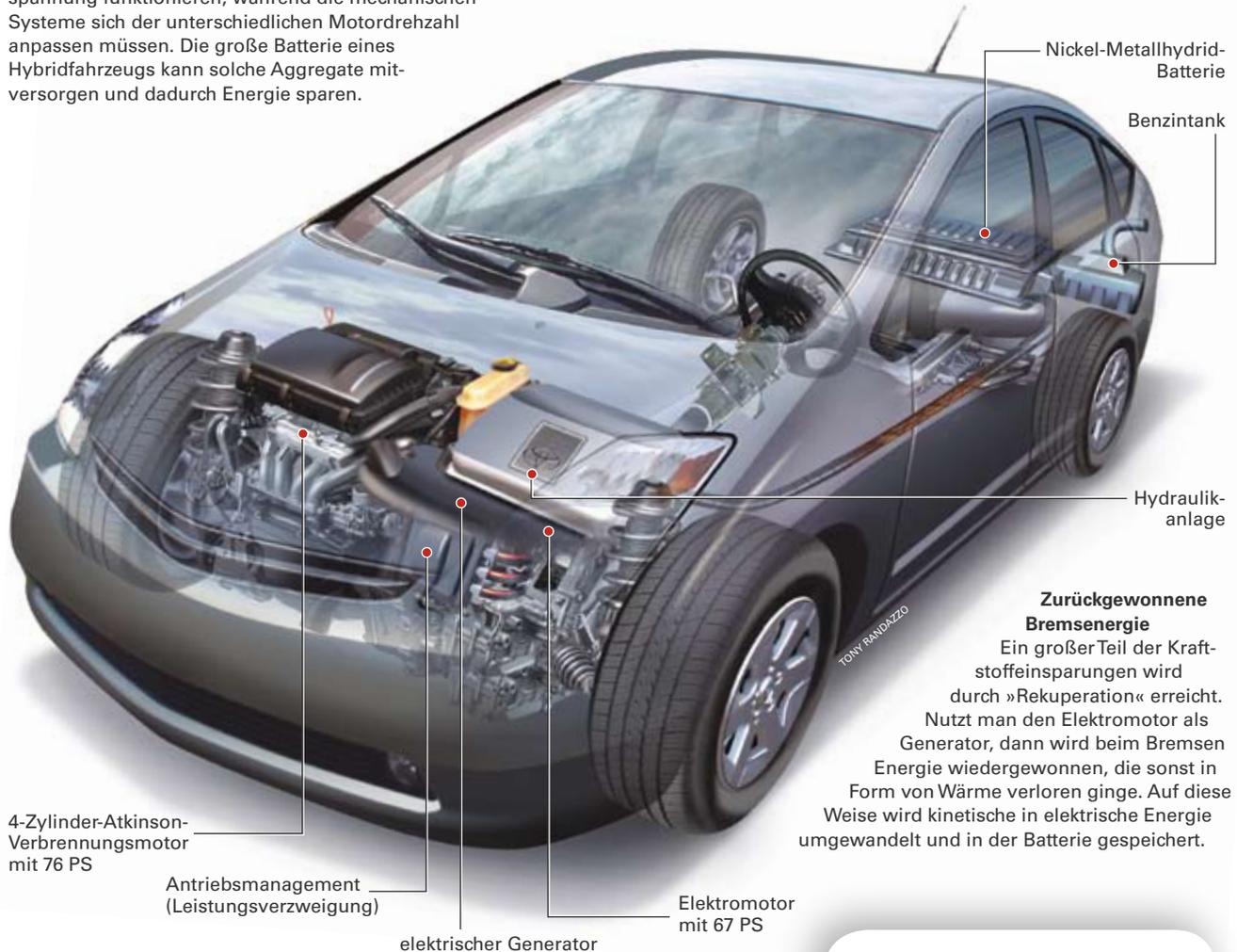
über 60 Prozent, moderate (»milde«) Hybride sparen noch 35 Prozent und bei Mikrohybriden mit Start-Stopp-Funktion liegt die Einsparung immerhin noch bei 10 Prozent.

Elektrokomponenten, die Energie sparen

In Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor werden bestimmte Aggregate – wie Klimaanlage, Lenkhilfe, Wasser- und Ölpumpe oder Gebläse – über einen Generator versorgt, der mechanisch über Riemen direkt vom Motor angetrieben wird. Sie würden am besten bei einer festen Batteriespannung funktionieren, während die mechanischen Systeme sich der unterschiedlichen Motordrehzahl anpassen müssen. Die große Batterie eines Hybridfahrzeugs kann solche Aggregate mitversorgen und dadurch Energie sparen.

Motoren, die beim Stopp abschalten

Konventionelle Fahrzeuge verbrauchen auch im Leerlauf Energie, etwa beim Halt vor Ampeln. Hybridautos verringern den Verbrauch, indem sie bei Stopps den Motor abschalten und die Verbraucher allein mit der Batterie versorgen. Auch angefahren wird mit dem batteriebetriebenen Elektromotor.



Zurückgewonnene Bremsenergie

Ein großer Teil der Kraftstoffeinsparungen wird durch »Rekuperation« erreicht. Nutzt man den Elektromotor als Generator, dann wird beim Bremsen Energie wiedergewonnen, die sonst in Form von Wärme verloren ginge. Auf diese Weise wird kinetische in elektrische Energie umgewandelt und in der Batterie gespeichert.

Anderer Motortyp

Einige Autobauer ersetzen den Ottomotor durch einen Motorentyp, der nach dem so genannten Atkinson-Zyklus arbeitet. Er hat einen höheren Wirkungsgrad, was den Kraftstoffverbrauch senkt – allerdings auf Kosten der Motorleistung. Das ist der Grund, weswegen dieser Typ nicht sehr verbreitet ist. Der Elektromotor eines Hybridautos könnte diesen Nachteil wieder ausgleichen.

Kleinerer Hubraum

Ein Verbrennungsmotor erreicht seinen optimalen Wirkungsgrad bei höheren Geschwindigkeiten und unter einer bestimmten Last. Doch im Alltag werden diese Optimalwerte nur selten erreicht. Demgegenüber spielen gerade Elektromotoren ihre Vorzüge beim Anfahren und Beschleunigen sowie bei großem Drehmomentbedarf aus, etwa am Berg. Die Kombination beider Typen erlaubt es bei gleicher oder größerer Leistung mit weniger Hubraum auszukommen, was den Verbrauch reduziert.

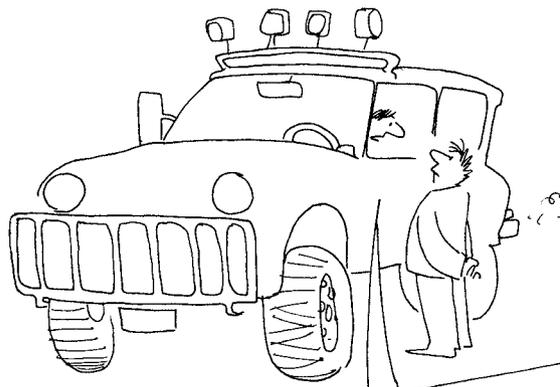
Die Zukunft: Hybride an der Steckdose

Die nächste Generation von Hybriden wird über eine größere, leichtere und bessere Batterie verfügen. Diese lässt sich etwa nachts aufladen, wenn Strom billiger ist. Mehr als die Hälfte der Leistungen beim Fahren, wie Antrieb oder Klimaanlage, könnte so günstiger und umweltfreundlicher per Elektroenergie erbracht werden.

▷ milde Hybrid (»Mild Hybrid«), sucht den Kompromiss zwischen Benzinsparen und den dadurch entstehenden Mehrkosten des Systems. Schließlich erreicht die kleine Starter-Generator-Variante (»Micro Hybrid«) eine gewisse, wenn auch nur bescheidene Verbesserung der Kraftstoffausnutzung. Sie schaltet während kurzzeitiger Stopps einfach den Verbrennungsmotor ab und fährt mit elektrischer Unterstützung wieder an. Hier kommen statt der üblichen Akkumulatoren vor allem neuartige Superkondensatoren zum Einsatz, die kurzzeitig große Energiemengen speichern und abgeben können.

Ein Vollhybrid wie der Toyota Prius kann den Benzinverbrauch um 60 Prozent oder mehr senken. Am meisten Kraftstoff wird durch so genannte Rekuperation beim Bremsen und bei Talfahrten eingespart: Normalerweise wird die kinetische Energie beim Bremsen in nutzlose Wärme umgewandelt. Doch diese Technologie nutzt anstelle der üblichen mechanischen Bremse die elektromotorische Bremse (»Generatorbremse« oder »Rekuperationsbremse«). Beim Bremsen arbeitet der sonst antreibende Elektromotor als Generator und erzeugt Strom, der den Antriebsakku nachlädt. Im Stadtverkehr mit seinem Stop-and-go lässt sich Bremsenergie damit am besten wiedergewinnen. Das gilt auch für Touren mit häufigem Wechsel zwischen Berg- und Talfahrt. Rund die Hälfte der Bremsenergie von Hybridautos lässt sich mit der heutigen Technik so schon zurückgewinnen. Der Prozentsatz wird weiter steigen, wenn noch bessere Batterien und weiter ausgereifte Technologien zur Verfügung stehen. Zum Beispiel können neue organische Materialien, wie Natriumalginat aus Braunalgen, die Energiedichte von Superkondensatoren noch um den Faktor drei steigern.

Bei Verbrennungsmotoren, wie sie in konventionellen Fahrzeugen eingebaut



werden, liegt der maximale Wirkungsgrad nur in einem sehr engen Bereich von Drehzahl und Drehmomenten. Außerhalb dieses Optimums steht im HEV als zweiter Antrieb der batteriegetriebene Elektromotor zur Verfügung. Er besitzt über einen breiten Bereich einen großen dynamischen Wirkungsgrad – als ideale Ergänzung zum Verbrennungsmotor. Den können die Ingenieure dann verkleinern und so optimieren, dass er möglichst oft mit hohem Wirkungsgrad läuft und weniger Kraftstoff verbraucht.

Sparsamer Atkinsonmotor

Hersteller wie Toyota und Ford haben den Benzinmotor, der üblicherweise nach dem Otto-Prinzip funktioniert, im HEV durch den sparsameren Atkinsonmotor ersetzt. Mit Hilfe einer elektronischen Ventilsteuerung erreicht dieser im Zylinder eine bessere Ausdehnung des Luft-Kraftstoff-Gemisches während der Verbrennung. Früher kam der Atkinson-Antrieb kaum zum Einsatz, weil der sparsame Verbrauch auch die Leistung minderte. Beim Hybrid kompensiert der Elektromotor diesen Leistungsverlust. Auf der Autobahn verbraucht ein Atkinson-Hybrid zusammen mit der zurückgewonnenen Bremsenergie sogar weniger

als ein moderner Diesel, der gemeinhin als effizientester Verbrennungsmotor gilt.

HEVs besitzen darüber hinaus einen weiteren Vorteil: Einige Aggregate an Bord herkömmlicher Autos – Klimaanlage, Lenkkraftverstärker, Wasser- und Ölpumpe oder Gebläse – werden normalerweise über Riemen direkt durch den Motor angetrieben. Das kostet Kraftstoff. Im Hybridfahrzeug könnte die große Batterie den Betrieb dieser Aggregate vollständig übernehmen und so Kraftstoff sparen. Eine elektrisch betriebene Klimaanlage verbraucht an heißen Sommertagen 20 Prozent weniger Energie als ihr motorgetriebenes Pendant.

Mit groß dimensionierter Batterie kann ein Vollhybrid sogar ausschließlich mit Elektromotor fahren und den Verbrennungsmotor völlig abschalten. Das Hybridauto mutiert so zum Elektrofahrzeug, das im Leerlauf keine und beim Rollen in niedrigen Geschwindigkeiten kaum Energie benötigt. Der gesamte Energiebedarf reduziert sich so auf ein Minimum. Eine große Bordbatterie ist nicht nur Voraussetzung für den rein elektrischen Antrieb (englisch »eDrive«), sondern ermöglicht auch das Fahren nach dem »x-by-wire« genannten Prinzip, nach dem möglichst viele Aggregate, ▷



◀ Diesel-elektrische Hybridautos, wie diese Studie »Reflex« von Ford, erreichen einen viel geringeren Benzinverbrauch als ein benzin-elektrischer Hybrid. Das Fahrzeug nutzt auch Solarflächen in den Frontscheinwerfern und Rückleuchten, um zusätzlich Bordenergie für Aggregate und Batterie zu erzeugen.

Einige Hybrid-Modelle auf dem internationalen Markt

Weltweit wird inzwischen eine ganze Palette von Fahrzeugen mit Hybridantrieb angeboten, vor allem in Japan und den USA. Vollhybrid-Fahrzeuge sparen Sprit, moderate oder »milde« Hybride bieten viel Leistung bei moderatem Verbrauch. Mikrohybride gewinnen Bremsenergie durch den Start-Stopp-Generator zurück.

Wegen der starken Diesel-Konkurrenz sind **in Europa** erst wenige Hybridfahrzeuge auf der Straße: drei Vollhybride von To-

yota sowie ein moderater Hybrid von Honda. Bald werden neue Modelle, die heute noch erprobt werden, den Marktzugang finden.

In Europa wird sich die Lage **schon 2007/08** ändern, wenn Mercedes & Co. ihre Serien-Hybride herausbringen. Dann kann man zwischen Dutzenden Modellen wählen, darunter auch Sportwagen, Minivans, Lieferautos oder sogar Motorrollern.



| Marke Modell | Antrieb Besonderheiten | Leistung* | Drehmoment* | Beschleunigung | Verbrauch** | CO ₂ -Emission Abgasnorm | Preis |
|------------------------|---|--|-----------------|------------------|-------------|-------------------------------------|--------|
| | | kW (PS) | Nm | sec bis 100 km/h | l/100 km | mg CO ₂ /km | Euro |
| Toyota Prius | Vollhybrid mit 1,3-l-4-Zylinder-Atkinsonmotor, stufenloses Automatikgetriebe, Vorderachs-antrieb, »Europas umweltfreundlichstes Auto« | 57 (78) | 115 | 10,9 | 4,3 | 104 EURO 4 (»5-Liter-Auto«) | 24 250 |
| Lexus RX 400h | Vollhybrid mit 3,3-l-6-Zylinder-Atkinsonmotor und je einem Elektromotor pro Achse, stufenlose Automatik, Allradantrieb | 155 + 123 + 50 = 200 gesamt* (211 + 165 + 67 = 272 gesamt) | 288 + 333 + 130 | 7,6 | 8,1 | 192 EURO 4 | 38 448 |
| Lexus GS 450h | Vollhybrid mit 3,5-l-6-Zylinder-Atkinsonmotor, stufenloses Automatikgetriebe | 218 (296) | 368 | 5,9 | 7,9 | 186 EURO 4 | 49 655 |
| Honda Civic IMA | Milder Hybrid mit 1,3-l-4-Zylinder-Ottomotor, stufenloses Automatikgetriebe, Vorderachs-antrieb | 70 + 15 (95 + 20) | 119 + 103 | 12,1 | 4,6 | 109 EURO 4 (»5-Liter-Auto«) | 22 900 |

In den USA sind noch weitere Modelle zu haben. Nachstehende Tabelle beruht auf amerikanischen Marktdaten.



| Marke Modell Type | Antrieb Besonderheiten | Leistung* | Drehmoment | Beschleunigung | Verbrauch | CO ₂ -Emission (spez. Jahrestonnen CO ₂ *** Sonstiges | Preis |
|-----------------------------------|--|-----------------------------------|-----------------|------------------|-----------|---|-----------|
| | | kW (PS) | Nm | sec bis 100 km/h | l/100 km | mg CO ₂ /km (t CO ₂ /a) | US-Dollar |
| Honda Insight | Milder Hybrid mit 1,0-l-3-Zylinder-Ottomotor, manuelles oder stufenloses Automatikgetriebe, Vorderradantrieb, »erstes (1999) serienreifes Hybridfahrzeug in den USA«, »energieökonomischstes Auto der USA« | 53 (71) | 50 x | 11t | 4,1 | 85 (3,5) SULEV**** | 19 330 |
| Honda Accord Hybrid | Milder Hybrid mit 3,0-l-6-Zylinder-Ottomotor, 5-Gang-Automatik, Vorderradantrieb | 188 (253) | 316 | 6,5 | 7,9 | 160 (6,6) PZEV | 30 990 |
| Toyota Camry Hybrid | Vollhybrid mit 2,4-l-4-Zylinder-Atkinsonmotor, stufenlose Automatik, Vorderradantrieb | 110 + 105 = 143 (147 + 141 = 192) | 188 + 270 | 8,9 | 6,4 | k. A. PZEV | 25 900 |
| Toyota Highlander Hybrid | Vollhybrid mit 3,3-l-6-Zylinder-Atkinsonmotor, stufenloses Automatikgetriebe, Vorderrad-/Allradantrieb | 155 + 123 + 50 (208 + 165 + 67) | 288 + 336 + 130 | 7,3 | 8,1 | 160 (6,6) | 34 610 |
| Ford Escape Hybrid | Vollhybrid mit 2,3-l-4-Zylinder-Atkinsonmotor, stufenloses Automatikgetriebe, Vorderrad-/Allradantrieb | 100 + 70 = 116 (133 + 94 = 155) | 167 | 9 | 7,6 | 151 (6,2) | 26 240 |
| Chevrolet Silverado Hybrid | Milder Hybrid mit 5,3-l-8-Zylinder-Ottomotor, manuelle Schaltung oder Automatik, Vorderrad-/Allradantrieb, zusätzlicher 120V-Generator mit 4 Steckdosen | 220 (295) | 456 | k. A. | 12,4 | 240 (9,9) | 29 900 |

ALLE MODELLE: HERSTELLERFOTOS

* Leistung und Drehmoment werden vom Hersteller oft für Verbrennungsmotor und den bzw. die E-Motoren einzeln angegeben, eine simple Addition der Werte ist jedoch wegen der unterschiedlichen Leistungsentfaltung nicht zulässig, manchmal aber mitgeteilt
 ** nach dem Neuen Europäischen Fahrzeugzyklus NEFZ. Das standardisierte festfahrogramm zur Ermittlung der Abgas- und Verbrauchsdaten erfolgt. Er besteht aus vier aneinanderreihenden Stadtfahrten (ECE) und einer Überlandfahrt (UDC) auf dem Rollenprüfstand. Nach Kaltstart und Warmlaufphase (40 sec) durchläuft der ECE vier Konstantfahrten mit einer Geschwindigkeit von 15, 32, 40 und 50 km/h zu je 195 sec. Ampelphasen mit großen Stopp-Anteilen werden ebenfalls berücksichtigt. Verschiedene konstante Geschwindigkeitsbereiche liegen dem ECUC zu Grunde – sowohl Landstraßen- als auch Autobahnanteile mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h. Insgesamt werden 1200 Sekunden gemessen.
 *** In den USA dient die genormte CO₂-Jahrestonnen CO₂ (t CO₂/a) zur Typisierung von Fahrzeugen. Sie legt eine Jahresstrecke von 15000 Meilen (entsprechend 24000 km) zu Grunde, die zu 45 % aus Autobahn- und zu 55 % aus Stadtverkehr besteht. Die derzeitigen besten Fahrzeuge geben 2,9 Jahrestonnen CO₂ ab, die schlechtesten 14,9 t.
 **** genügt den kalifornischen Grenzen für Super-Ultra-Low-Emission Vehicle SULEV beziehungsweise Partial Zero-Emissions Vehicle PZEV.

Hybride in der Realität

Die neuen benzin-elektrischen Hybridautos erreichen nicht die Verbrauchswerte, die vom amerikanischen Umweltbundesamt EPA (Environment Protection Agency) ermittelt wurden. Die Werte sind in den USA üblicherweise als Sticker an der Windschutzscheibe neuer Autos in den Verkaufsalons zu finden. Hier die Ursachen und Hintergründe.

Die neuen Benzinhybridfahrzeuge fallen durch deutlich niedrige Zahlen im Verbrauch auf. Doch einige Autokäufer beschwerten sich, dass sie die von der amerikanischen EPA gemachten Angaben zum Benzinverbrauch nicht erreichen.

Wie bei vielen anderen Fahrzeugen auch liegt der Verbrauch von Hybridfahrzeugen meist merklich höher als die EPA-Norm. Einige wesentliche Faktoren sind für diese Abweichungen verantwortlich:

- ▶ Unvollständige Testzyklen der EPA. Der Fahrzyklus, den die Fahrzeuge während der amtlichen Verbrauchsfeststellung durchlaufen, spiegelt weder die Fahrweise der individuellen Fahrer noch die jeweiligen Straßen- und Wetterbedingungen wider.
- ▶ Abhängigkeit von der Jahreszeit. Im Winter erfordert die Fahrzeugheizung, dass der Verbrennungsmotor öfter eingeschaltet werden muss, als es gemäß dem optimal gesteuerten Antriebsmanagement notwendig wäre. Das erhöht den Verbrauch.
- ▶ Besonderheiten des Hybrids. Weil Hybridfahrzeuge Bremsenergie zurückgewinnen können, hängt ihr Verbrauch entscheidend von der Fahrweise des Fahrers ab. Vorausschauende Fahrer, die ihre Fahrweise speziell dem Hybridauto anpassen, können die EPA-Verbrauchsnorm bestätigen. Aggressives Fahrverhalten kann den Verbrauch über 30 Prozent steigern.

▷ Geräte und Funktionen elektrisch-elektronisch betrieben werden. Elektronische Motor- und Ventilsteuerung entsprechen inzwischen gängiger Praxis, elektrische Bremse und elektrische Lenkung bahnen sich den Weg. Wie weit Ingenieure inzwischen vorausdenken, zeigt die Studie »eCorner« von Siemens VDO. Lenkung, Dämpfung, Bremse sowie Elektroantrieb sind darin als komplettes Paket direkt in die Räder integriert. Die Radnabenmotoren senken den Verbrauch und bieten mehr Komfort, beispielsweise durch direktes Quereinparken, und mehr Sicherheit. Am wichtigsten ist für Klaus Egger, zuständiger Bereichsvorstand von Siemens VDO Automotive, jedoch der Elektroantrieb, den er für die tatsächlich langfristige Antriebslösung hält, »mit der auch strengste zukünftige Emissionsvorschriften erfüllt werden können«. Den Hybridantrieb sieht er dabei als eine wichtige Zwischenlösung.

Moderate, »milde« Hybride, wie der für 2008 geplanten VW Touran, die Mercedes-S-Klasse oder der seit Jahren auf deutschen Straßen zu sehende Honda Civic, reduzieren mit dem in den Antriebsstrang integrierten Elektrosystem je nach Messzyklus den Kraftstoffverbrauch um etwa 35 Prozent. Hier stellt der E-Motor Antriebsleistung für Beschleunigungsphasen zur Verfügung und gewinnt Bremsenergie zurück. Er verfügt auch über die Start-Stopp-Funktion. Allein auf diese Funktion beschränkt sich der Mikrohybrid, der deswegen auch Start-Stopp-Hybrid genannt wird. Dabei schaltet sich der Verbrennungsmotor aus, wenn das Auto anhält. Ein integ-

rierter elektrischer Starter-Generator – meist von einem Superkondensator gespeist – setzt das Fahrzeug wieder in Bewegung, wenn der Fahrer aufs Gaspedal tritt. Diese Art des Hybridantriebs findet sich derzeit im Citroen C3 »Stop & Start«. Der Golf Ecomatic von 1995 besaß bereits diese Antriebsart, wurde aber nicht nachgefragt. Die Fahrzeuge, die Elektromotoren nutzen, um nur die Zusatzaggregate, nicht aber die Räder anzutreiben, erreichen immerhin noch eine zehnpromtente Senkung des Energieverbrauchs. Das gilt aber vor allem für den Stadtverkehr; auf der Autobahn verwindet dieser Vorteil.

Weniger Kohlendioxid

HEVs bieten einen wesentlichen Vorteil, der in Zukunft noch wichtiger wird: Durch ihren geringeren Benzinverbrauch stoßen sie weniger Kohlendioxid aus. Künftige Verkehrspolitik wird sich zunehmend am Klimaschutz orientieren; viele Industrieländer haben bereits strenge Obergrenzen für den Kraftstoffverbrauch vorgegeben, um solche Emissionen zu reduzieren. Die Selbstverpflichtung des Verbands der europäischen Automobilbauer ACEA etwa sieht vor, für den Zeitraum 1995 bis 2008 den Durchschnittsverbrauch und damit die Emissionen der Neufahrzeuge um 25 Prozent auf 140 Gramm CO₂ pro Kilometer zu reduzieren. Ein entsprechendes Gesetz in Kalifornien verlangt, bis 2016 bei neuen Fahrzeugen die Emission von Treibhausgasen um 30 Prozent zu verringern; eine weitere Senkung der Emissionsziele wird bereits diskutiert. Automobilbauer sehen

das kritisch: Die Forderung gilt als technisch äußerst anspruchsvoll und hängt nicht unwesentlich vom Kundenverhalten ab. Fahrer wollen nämlich auf Sicherheit, Leistung und Komfort nicht verzichten; das aber erhöht das Fahrzeuggewicht und damit den Verbrauch. Politisch flankierende Maßnahmen, etwa Steuernachlässe, Gutschriften oder Prämien würden hingegen zusätzliche Kaufanreize bieten.

Eine Lösung würden da so genannte Plug-in-Hybride bieten. Sie können wie ein normales HEV bei Bedarf längere Strecken mit Benzin fahren und schnell aufgetankt werden. Aber sie setzen vor allem auf den E-Antrieb: Sie verfügen über einen sehr großen Elektrospeicher und sind an jeder Steckdose aufladbar. Voll funktionsfähig sowohl im reinen Elektro- als auch im Hybridmodus erlauben sie die größtmögliche Einsparung von Energie und Emissionen. Weil sie Strom aus heimischen Kraftwerken tanken, bieten sie Autofahrern eine umweltfreundliche und sehr preisgünstige Antriebsenergie.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht würde das die Abhängigkeit der Staaten vom Erdöl verringern. Für diese Entwicklung

BEIDE FOTOS: DAIMLERCHRYSLER



spricht, dass die Forscher die Kapazität der Akkumulatoren weiter steigern können, während die Kosten für Batterien und elektronische Komponenten sinken. In dem Maß, wie der E-Antrieb mehr Leistung bietet, kann der Verbrennungsmotor schrumpfen. Im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Benzinmotor lassen sich mit einem Plug-in-HEV, dessen Batterie für 30 Kilometer reicht, bei einer täglichen Fahrtstrecke von 40 km rund 75 Prozent des flüssigen Kraftstoffs sparen. Bei den Kosten – auf der einen Seite angenommene 8 Liter/100 Kilometer zu einem Preis von 1,50 Euro/Liter Benzin (12 ct/km) und auf der anderen 30 Kilowattstunden/100 Kilometer zu einem Preis von 15 ct/kWh (4,5 ct/km) – wären für die Fahrtstrecke theoretisch statt 4,80 nur noch 2,55 Euro aufzubringen: eine Ersparnis von 50 Prozent.

Sogar Pendler, die Tag für Tag größere Strecken zurücklegen, würden sparen, indem sie täglich ihre Batterie sowohl am Arbeitsplatz als auch daheim an eine normale Steckdose hängen, am besten über Nacht, damit sie vom günstigen Nachtstromtarif profitieren. Diese Tarife gelten nicht nur nachts, sondern auch am Wochenende in den verbrauchsarmen Zeiten. Denkbar wäre sogar, dass Plug-in-HEVs nachts Strom aus dem Netz in der Autobatterie speichern und in Spitzenzeiten wieder dorthin einspeisen. Von den Elektrizitätswerken könnten Autobesitzer ähnlich wie private Betreiber von Windkraftanlagen dafür eine Einspeisungsvergütung, Rabatt oder eine Gewinnbeteiligung erhalten. Glaubt man den Wissenschaftlern der Universität Delaware, würden Autobesitzer damit mehr als 2500 Euro pro Jahr verdienen.

Mit diesem Betrag erscheint der höhere Preis des Hybridfahrzeugs und seiner Antriebsbatterie nicht mehr ganz so dramatisch. Man könnte sogar eine Geschäftsidee entwickeln, indem Elektrizitätswerke Plug-in-Hybride an Konsumenten oder Unternehmen vermieten, die das Auto am Netz lassen, wenn sie es

nicht brauchen. Das E-Werk hätte dann die Möglichkeit, die Vielzahl der Hybridautos als Puffer für Spitzenlasten und Überkapazitäten einzusetzen.

Dass die leistungsfähige Batterie des aufladbaren HEV in Verbindung mit einem leistungsstärkeren E-Motor einen kleineren Hubraum des Benzinmotors und aller anderen mechanisch betriebenen Aggregate erlaubt, demonstrieren Wissenschaftler der Universität von Kalifornien in Davis. Sie haben Prototypen von Plug-in-Hybriden aufgebaut, die im reinen Elektromodus nahezu 100 Kilometer schaffen. Den Verbrennungsmotor haben sie nur halb so groß wie normal ausgelegt. Acht Limousinen und Geländewagen absolvieren derzeit Tests unter praxisnahen Einsatzbedingungen.

Reichweite bis zu 1500 Kilometer?

Als erster der großen Automobilbauer brachte im letzten Jahr DaimlerChrysler ein Plug-in-Hybridfahrzeug heraus – einen Mercedes-Benz-Transporter vom Typ Sprinter (Bild unten). Der umgebaute Sprinter besitzt einen 143-PS-Ottomotor und einen 120-PS-Elektromotor mit 14-kWh-Batterie. Allein mit Letzterem schafft er über 30 Kilometer. Gegenüber einem normalen Sprinter benötigt er 40 Prozent weniger Benzin und verfügt auch noch über eine bessere Fahrdynamik. Allerdings verliert er durch das Mehrgewicht auch Transportkapazität und ist in der Anschaffung teurer.

Alles hängt also am Fortschritt der Batterietechnik. Wenn es gelänge, leichte, billige Elektrospeicher mit großer Kapazität zu produzieren, könnten Autos auf den Markt kommen, die im innerstädtischen Verkehr mit einer vollgeladenen Batterie und vollem Benzintank 1000 bis 1500 Kilometer fahren. Die Auslegung des Antriebssystems könnte sich nach den jeweiligen Anforderungen des Autokäufers richten: Langstreckenfahrer würden zu einem aufladbaren HEV mit sehr großer und teurer Batterie greifen, während die Masse sich ▷



◀ Den ersten am Netz aufladbaren Hybriden stellte Mercedes-Benz 2005 mit seinem Transporter vom Typ Sprinter vor. Hinter einer Klappe verbirgt sich der Elektroanschluss, über den die Batterie in der Nacht mit einer Stromquelle verbunden werden kann.

▷ wahrscheinlich mit einem Fahrzeug begnügt, das rein elektrisch nur 30 Kilometer weit kommt.

Die geringeren Tankkosten eines aufladbaren HEV würden seinen zweifellos höheren Preis kompensieren, wenn der stete Preisverfall bei Batterien weiter anhält. Großdimensionierte elektrochemische Akkus kosten derzeit schon deutlich unter 8000 Euro. US-Forscher erwarten, dass Nickel-Metallhydrid- oder Lithiumbatterien bald unter einen Preis von 2500 Euro fallen und genügend Energie speichern, um damit 30 Kilometer oder mehr zu fahren. Gleichzeitig dürfte die Lebensdauer einer solchen Batterie auf 15 Jahre und ihre Laufleistung auf 250 000 Kilometer gesteigert werden.

Beimischung von Biosprit

Potenzial hat auch der Verbrennungsmotor: Zum einen gilt es, den Dieselmotor mit seinen energieökonomischen Vorteilen vielfältiger einzusetzen. Nach den europäischen Herstellern reanimiert jetzt endlich in den USA auch Ford als erster der Big Three diesen sparsamen Antrieb. Zum anderen setzen die Hersteller zusätzlich zu innermotorischen Verbesserungen auf regenerative und optimierte Kraftstoffe. Ein Gemisch aus Benzin und Bioethanol kann durch leicht veränderte Motoren verbrannt werden. Spezielle Motoren benötigt hingegen der bei uns weit verbreitete Biodiesel, der vollständig aus Rapsanbau stammt und in der CO₂-Bilanz neutral ist. Weil er jedoch eine Reihe technisch-ökologischer Probleme mit sich bringt, wird er langfristig nicht mehr gefördert. Stattdessen setzt die EU auf beigemischte Biokraftstoffe, vor allem Bioethanol. Dieser wird vor allem aus Zucker- und Stärkequellen gewonnen, die nicht für die Ernährung vorgesehen sind, aber auch aus Landwirtschaftsabfällen oder speziellen Pflanzen.

Regenerative Kraftstoffe sollen bis 2010 einen Marktanteil von 5,7 Prozent an der Kraftstoffversorgung des europäischen Binnenmarkts erreichen. Die Mineralölproduzenten wurden gesetzlich verpflichtet, ihren Produkten einen wachsenden Anteil Biosprit beizumischen; derzeit sind es 4,4 Prozent. Motoren können sogar so ausgelegt werden, dass sie mit einem 15:85-Gemisch aus Benzin und Biokraftstoff klarkommen. Dann bräuchte ein Fahrzeug auf 800 Kilometer nur 25 Liter Verschnitt – 20 Liter Bioalkohol und nur vier Liter Normalbenzin.

Fahrzeug- und Mineralölindustrie untersuchen daneben auch maßgeschneiderte Kraftstoffe für weiter optimierte Motoren, um die Fahrzeugemissionen zu minimieren. Dazu gehören BTL («biomass to liquid»), GTL («gas to liquid») oder CTL («coal to liquid») genannte synthetische Kraftstoffe. Unter der Marke »SunDiesel« wurde in Deutschland von Volkswagen, DaimlerChrysler und Choren Industries ein praktisch CO₂-neutraler BTL-Kraftstoff entwickelt und erprobt. Er vermindert den CO₂-Ausstoß im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen um rund 90 Prozent. Ein Marktanteil von 20 Prozent, erläutert Herbert Kohler, Umweltbevollmächtigter und Leiter der Fahrzeugforschung von DaimlerChrysler, würde die gesamten CO₂-Emissionen des Verkehrs in Europa um 18 Prozent reduzieren. Synthetische und Biokraftstoffe sind also entscheidende strategische Schritte, um die schwindenden Erdölressourcen zu kompensieren.

Am Netz aufladbare HEVs entwickeln für Politiker, die etwas gegen die globale Erwärmung unternehmen wollen, einen ganz besonderen Charme. Plug-in-Hybride geben deutlich weniger Kohlendioxid ab, weil die andere alternative Antriebsform über Wasserstoff durch dessen Herstellung, Speicherung und Verteilung teuer und ineffizient ist. Jede halbwegs effiziente Wasserstoffwirtschaft würde eine Infrastruktur erfordern, die CO₂-freien Strom erfordert, um über Elektrolyse aus Wasser überhaupt erst einmal Wasserstoff zu produzieren.

Das flüchtige Gas muss dann transportiert, unter hohem Druck in Tanks gefüllt und dort gespeichert werden, nur um daraus in der Brennstoffzelle wieder Elektroenergie zurückzugewinnen und den Elektromotor anzutreiben. Von der gesamten regenerativen, also CO₂-frei gewonnenen Energie würden nach Elektrolyse, Transport, Füllvorgang, Speicherung und Rückumwandlung gerade noch 20 bis 25 Prozent für den Antrieb übrig bleiben. Bei Plug-in-Hybriden stünden hingegen nach dem gesamten Prozess der Übertragung von Elektroenergie, der Auf- und Entladung der Autobatterie noch knapp 80 Prozent der Ausgangsenergie zur Verfügung. Auf diese Weise kann ein Plug-in-HEV mit derselben Elektroenergie drei- bis viermal so weit fahren wie ein Brennstoffzellenauto.

Wenn sich die Verteuerung des Treibstoffs fortsetzt und die Sorgen um den

Klimawandel zunehmen, erwarten amerikanische Wissenschaftler um das Jahr 2020 herum eine Marktverschiebung hin zu den Hybridautos. Dazu meint Bernd-Robert Höhn, Maschinenbauer an der TU München: »Das Konzept der Zukunft verbindet Fahrspaß mit Sparsamkeit. Der beste Ansatz dafür ist die Hybrid-Technologie.« Fahrzeugforscher ziehen den Schluss, dass es dann nicht mehr lange dauert, bis am Netz aufladbare Hybride die alternativen Fahrzeuge dominieren. Wie rasch das geht, wird neben dem technischen Fortschritt vor allem vom Ölpreis bestimmt sowie von der staatlichen Umwelt- und Energiepolitik.

Sobald Erdöl als Primärenergie für die weltweite Mobilität zur Neige geht, wird sich als Fahrzeug der Zukunft wohl der Plug-in-Hybrid durchsetzen. Dieser Fahrzeugtyp wird einen Energiemix aus regenerativ gewonnener Elektroenergie und flüssigen Biokraftstoffen nutzen. »Angenommen, es gelingt, Leistung und Wirkungsgrad von Batterien um den Faktor fünf bis zehn zu erhöhen und diese dann auch noch einfach aufladbar zu machen«, prophezeit Siegfried Dais, Forschungschef von Bosch, »dann werden Elektrofahrzeuge sehr attraktiv.« ◀



Joseph J. Romm (links) hat am Massachusetts Institute of Technology in Physik promoviert. Zuletzt erschien sein Buch »The Hype about Hydrogen: Fact and Fiction in the Race to Save the Climate« (Island Press, 2004). **Andrew A. Frank** (Mitte) promovierte an der Universität von Südkalifornien. Heute ist er Professor für Mechanik und Luftfahrttechnik an der Universität von Kalifornien in Davis. **Reinhard Löser** (rechts) studierte Physik in Eriwan/Armenien, St. Petersburg/Russland sowie an der Humboldt-Universität Berlin, wo er auch promovierte. Nach seiner Habilitation in Volkswirtschaft an der TU Ilmenau arbeitete er als Technikjournalist, zuletzt bei DaimlerChrysler, dessen Brennstoffzellen- und Hybridtechnologie er so direkt mitverfolgen konnte. Heute lebt er als freier Technikjournalist in Stuttgart.

The Car and Fuel of the Future. Joseph Romm. Bericht der National Commission on Energy Policy, 2004. Unter: www.energyandclimate.org

Driving the Solution: The Plug-In Hybrid Vehicle. Von Lucy Sanna in EPRI Journal; Herbst 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/852735.