

VDI

Technologiezentrum

2020



2015

2010

Zukunft des Autos

Oliver S. Kaiser, Heinz Eickenbusch, Vera Grimm, Axel Zweck

Zukünftige Technologien Consulting



Im Auftrag des

VDI

Zukunft des Autos

Oliver S. Kaiser, Heinz Eickenbusch, Vera Grimm, Axel Zweck

Herausgeber:
Zukünftige Technologien Consulting
der VDI Technologiezentrum GmbH
Graf-Recke-Str. 84
40239 Düsseldorf

im Auftrag des VDI e.V.

Diese Publikation entstand im Rahmen des Vorhabens „Themenmonitoring für den VDI“ der Abteilung Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH im Auftrag des VDI e. V.

Durchführung: Oliver S. Kaiser
Dr. Heinz Eickenbusch
Dr. Vera Grimm
Dr. Dr. Axel Zweck

Kontakt: Oliver S. Kaiser (kaiser@vdi.de)

Zukünftige Technologien Nr. 75
Düsseldorf, im Januar 2008
ISSN 1436-5928

Für den Inhalt zeichnen die Autoren verantwortlich. Die geäußerten Auffassungen stimmen nicht unbedingt mit der Meinung des VDI e. V. überein.

Außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte sind alle Rechte vorbehalten, auch die des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen photomechanischen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie) und das der Übersetzung.

Titelbild: Die Studie "space up!" ist ein Beispiel für die Zukunft des Autos bei Volkswagen. Das Innenraumkonzept wird durch die Anordnung des Motors im Heck ermöglicht. Die Studie sieht auch eine Variante mit Elektroantrieb und Brennstoffzellen zur Stromerzeugung an Bord vor (Quelle: Volkswagen AG).

Zukünftige Technologien Consulting (ZTC)
der VDI Technologiezentrum GmbH

Graf-Recke-Straße 84
40239 Düsseldorf

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	7
1 EINLEITUNG	11
2 TECHNOLOGISCHE ENTWICKLUNGEN UND TRENDS	15
2.1 Karosserie	15
2.1.1 Leichtbau	16
2.1.2 Passive Sicherheit	20
2.2 Motor und Antrieb	21
2.2.1 Verbrennungsmotor	22
2.2.2 Hybridantrieb	25
2.2.3 Elektroantrieb	29
2.2.4 Kraftstoffe	32
2.2.5 Brennstoffzellen	36
2.3 Fahrwerk	40
2.3.1 Steer-by-Wire	40
2.3.2 Bremsen	42
2.3.3 Räder und Reifen	43
2.4 Elektronik	45
2.4.1 Fahrerassistenzsysteme	46
2.4.2 Displays und Beleuchtung	52
2.4.3 Software und Vernetzung	54
3 NEUE FAHRZEUGKONZEPTE	57
3.1 High-Tech Autos	57
3.2 Low-Cost Autos	62
QUELLENVERZEICHNIS	64

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Auto der Zukunft wird sparsam mit den gegebenen Ressourcen haushalten. Es soll die Umwelt so wenig wie möglich belasten. Es wird noch sicherer sein, in einer gewissen Weise sogar intelligent, da es Fahrfehler aktiv ausgleichen kann. Das Auto der Zukunft vernetzt sich mit den Fahrzeugen der Umgebung und erweitert somit seine Wahrnehmung weit über die bordeigenen Sensoren hinaus.

Der Einsatz vollkommen neuer Technologien und die Weiterentwicklung bereits etablierter Technik werden auch im Jahr 2020 nicht nur dem Zurücklegen einer Strecke von A nach B dienen. Das Auto ist und bleibt ein emotionales Produkt, dessen Modellcharakter und Design zum Lebensstil der Nutzer passen muss. Dennoch dürfen Autos, die beispielsweise besonders für Senioren geeignet sind, nicht ausdrücklich als „seniorentauglich“ bezeichnet werden. Dementsprechend wird auch das Auto der Zukunft nicht allein mit der Menge der realisierten Innovationen oder seiner Umweltfreundlichkeit für sich werben können – das Gesamtkonzept entscheidet.

Motor und Antrieb

Die Antriebstechnik ist die entscheidende Größe im Automobil, die in Zukunft die wesentlichen Veränderungen bringen wird. Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Verbrennungsmotoren scheint nicht spektakulär, hat jedoch in der nahen Zukunft Potenzial für geringeren Kraftstoffverbrauch und bessere Umweltverträglichkeit. Die Verfeinerung der Einspritztechnik steigert die Energieeffizienz und reduziert den Schadstoffausstoß. Zudem gibt es Anzeichen, dass der Ottomotor mit den positiven Eigenschaften des Dieselantriebs verheiratet werden kann.

Die Kraftstoffe Benzin und Diesel werden schon allein wegen der endlichen Erdöl-Reserven durch Alternativen ersetzt werden müssen. Die Beimischung von Biokraftstoffen zu den Erdöl-Produkten soll deswegen in der Europäischen Union von derzeit 5 % auf 20 % im Jahr 2020 gesteigert werden. Wie die nötigen Mengen an Biokraftstoffen gewonnen werden können und wie sie das Brennverhalten im Motor genau beeinflussen, ist heute noch Forschungsarbeit.

Die eingesetzte Energie effizient zu nutzen, muss nicht allein den klassischen Verbrennungsmotoren überlassen werden. Elektrische Antriebsmotoren halten Einzug ins Automobil, zuerst zur Unterstützung des Verbrennungsmotors im sogenannten Hybridantrieb, später auch als alleiniger Antrieb eines „Nullemissionsfahrzeugs“, das am Ort der Fortbewegung keine Schadstoffe mehr ausstößt. Der elektrische Antrieb hat zudem den Vorteil, ein großes Drehmoment bereits aus dem Stand generieren zu können, so dass zumindest beim Beschleunigungsverhalten nicht der Eindruck eines „Ökomobils“ mit beschnittener Fahrdynamik aufkommt. Der als elektrischer Generator genutzte Elektromotor gewinnt

beim Bremsen einen Teil der Bewegungsenergie zurück, was vor allem im Stadtverkehr die Effizienz erhöht.

Der Erfolg des Elektroantriebs steht und fällt mit der Frage der Energiespeicherung. Langlebige und leistungsfähige wiederaufladbare Batterien mit hoher Kapazität sind dafür unerlässlich. Aussichtsreicher Kandidat ist die Lithium-Ionen-Batterie, deren Energiedichte und auch Betriebssicherheit erheblich erhöht werden müssen, um im Automobil Erfolg zu haben. Ein in Deutschland entwickelter, flexibler Keramikseparator für Lithium-Ionen-Batterien verspricht in Zukunft neue Möglichkeiten.

Eine der visionären Antriebsarten ist die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger, der in einer bordeigenen Brennstoffzelle Strom erzeugt. Das „Wasserstoffauto“ ist also ebenfalls ein Elektroauto – sieht man von der Möglichkeit ab, den Wasserstoff als Kraftstoff für den Verbrennungsmotor zu nutzen. Das Brennstoffzellenfahrzeug selbst stößt neben reinem Wasser quasi keine Schadstoffe aus und wird häufig als Ultima ratio der automobilen Zukunft gesehen. Der Weg dorthin ist ein langer, denn die Brennstoffzellentechnologie ist bei weitem noch nicht alltags-tauglich und mittelfristig selbst in großen Stückzahlen nicht bezahlbar. Zudem muss eine entsprechende Wasserstoff-Infrastruktur flächendeckend geschaffen werden, was erst dann geschehen dürfte, wenn die Endlichkeit der fossilen Energieträger deutlich absehbar ist. Weiterhin ist Wasserstoff selbst nur ein Energieträger, der erst aus anderen Energieformen gewonnen werden muss.

Da elektrische Energie bereits flächendeckend in jeder Steckdose zur Verfügung steht, wäre eine sehr gute Batterie als Energiespeicher eine Alternative zum Wasserstoff. Sogenannte Superkondensatoren an Bord können die Batterie ergänzen, da sie elektrische Energie sehr schnell speichern und wieder abgeben. Auch Superkondensatoren haben noch einen hohen Entwicklungsbedarf.

Mechanik im Automobil

Die heutigen Verbrennungsmotoren werden schrittweise effizienter, was sich in sinkendem Kraftstoffverbrauch bemerkbar machen sollte. Die notwendige Motorleistung steigt jedoch, da die Fahrzeuge – von Ausnahmen abgesehen – schwerer werden. Dafür sind eine immer reichhaltigere Ausstattung und steigende Sicherheitsanforderungen verantwortlich. Hier müssen die mechanischen Komponenten für Ausgleich sorgen. Vor allem die Anforderungen an die passive Sicherheit sollen durch vermehrten Leichtbau in der Karosserie gewichtsneutral realisiert werden. Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium, Magnesium und faserverstärkte Kunststoffe können helfen, das Fahrzeuggewicht zu reduzieren. Auch Stahl hat noch Potenzial – beispielsweise durch die Neuentwicklung „Twinning Induced Plasticity-Stahl“, der bei Auffahrunfällen Verformungsenergie definiert aufnimmt.

Das Fahrwerk wird sich in Zukunft durch „by wire“-Technologien verändern. Die rein elektrische Steuerung von Lenkung und Betriebsbremse wird den Anteil von Mechanik und Hydraulik im Automobil senken. Forciert wird die Ablösung der Hydraulik zusätzlich durch rein elektrisch angetriebene Autos. Es müssen allerdings redundante Systeme geschaffen und auch für den Straßenverkehr zugelassen werden, die in allen Betriebssituationen noch Wirkung zeigen.

Elektronik

Die Fahrzeuelektronik wird immer mehr zum Schrittmacher für neue Entwicklungen. Die komplexe Steuerung von elektromechanischen Aktuatoren an den Ventilen wird den nockenlosen Motor möglich machen. Leistungsfähige Elektronik, ergänzt um entsprechende Sensorik, bringt neue Fahrerassistenzsysteme hervor. Aktive Sicherheitssysteme korrigieren den Fahrer bei Bedarf, um Unfälle zu vermeiden. Laserscanner und Kameras überwachen die Fahrzeugumgebung, um bei Kollisionsgefahr während eines Spurwechsels zu warnen. Fahrzeugeigene Kameras mit dreidimensionaler Wahrnehmung werden in Zukunft sogar den Querverkehr an Kreuzungen und Einmündungen überwachen und in Echtzeit beispielsweise vor kreuzenden Fahrradfahrern warnen, die dem Fahrer selbst im Augenwinkel noch nicht auffallen.

Insgesamt wird die Zahl der Fahrerassistenzsysteme zunehmen, die in das Lenk- und Bremsgeschehen eingreifen. Das Fernziel ist das autonome Auto, dessen Fahrer sich während der Reise ganz anderen Dingen widmen kann als der Fahrzeugsteuerung. Doch bevor diese Vision Realität wird, müssen noch komplexe Fragen der Fahrpsychologie – wie verhält sich ein derart „bevormundeter“ Fahrer – sowie rechtliche Fragen geklärt werden – wer trägt bei Fehlentscheidungen der technischen Systeme die Verantwortung.

Ein Autofahrer überblickt derzeit im Sinne des Wortes die unmittelbare Fahrzeugumgebung. Dabei kann er sich etwa durch Nachtsichtgeräte oder die erwähnten Laserscanner und Kameras unterstützen lassen. Verkehrstelematik wie Verkehrsfunk und die über einen Datenkanal verbreiteten und vom Navigationssystem ausgewerteten Staumeldungen erweitert die Wahrnehmung auf Autobahnen und Bundesstraßen in der weiteren Umgebung. Was jedoch fehlt, ist eine Informationsquelle über das Verkehrsgeschehen der näheren Umgebung, und das für jede Straße. Hier setzt die Car-to-Car-Kommunikation an, die von einzelnen Fahrzeugen ermittelte Informationen an die Autos der Umgebung per Funk verbreitet, ohne dabei eine zentrale Instanz wie eine Verkehrsleitstelle zu benötigen. So können Meldungen über plötzlich auftretendes Glatteis einige hundert Meter voraus oder eine Verkehrsstockung hinter einer Kuppe oder Kurve an andere Verkehrsteilnehmer übermittelt werden. Grundsätzlich stellt sich bei der vernetzten Fahrzeugkommunikation die Frage, ob eine stets angepasste Fahrweise nicht dieselben positiven Effekte hätte. Die techni-

sche Weiterentwicklung lässt sich jedoch besser beherrschen als das Fahrverhalten der allzu menschlichen Verkehrsteilnehmer.

Fazit

Das einzelne „Auto der Zukunft“ wird es nicht geben. Schon die Konzeptstudien der Automobilhersteller zeigen eine große Bandbreite, vom Kleinstwagen, der beinahe „von Natur aus“ umweltfreundlich ist, bis hin zu Luxus-Limousinen, deren Verbrauch auf das Niveau von Mittelklassefahrzeugen reduziert wird. Gerade im Bereich des Kraftstoffverbrauchs wird die Entwicklung langsam vorangehen, da Nebeneffekte die Fortschritte in der Motorentechnik aufheben. Da sowohl die deutschen als auch die europäischen Hersteller ihre Selbstverpflichtungen zu einem sinkenden Kraftstoffverbrauch in den letzten zehn Jahren nicht erfüllen konnten, plant die Europäische Union, die damals gesteckten Ziele nun für das Jahr 2015 verbindlich vorzuschreiben.

Neben den kontinuierlichen Verbesserungen bleiben die Innovationen, die nicht allein in der Fahrzeugtechnik ansetzen, sondern ein Umdenken erfordern. Für die europäischen Autohersteller ist der Hybridantrieb einer der ungeliebten, aber angestrengt verfolgten Wege. Der nächste Schritt ist der Einsatz einer Brennstoffzelle anstelle des Verbrennungsmotors, womit allerdings der Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur verbunden wäre. Bevor dies geschieht, müssen sich die Rahmenbedingungen – zum Beispiel Preis oder Verfügbarkeit von Erdöl- und Biokraftstoffen – grundlegend verändern.

Sollte es in den nächsten Jahren tatsächlich beachtliche Fortschritte in der Batterietechnik geben, wäre es möglich, die aufwändigen Konzepte der Vollhybrid- als auch Brennstoffzellenfahrzeuge zu überspringen. An deren Stelle könnten rein elektrisch angetriebene Autos stehen, deren Batterie über die Steckdose oder, bei Bedarf, während der Fahrt durch einen stets bei optimalem Wirkungsgrad arbeitenden Verbrennungsmotor an Bord geladen wird. Ob die etablierten Automobilhersteller diesen für sie ungewohnten Entwicklungsschritt verfolgen werden, wird sich zeigen. Er wäre attraktiv, da die politisch angestrebten CO₂- und Schadstoffgrenzwerte für die Emission des Fahrzeugs selbst gelten. Elektrisch angetriebene Autos in der Modellpalette senken wirkungsvoll die durchschnittlichen Emissionen der gesamten Flotte eines Herstellers.

Wesentliche Impulse für die Zukunft des Automobils können in den nächsten Jahren also durchaus auch aus Feldern kommen, die nicht der klassischen Automobiltechnik zugerechnet werden. Kontinuierliche Optimierung des Bekannten und die Offenheit für Neues wird die Automobilität sichern.

1 EINLEITUNG

„Die Zukunft des Autos“ ist ein öffentlicher Statusbericht des Verein Deutscher Ingenieure (VDI), der die aktuellen Trends der nächsten zehn bis fünfzehn Jahre mit ihren verschiedenen Dimensionen aufzeigt. Mit dem Begriff „Auto“ wird das Fahrzeug als solches verstanden. Nicht berücksichtigt werden Verkehrskonzepte, die die Rolle des Autos in der dazugehörigen Infrastruktur beschreiben, etwa die Erhöhung der Verkehrseffizienz durch telematische Systeme oder die Kombination von Individualverkehr mit öffentlichen Verkehrsmitteln. Auch wird der Themenbereich Automobilherstellung und Maschinenbau nicht behandelt.

Statusbericht zeigt aktuelle Trends der Automobiltechnik

Die Automobilindustrie lebt von den Transport- und Mobilitätsbedürfnissen der Gesellschaft, ihre Existenzgrundlage ist der Verkehr. Jeder siebte Arbeitsplatz in Deutschland hängt heute direkt oder indirekt vom Automobil ab, zudem gilt die Automobilbranche nach wie vor als Treiber und Vorreiter des technologischen Fortschritts in Deutschland – deutsche Automobiltechnik gehört zur Weltspitze. Der reibungslose Verkehr wiederum stellt eine fundamentale Voraussetzung für das Funktionieren von Wirtschaft und Gesellschaft dar, er gewährleistet die notwendige Mobilität. Die Verkehrsmengen der einzelnen Verkehrsträger sind eng an die Entwicklung des Sozialproduktes gekoppelt. Ein funktionierendes Verkehrssystem und effiziente Transportabläufe sind aber die Basis für das Florieren der drittgrößten Branche in Deutschland, der Logistikbranche. Mit rund 2,6 Mio. Arbeitsplätzen wird ein branchenübergreifender Umsatz von mehr als 150 Mrd. EUR pro Jahr erwirtschaftet, der rund 7 % des Bruttoinlandsprodukts darstellt. Für die Zukunft werden jährliche Wachstumsraten des branchenübergreifenden Umsatzes von bis zu 6 % erwartet. Vor dem Hintergrund, dass die Bedeutung Deutschlands als Transitland in Europa weiter zunimmt, gilt es in Zukunft um so mehr, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Fahrzeug- und Verkehrsindustrie zu verbessern, die Belastungen durch den Verkehr zu verringern sowie ein angemessenes und sicheres Mobilitätsangebot für die gesamte Bevölkerung sicherzustellen.

Automobilindustrie und Gesamtwirtschaft hängen eng zusammen

Insgesamt wird sich nach einer Schätzung der Vereinten Nationen der weltweite Fahrzeugbestand bis zum Jahr 2030 von derzeit 750 Millionen auf rund 1,5 Milliarden PKW und Nutzfahrzeuge verdoppeln. Treibende Kraft dieser Entwicklung ist die weiter wachsende Nachfrage nach Automobilen in schnell wachsenden Märkten wie China, Indien, Korea, Brasilien oder Russland. Der zunehmende Wohlstand der Menschen in diesen Regionen wird dazu führen, dass auch sie die Möglichkeiten zu mehr individueller Mobilität nutzen wollen, dazu mehr Fahrzeuge kaufen und diese immer häufiger benutzen werden. [Duy 04]

Fahrzeugbestand wird sich verdoppeln

Das Auto greift in die Umwelt ein und muss sich anpassen

Darüber hinaus werden zunehmend gesellschaftspolitische Anforderungen an die Verkehrsträger gestellt wie z. B. ökologische Verträglichkeit, Energie- bzw. Ressourceneinsparung, Gesundheitsverträglichkeit, Sicherheit und Wiederverwertbarkeit. Durch den Einsatz neuer Technologien soll der durchschnittliche CO₂-Ausstoß von Neufahrzeugen europäischer Produktion bis zum Jahr 2015 von derzeit über 160 auf 125 Gramm Kohlendioxid pro Kilometer abgesenkt werden. Dazu sollen auch Biokraftstoffe beitragen, deren Anteil bis zum Jahr 2020 auf 20 % des gesamten Kraftstoffverbrauchs im Transportwesen steigen wird. [Hön 08]

Sicherheitsanforderungen kontraproduktiv zum Kraftstoffverbrauch

Bei der Entwicklung eines innovativen Autos der Zukunft ist eine integrale Betrachtungsweise erforderlich, da komplexe Zusammenhänge mit teilweise widersprüchlichen Anforderungen vorliegen. So werden hohe Sicherheit, hoher Komfort und hohe Qualität bei möglichst geringem Fahrzeuggewicht und geringstmöglicher Abgas- und Geräuschemissionen bei unverändert hoher Transportleistung gefordert. Aus diesem Grund hängt die Optimierung eines jeweiligen Ziels innerhalb des Zielbündels immer von mehreren miteinander verknüpften Fahrzeugteilentwicklungen ab.

Das Fahrzeug der Zukunft ist Teil eines intelligenten, sich selbst organisierenden Verkehrssystems und damit aktives Element des Verkehrsmanagements. Künftig können Fahrzeuge miteinander kommunizieren und sich mit der Verkehrsinfrastruktur austauschen. Damit erhöht sich nicht nur die Sicherheit im Verkehr, es eröffnen sich auch neue Wege, um den Verkehrsfluss zu erhöhen und die vorhandene knappe Infrastruktur besser zu nutzen. Die Sicherheitstechnik im Auto der Zukunft wird ihren Teil dazu beitragen, die „Vision Zero“ möglich zu machen. Vision Zero bezeichnet die Vorstellung, dass die Zahl der Verkehrsunfallopfer Null werden kann. In Schweden, den Niederlanden und der Schweiz gibt es bereits Programme mit diesem Ziel, in Deutschland tritt der Verkehrsclub Deutschland dafür ein. [VCD 06]

Technik muss helfen, Nutzen und Einnahmen zu erzielen

Trotz aller Begeisterung für innovative Autos darf nicht übersehen werden, dass sich diese Innovationen auch verkaufen lassen müssen, um den Kundenwünschen tatsächlich gerecht zu werden, und folglich kein Selbstzweck sind. „Technisch machbar“ ist also bei weitem nicht gleichzusetzen mit „kommerziell nutzbar“. Insbesondere in wirtschaftlich unsicheren Zeiten und Situationen und bei steigenden Fahrzeug- und Kraftstoffpreisen achtet der Kunde auf das Preis-Leistungsverhältnis und die Gesamtkosten (Total Cost of Ownership) des Fahrzeugs.

Aber auch für Automobilbauer und Zulieferer sind Innovationen eine zweischneidige Sache: ein Fünftel der Forschungs- und Entwicklungsausgaben fließt in Innovationen, die lediglich gesetzliche Vorgaben erfüllen, ein weiteres Fünftel der Ausgaben ist nötig, um die Serienfertigung zu realisieren und 40 % des Budgets werden sich niemals rentieren, da die Entwicklung nicht in Serienfertigung gelangt oder unzureichend nachgefragt wird. Es bleiben also lediglich 20 % der Investitionen in In-

novationen, die langfristig profitabel sind. Bei diesen Innovationen ist die Funktion sinnvoll, eine hohe Kundenakzeptanz vorhanden, gesetzliche Regelungen werden erfüllt und der Preis ist nicht zu hoch. [Dan 07]

Diese Studie zeigt im folgenden Kapitel technologische Entwicklungen und Trends in den wesentlichen Fahrzeugkomponenten auf. Einige der vorgestellten Komponenten sind bereits in ausgewählten Modellen der Oberklasse eingebaut und werden langfristig den Massenmarkt erreichen und beeinflussen. Die Mehrzahl der Komponenten ist in der Entwicklung und hat die Forschungslaboratorien noch nicht verlassen.

Technologische Entwicklungen in einzelnen Komponenten

Kapitel 3 demonstriert Fahrzeugkonzepte, die zwei verschiedene Schwerpunkte repräsentieren. Zum einen stellt das Kapitel „Low-Cost Autos“ vor, die neue Absatzmärkte in Schwellenländern erobern sollen. Zum anderen steht der technologische Ansatz im Vordergrund, der in einem einzelnen Fahrzeug möglichst viele Neuerungen vereint. Durch den Einsatz bisher nicht realisierter Technologien, die eine veränderte Nutzung des zur Verfügung stehenden Raumes erlauben, erhöhen sich für die Designer die Freiheitsgrade. Daher sehen manche Konzeptfahrzeuge ungewohnt futuristisch aus.

Fahrzeugkonzepte für hoch technisierte und preiswerte Autos

2 TECHNOLOGISCHE ENTWICKLUNGEN UND TRENDS

Eine der Herausforderungen für das Auto der Zukunft ist die Entwicklung umweltfreundlicher Fahrzeugtechnologien. Dazu gehören neben der Leichtbauweise sowohl neue Antriebskonzepte wie Hybridantriebe und Brennstoffzellen als auch alternative Treibstoffe wie Wasserstoff und biogene Treibstoffe. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Entwicklung innovativer Fahrerassistenzsysteme, die das Autofahren komfortabler und vor allem sicherer machen sollen.

Umweltfreundlichkeit
als zentrale Herausforderung

2.1 Karosserie

In den vergangenen 15 Jahren hat sich das Gewicht eines durchschnittlichen Familienautos um etwa 30 % erhöht. Die Auswertung der PKW-Neuzulassungen in Österreich zeigt allein zwischen den Jahren 2000 und 2005 eine Zunahme des durchschnittlichen Fahrzeuggewichts von 11 %. Moderne Autos werden durch immer neue elektronische Komponenten, vor allem in der Sicherheitstechnik (z. B. ABS, ESP, Gurtstraffer, Aktivlenkung oder Vierradantrieb) und durch zunehmende Komfortausstattungen (Klimaanlage, elektrische Fensterheber und Sitzverstellungen) trotz Gewichtseinsparungen an Motorblöcken und Karosserien aus Leichtmetalllegierungen immer schwerer. Doch je schwerer ein Wagen ist, desto mehr Kraftstoff verbraucht er und desto mehr Schadstoffe stößt er aus. Als Faustregel gilt, dass ein um 100 kg leichteres Fahrzeug den Kraftstoffverbrauch um ca. 0,5 l auf 100 km reduziert. Bis 2010 soll das Gewicht um 17 % oder durchschnittlich 250 kg je Fahrzeug abnehmen. [VDI 05]

Fahrzeuggewicht
steigt seit Jahren an

Der Zielkonflikt zwischen immer mehr gewichtssteigernder Sicherheits- und Komforttechnik und einer generellen Gewichtsabnahme ist durch den Einsatz gewichtssparender Werkstoffe in Kombination mit angepassten Konstruktions- und Fertigungstechniken im Automobilbau lösbar. Die Wahl des Werkstoffs hängt jedoch stark von den teils komplementären Materialeigenschaften wie Gewicht, Steifig- und Dehnbarkeit, Bruchgrenzen, Fertigungs- und Verarbeitungseigenschaften, Verfügbarkeit, Recyclingfähigkeit und vor allem den Kosten ab.

Gewichtersparnis
durch neue Werkstoffe
und Konstruktionsverfahren

Neue Fügeverfahren im Automobilbau ergänzen klassische (Laser-) Schweißverfahren und ermöglichen das Zusammenfügen unterschiedlicher Werkstoffe. Moderne Klebtechniken werden für Stahl, Aluminium, Magnesium, Glas, Kunststoffe, Faserverbundwerkstoffe sowie Hybridmaterialien entwickelt und erhöhen damit auch die Torsionssteifigkeit von Karosserien, mindern Vibrationen und schützen vor Korrosion.

Aluminium, Magnesium,
Faserverbundmaterialien

2.1.1 Leichtbau

Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium, Magnesium und Faserverbundmaterialien sollen bei der Gewichtsreduzierung helfen – und das ohne Einbußen bei Sicherheit, Komfort und Zuverlässigkeit, bei schnelleren Fertigungszeiten. Erfolgreiche Leichtbaukonzepte beruhen auf spezifischem Know-how in vielen Bereichen der Werkstoff- und Ingenieurwissenschaften und „systemischem“ Denken. Robuste Prozesse im Leichtbau gehen mit einer gezielten Werkstoffforschung, Auslegung, Prozessentwicklung und Verfahrensqualifizierung und mit begleitender Modellbildung und Simulation einher.

Als ein Schlüssel zum Superleichtbau wird die Multi-Material-Bauweise gesehen, bei der für jedes einzelne Element des Fahrzeugaufbaus derjenige Werkstoff ausgewählt wird, der die gestellten Anforderungen bei minimalem Gewicht erfüllt. Bei Kleinstserienfahrzeugen ist eine solche Bauweise bereits verwirklicht worden, während in der Groß- und Mittelserie lediglich Ansätze einer derartigen konsequenten Kombination unterschiedlicher Materialien in der Karosseriestruktur existieren. Die Aufgabe, eine Multi-Material-Bauweise zu entwickeln, die sich auch in der Großserie wirtschaftlich darstellen lässt, wird derzeit in verschiedenen Forschungsprojekten bearbeitet. [Sah 06]

Aluminium ist klassischer
Werkstoff für den Leichtbau

In den vergangenen Jahren haben die Autobauer vor allem auf das Leichtmetall Aluminium gesetzt. Denn der Werkstoff ist leicht und rostet nicht. Wurden im Jahr 2000 noch etwa 100 Kilogramm Aluminium in einen Wagen verbaut, stieg der Anteil nach Angaben der European Aluminium Association auf 132 kg im Jahr 2005. Dass der Werkstoff immer häufiger im Fahrzeugbau eingesetzt wird, ist auch auf die Lasertechnik zurückzuführen. Es wurden vor Jahren Verfahren entwickelt, die das Laserschweißen von Aluminiumbauteilen ermöglichen. [EAA 07]

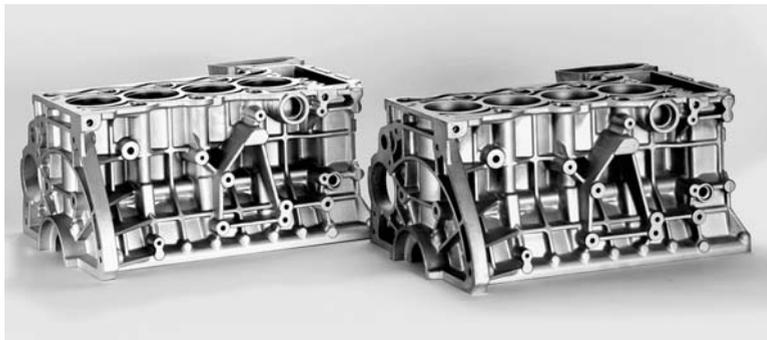


Abb. 1: Kurbelgehäuse aus Magnesium (rechts), bis zu 25 % leichter als vergleichbare Aluminiumgehäuse (links) (Quelle: BMW Group)

rigeren Temperaturen weniger und ist weniger porös. Magnesium-Thixomoulding ist zudem umweltfreundlicher als Druckguss, weil es weniger Heizenergie benötigt. Aluminium wird noch nicht durch Thixomoulding bearbeitet, da es sich in flüssigem Zustand aggressiver verhält als Magnesium und daher nur mit teuren Keramikwerkzeugen bearbeiten lässt. [Tec 07]

Faserverstärkte
Kunststoffe im Flug-
zeugbau

Auch Faserverbundwerkstoffe wie faserverstärkte Kunststoffe können zum Leichtbau beitragen. Das ursprüngliche Einsatzgebiet der Faserverbundwerkstoffe ist vor allem die Luft- und Raumfahrt. Aktuelle Anwendungsbeispiele im Flugzeugbau sind der Airbus A 380, der zu rund 35 % aus diesen Leichtbau-Werkstoffen besteht, und das neue Langstreckenflugzeug Boeing 787 „Dreamliner“ mit einem Faserverbundwerkstoffanteil von bis zu 50 %. Der Ersatz des konventionell verwendeten Aluminiums im Rumpf und Flügel führt zur Gewichtsreduzierung und damit zu einem geringeren Treibstoffverbrauch – im Falle der Boeing 787 sind es ca. 20 % weniger Kraftstoffverbrauch.

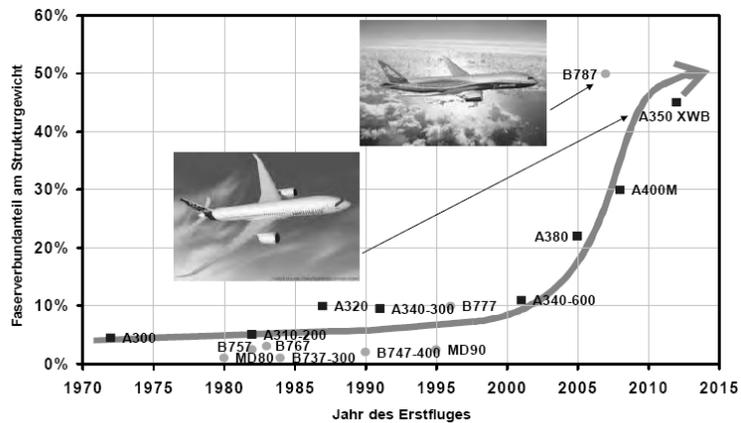


Abb. 3: Einsatz von Faserverbundwerkstoffen am Beispiel Flugzeugbau
(Quelle: DLR Center of Excellence Composite Structures)

Neue Fertigungsverfahren bringen faserverstärkte Kunststoffe ins Automobil

In der Serienproduktion von PKW sind die faserverstärkten Kunststoffe jedoch nur selten zu finden, denn die Produktion des Werkstoffs ist sehr aufwändig und teuer. Doch neue Fertigungsverfahren machen das Material auch für den Einsatz in Klein- und Mittelklassewagen interessant. Für den 3er-BMW wurde in einem Pilotprojekt ein Trägerteil aus „Tailored“-Langfaser-verstärktem Thermoplast (LFT) gefertigt. Das versteckte Bauteil trägt Scheinwerfer, die Motorhaubenverriegelung und die Lüfterzarge. Die Komponente ist 30 % leichter als ihr Pendant aus Aluminium. [FhG 07]

Weitere Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen werden für zukünftige Fahrzeuggenerationen entwickelt. Eingesetzt wird kohlefaserverstärkter Kunststoff bereits im BMW M3 CSL. Dort senkt das Material deutlich das Gewicht des Sportwagens – der M3 CSL bringt mit 1385 Kilogramm

immerhin 110 Kilogramm weniger auf die Waage als sein Serien-Gegenstück. [Ros 03]

BASF arbeitet bereits daran, Karosserieteile vollständig aus Kunststoff zu fertigen, die nicht mehr lackiert werden müssen. Beschichtete oder eingefärbte Kunststofffolien sorgen dafür, dass die Karosserieteile aus Kunststoff nicht von Stahlblech zu unterscheiden sind. Beispiel Smart: Sein Dach ist das erste große Außenteil einer Karosserie, bei dem Glasfläche und Kunststoffteile aussehen wie aus einem Guss. Das Kunststoffdach ist um die Hälfte leichter als ein vergleichbares Bauteil aus Stahlblech. [BAS 02]

Karosserieteile aus Kunststoff sind transparent oder wirken wie lackiert



Abb. 4: Das homogen und hochwertige Erscheinungsbild des Dachmoduls des Smart wird möglich durch mehrschichtige Kunststofffolien (Quelle: BASF)

Studien gehen davon aus, dass im Jahr 2010 jedes Auto zu 19 bis 20 % aus Kunststoff bestehen wird, heute sind es bereits etwa 13 %. [Nie 06]

Eine weitere Option für den Leichtbau sind Metallschäume. Forscher des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung in Bremen erfanden ein Verfahren, das aus Metallpulvern eine poröse, aber dennoch harte Schaumstruktur macht. Entscheidend ist dabei eine Art „Metallhefe“, eine spezielle Metall-Wasserstoffverbindung. Sie sorgt dafür, dass sich das Pulver in einem Ofen schaumartig aufbläht. Dafür muss das Treibmittel vorher mit dem Metallpulver vermischt und in einer Presse verdichtet werden. Größe und Anzahl der Poren variieren je nach Treibmittelgehalt und Aufschäumdauer. Im Extremfall bestehen 90 % des Gebildes aus Luft und 10 % aus Metall, z. B. Aluminium. Ein fertiger Materialklotz dieser Art ist leichter als Wasser und lässt sich wie Holz sägen. Genauso gut kann ein Nagel hineinschlagen werden. Diese Metallschäume können beispielsweise zum Gewicht sparenden Versteifen von Strukturen im Automobilbau verwendet werden. Angenehmer

Metallschäume enthalten Luftporen und sind stabil

Nebeneffekt: „zelluläres Aluminium“ hat durch seine Hohlräume sehr gute Dämpfungseigenschaften, die Schalldämpfung ist fünf bis acht mal höher als bei normalem Aluminium oder bei Stahl. [Bau 02]

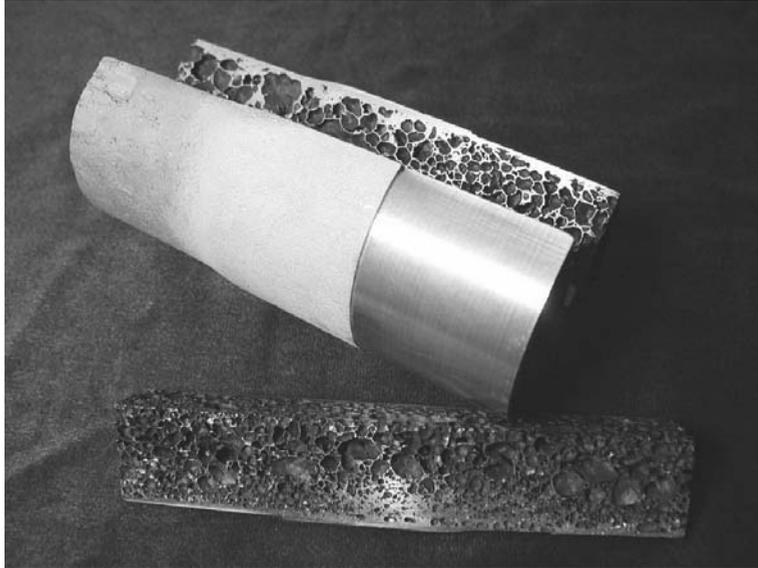


Abb. 5: Zylinder aus Metallschaum: unbeschichtet, beschichtet und mechanisch nachbearbeitet (Quelle: Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V., AiF)

2.1.2 Passive Sicherheit

Jedes Jahr ereignen sich in Deutschland mehr als 200 000 Autounfälle. Mit hohem technischem Aufwand arbeiten die Hersteller an neuen Technologien, die Fahrer und Mitfahrer besser schützen sollen. Neben der Fahrzeugkonstruktion spielt dabei der Karosseriestahl eine zentrale Rolle. Bei einem Unfall wirken enorme Kräfte auf Auto und Insassen ein. Indem sich der Motorraum verformt, fängt er einen großen Teil der Aufprallenergie ab und schützt dadurch die Fahrgäste in der Fahrgastzelle. Die Karosserie muss dabei dehnbar und trotzdem fest sein, zwei Eigenschaften, die sich eigentlich widersprechen. Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf haben aus einer Mischung aus Mangan, Silizium, Aluminium und Eisen einen neuartigen Stahl entwickelt, der beide Funktionen erfüllt. Dieser TWIP-Stahl (Twinning Induced Plasticity) aktiviert bei Aufprall seine Dehnungsreserve und beginnt sich zu verformen. Jeder Punkt des Stahls dehnt sich dabei nur ein bestimmtes Stück. Dann verfestigt er sich wieder und leitet den Rest der Energie an das umgebende Material weiter. Dadurch breitet sich die Energie gleichmäßig über die ganze Fläche des Metalls aus. Die Last des Aufpralls verteilt sich. In einigen Jahren soll der neue Stahl in

Unfallfolgen lassen sich durch Spezialstähle mindern

die Kotflügel und die Seitentüren von Autos eingebaut werden. Diese Bereiche trifft es bei einem Unfall überdurchschnittlich häufig. [MPG 07]

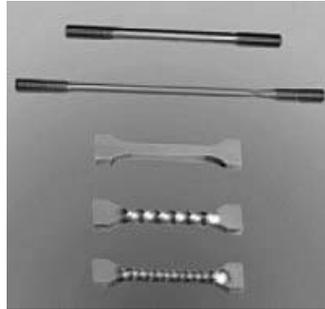


Abb. 6: Gezogene und verdrehte TRIP/TWIP-Stahl-Proben. Die untere Probe wurde dreimal um ihre eigene Achse verdreht. (Quelle: weltderphysik.de)

Ein weiteres Beispiel für Werkstoffe mit „Verformungsintelligenz“ sind die vor einigen Jahren entwickelten TRIP-Stähle (Transformation-induced Plasticity), die sich während der Umformung verfestigen. Durch Zugabe von Legierungselementen bilden sich energetisch begünstigte Kristallgitterstrukturen mit einem verbesserten Verhältnis von Festigkeit und Umformbarkeit aus. [Lan 07]

2.2 Motor und Antrieb

Was die Antriebstechnik der Zukunft betrifft, verfolgen Hersteller und Ingenieure mehrere Forschungsrichtungen. Während in Europa der Trend zu sauberen Dieselmotoren geht, die mit der herkömmlichen Dieselmotortechnologie nur noch wenig Ähnlichkeit haben, wird in den USA und Asien schon in näherer Zukunft die Wasserstofflösung als realistisch angesehen. Deren Ökobilanz ist derzeit noch äußerst schlecht, da in Wasserstoff als Energieträger viel Energie gesteckt werden muss.

Für eine Übergangszeit könnten Verbrennungsmotoren mit Elektromotoren zu sogenannten Hybridmotoren kombiniert werden. Erste Modelle mit dieser Technik sind bereits auf dem Markt.

Das Ziel ist, Automobile sparsamer zu machen. Nachdem die deutsche als auch europäische Automobilindustrie ihre Selbstverpflichtungen der letzten zehn Jahre nicht einhalten konnte, plädierte das EU-Parlament Anfang 2008 für einen Grenzwert von 125 Gramm CO₂ je Kilometer ab 2015 anstelle der von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen 120 Gramm CO₂ ab 2012. [Web 08]

Im Jahr 1998 hatten sich die europäischen Autohersteller darauf geeinigt, bis Ende 2008 einen Flottenverbrauch von 140 Gramm CO₂ pro Kilometer zu realisieren. Bis 2002 wurde der Durchschnittswert auf beinahe 160

Hybridantriebe kombinieren Verbrennungs- und Elektromotoren

Gramm gesenkt, seitdem stagniert der CO₂-Ausstoß, hauptsächlich wegen der steigenden Motorleistung der europäischen Neuwagen. [Ina 07]

Der Kohlendioxid-Ausstoß von Autos wird Europaweit und national begrenzt

Auch nationale Regelungen zielen auf den Verbrauch und damit auf den CO₂-Ausstoß ab. Seit Anfang 2008 sollen Neuwagenkäufer in Frankreich eine Sonderabgabe für Autos zahlen, die mehr als 160 Gramm CO₂ je Kilometer ausstoßen. Damit verteuern sich Modelle wie Porsche 911, BMW 740i, Audi Q7 und Mercedes-S-Klasse 420 CDI um rund 2600 Euro, kalkuliert das Prognose-Institut B&D Forecast. Doch möglicherweise wird der Pariser Entscheid aus Wettbewerbsgründen von der EU verworfen. [Cro 07b]

USA begrenzen den Flottenverbrauch

Auch in den Vereinigten Staaten wird der Flottenverbrauch für Neuwagen sinken müssen. Bis zum Jahr 2020 sollen es 6,72 l/km sein, bislang gilt die 1984 eingeführte Grenze von 8,6 Litern für Personenwagen und 10,5 Litern für Geländewagen.

Einzelne Bundesstaaten, darunter Kalifornien, streben sogar 6,39 l/km bereits ab 2016 an, wobei dieser Grenzwert für jedes einzelne Fahrzeug und nicht für den Flottendurchschnitt eines Herstellers gelten soll. Dieser Antrag wurde erst einmal abgelehnt. [Gär 08]

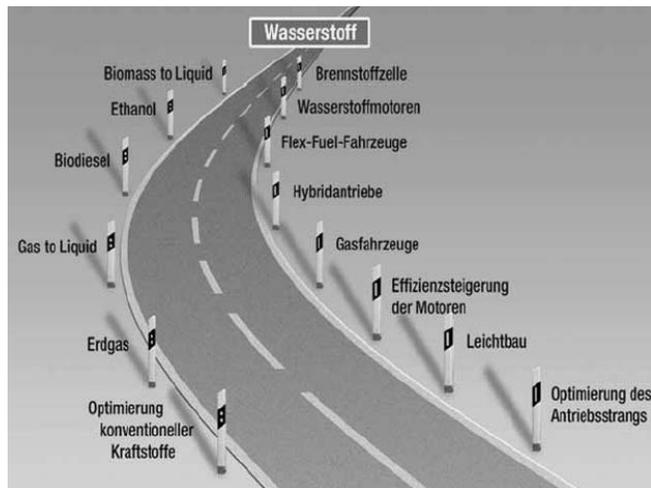


Abb. 7: Die Roadmap in der Antriebstechnologie (Quelle: Verband der Automobilindustrie, 2006)

2.2.1 Verbrennungsmotor

Der Verbrennungsmotor als Herzstück eines jeden Automobils bezieht seine Daseinsberechtigung aus der Nutzung von flüssigen, einfach handhabbaren Treibstoffen mit hoher Energiedichte. Diesen Vorteilen steht eine flächendeckende Infrastruktur zur Seite, so dass Reichweiten von 500 bis 1000 Kilometern erreicht werden. Diese Selbstverständlichkeit wird meist erst dann bewusst, wenn alternative Kraftstoffe wie Erdgas oder alternative Antriebe wie Elektromotoren betrachtet werden. Bei die-

sen ist das Betanken entweder derzeit nur vereinzelt möglich und erfordert somit Umwegfahrten oder das Betanken dauert mehrere Stunden und blockiert währenddessen das Fahrzeug für die Weiterfahrt.

Die Verbrennungsmotorentechnik ist sehr weit fortgeschritten und doch weiterhin entwicklungsfähig. Ein deutliches Zeichen ist die über die Jahre gesteigerte Wirtschaftlichkeit des Dieselmotors, wobei die Automobilindustrie langfristig sogar den „Diesotto“ im Auge hat: ein Ottomotor, der die Vorteile des emissionsarmen Benzinmotors mit der Sparsamkeit des Diesels verbindet.

Der Dieselantrieb zeigt: der Verbrennungsmotor hat noch Potenzial

Die Leistungsfähigkeit von Otto-Motoren wurde durch direkteinspritzende Systeme gesteigert, wie sie beispielsweise VW im Jahr 2000 erstmals im Lupo FSI in Serie einsetzte. Sie sind technisch komplex zu handhaben, belohnen aber besonders mit reduziertem Kraftstoffverbrauch bei niedriger Last. Elektromagnetisch angesteuerte Einspritzdüsen spielen dabei bisher eine große Rolle. Die Verbrennung wird dabei entweder im klassischen stöchiometrischen Verhältnis betrieben – die Luftmenge reicht genau zum Verbrennen des eingespritzten Kraftstoffes –, oder aber im Magerbetrieb mit Luftüberschuss, so dass der gesamte Kraftstoff rückstandsfrei verbrennt. Der Magerbetrieb erlaubt im Teillastbereich einen erhöhten Wirkungsgrad mit entsprechender Kraftstoffeinsparung, gerade im Alltagsbetrieb. Er wirft jedoch zwei Herausforderungen auf: zum einen ist ein zusätzlicher NO_x-Speicher-Katalysator nötig, da die Stickoxide durch den üblichen Drei-Wege-Kat nicht beseitigt werden können. Zum anderen führte die anfangs praktizierte wandgeführte Einspritzung nicht wirklich zur gewünschten Kraftstoffersparnis, denn für den Magerbetrieb ist Schichtladung nötig, damit das Luft-Benzin-Gemisch in der Nähe der Zündkerze überhaupt zündfähig ist. Hier richten sich die Hoffnungen auf strahlgeführte Systeme mit feinsten Zerstäubung, was wiederum einen hohen Druck um die 200 bar erfordert. Erstmals ging ein solches strahlgeführtes System im Jahr 2006 in Serie. Es basiert allerdings auf einer aufwändigen und teuren Piezo-Technik. Entwickler bei Bosch und Siemens VDO arbeiten daran, hohe Drücke auch mit unkomplizierteren Mehrloch-Magnetventilen zu realisieren. Damit könnte die Direkteinspritzung in den Massenmarkt vordringen und die Motoren auf breiter Front spritsparender machen. [Bar 07]

Direkteinspritzung gewinnt Bedeutung bei Otto-Motoren

Beim Dieselmotor ist die Direkteinspritzung Stand der Technik. Auch hier garantiert ein hoher Einspritzdruck mit der entsprechend feinen Zerstäubung einen effizienten Motor, der - außer unter Vollast - im Magerbetrieb läuft. Dabei zeichnet sich die Ablösung der Pumpe-Düse-Technik durch Common-Rail ab. Steht bei Common Rail die gemeinsame Zuleitung für alle Zylinder unter etwa 1500 bar Hochdruck, ist es bei Pumpe-Düse-Technik nur die Düse jedes Zylinders selbst, die es damit auf über 2000 bar bringt. Von Nachteil ist, dass die Pumpe-Düse mechanisch über die Nockenwelle betrieben wird, somit sind die Einspritzpunkte festgelegt. Bei geringer Geschwindigkeit und wenig Last ist uneffizienter Be-

trieb die Folge. Die Weiterentwicklung von Dieselmotoren mit Pumpe-Düse-Technik wurde daher vom Zulieferer Bosch aufgegeben, die Produktion damit ausgerüsteter Autos durch Volkswagen läuft bis zum Jahr 2010 aus. [Sch 07]

Dieseinspritzung
wird bei Common-
Rail-Technik voll-
ständig elektronisch
gesteuert

Damit tritt Common Rail, seit 1997 im Serieneinsatz, seinen Siegeszug weiter an - sei es beim 30 kW-Dieselmotor mit 0,8 Liter Hubraum im Smart oder im Audi Q7 mit 6 Liter Hubraum und 370 kW Leistung. Die Zahl der Einspritzungen je Zyklus lässt sich elektronisch steuern, beispielsweise bis zu achtmal mit 2000 bar bei Piezo-Injektoren. Die Magnetventile erreichen bis 1800 bar. Der Einspritzdruck von Common-Rail-Einspritzsystemen wird bis zum Jahr 2011 auf 2400 bar gesteigert werden, auch Systeme mit 3000 bar Maximaldruck sind schon in der Entwicklung und könnten langfristig Katalysatoren oder Partikelfilter überflüssig machen. [Win 08]

Nur mit der Common Rail-Technologie können sowohl die strengen Abgasnormen Euro 5 (ab 2009) und Euro 6 (ab 2014) als auch die amerikanische Norm US07 Bin5 erfüllt werden. Zusammen mit dem seit 2006 in den USA vorgeschriebenen, stark verringerten Schwefelgehalt im Dieselmotorkraftstoff kann der Selbstzünder zukünftig in den USA mit den inzwischen recht absatzstarken Ottomotor-Hybridfahrzeugen gleichziehen. Im Jahr 2006 waren von 16 Millionen verkauften PKW in den USA etwa 500 000 Diesel- und 250 000 Hybridfahrzeuge. [VDI 07b]

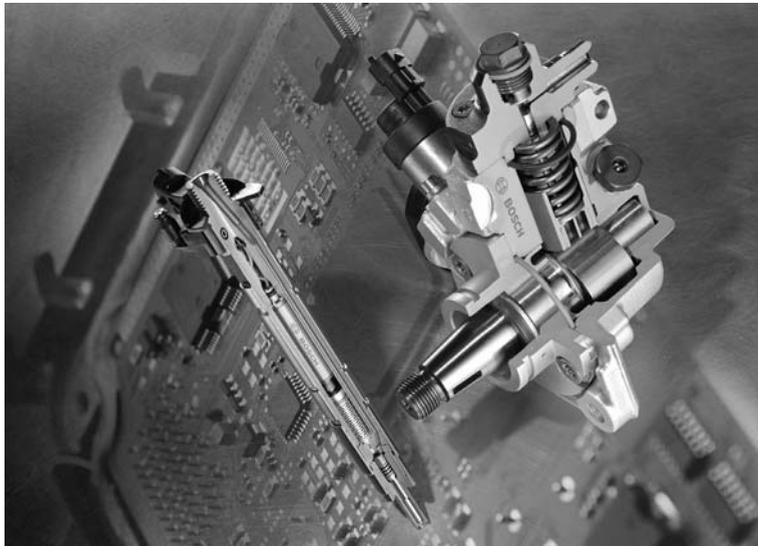


Abb. 8: Die dritte Generation des Common-Rail-Systems von Bosch mit Hochdruckpumpe, Piezo-Injektoren und Steuergerät (Quelle: Robert Bosch GmbH)

Neben der Einspritztechnik werden auch Leichtbaumaterialien wie Keramikventile und Leichtmetalle im Motorenbau in Erwägung gezogen, um Kraftstoff zu sparen. Vollaluminium-Dieselmotoren sind teuer und werden bevorzugt in Oberklasse-Fahrzeuge eingebaut - mit Ausnahme beispielsweise von Hondas 2,2-Liter-CTDi-Motor für die Modelle Accord und Civic. [Hon 05]

Beim Ottomotor ist ein weiterer Schritt die Kompressionszündung, das GCI- (Gasoline Compression Ignition-)Verfahren. Die Zündung ohne Zündkerze hat Honda bereits in einem Motorrad-Zweitaktmotor realisiert, in den nächsten Jahren möchten VW und Daimler diese Technik auf den Viertaktmotor übertragen. Dabei wird der Frischluft bis zu 80 % Abgas zugemischt. Beim Erreichen der für die Selbstzündung nötigen Kompression entzündet sich das Gemisch im gesamten Brennraum zugleich. Der hohe Abgasanteil wirkt als Explosionsbremse und vermeidet die Entstehung von Stickoxiden. Volkswagen nennt diese Motorentechnik „Combined Combustion System“, bei Mercedes heißt sie plakativ „Diesotto“. In beiden Fällen triumphiert die Elektronik über die Mechanik: die Nockenwelle, die die Einlass- und Auslassventile traditionell rein mechanisch steuert, wird ersetzt durch elektromechanische Aktuatoren, die die Ventile individuell ansteuern. Das erweitert die von BMW mit der „Valvetronic“ erstmalig eingeführte variable Ventilsteuerung, bei der der Ventilhub über einen Stellmotor variiert werden kann. Mit dem gänzlich nockenlosen Motor ist auch die zeitweilige, vollständige Abschaltung von Zylindern möglich, die als Leistungsreserve nur bei hoher Last in Betrieb gehen. Der Diesotto bietet ausreichend Drehmoment bei niedrigem Verbrauch und ist in der Herstellung nicht so teuer wie ein Dieselmotor. Volkswagen optimiert sein „Combined Combustion System“ zusätzlich auf synthetische Kraftstoffe. [Nie 01]

Otto- und Dieselmotor sollen kombiniert werden

Diese Entwicklungen zeigen, dass Verbrennungsmotoren noch erhebliches Optimierungspotenzial für das zukünftige Auto aufweisen. Das geschieht jedoch eher kontinuierlich und weniger öffentlichkeitswirksam als beim heimlichen Star des automobilen Fortschritts, dem Hybridantrieb.

2.2.2 Hybridantrieb

Neben der kontinuierlichen Verbesserung der Verbrennungsmotortechnik kann der Einsatz von Fahrzeugen mit Hybridantrieb viel zur Verbrauchsreduzierung und CO₂-Minderung beitragen. Um jedoch Marktchancen zu haben, müssen Hybridfahrzeuge hinsichtlich Fahrleistungen, Fahreigenschaften und Fahrkomfort die gleiche Alltagstauglichkeit und Lebensdauer aufweisen wie konventionelle Fahrzeuge. Auf diese Anforderungen muss die Entwicklung der Antriebstechnologien für Hybridfahrzeuge ausgerichtet sein. Das Innovationspotenzial liegt insbesondere in deutlichen Verbrauchsminderungen, in anwendungsorientier-

ten Weiterentwicklungen der Kernkomponenten und im sicheren Zusammenwirken des Gesamtsystems "Antrieb". Um einen schnellen Transfer zu gewährleisten, müssen die Entwicklungsergebnisse praxisnah demonstriert und alltagstaugliche Fahrzeuge entwickelt werden.

Hybridautos werden
bereits in Serie pro-
duziert

Autohersteller weltweit haben in den letzten Jahren Autos entwickelt, die ihre Energie sowohl aus einem Elektromotor mit Batterie als auch einem Verbrennungsmotor mit Benzin, Diesel oder Erdgas beziehen. Die neuesten Modelle dieser Hybridautos verfügen über erheblich verbesserte Batterien und weitere Merkmale, die ihre Vorläufer weit hinter sich lassen. Mit diesen neuen Modellen könnten Hybridautos künftig die erste Wahl für Autofahrer nicht nur in Japan und den USA, sondern weltweit werden.

Der Hauptvorteil von Hybridautos ist, dass sie aufgrund der geringen Kohlendioxid-Emissionen umweltfreundlich sind. Zugleich muss der Fahrer die Akkus nicht selbst an der Steckdose aufladen, wie dies mit Elektrofahrzeugen assoziiert wird - die Energie für die Batterie liefert der eingebaute Verbrennungsmotor und die Energierückgewinnung beim Bremsen. Japans größter Autohersteller, die Toyota Motor Corporation, begann 1997 in Japan mit dem Verkauf des ersten Hybridautos in Massenfertigung, dem Toyota Prius, der seit 2000 auch in Europa und Nordamerika auf dem Markt ist. Die Honda Motor Co. führte 1999 den futuristisch aussehenden Zweisitzer Honda Insight ein. Anschließend wurde das Modell Civic in einer Hybridversion angeboten.

Toyota hat zusammen mit der Marke Lexus zwischen 1997 und 2007 eine Million Einheiten mit Hybridantrieb auf dem Markt gebracht, Honda immerhin über 100 000 Stück, inzwischen vor allem den Honda Civic IMA. [Kut 07]

Ein Planetengetriebe
verknüpft Benzin-
und Elektromotor

Der Toyota Prius erreicht durch die Kombination von Benzin- und Elektromotor einen Normverbrauch von 4,3 l/100 km, ein respektabler Wert für ein Mittelklassefahrzeug. Große Verbrauchseinsparungen werden vor allem im Stadtverkehr im Stop & Go erzielt, da hier die Rückgewinnung der Bremsenergie und der höhere Wirkungsgrad dieser Antriebskombination voll zur Geltung kommen. Dabei handelt es sich um ein Vollhybridkonzept, bei dem der Antrieb sowohl über den Ottomotor als auch den Elektromotor erfolgen kann, wobei die Antriebsstränge über ein leistungsverzweigtes Planetengetriebe und ein komplexes Antriebsmanagement miteinander verknüpft sind. Dementsprechend ist über kurze Strecken bei geringer Geschwindigkeit auch eine rein elektrische Fahrt möglich.



Abb. 9: Einblick in einen Toyota Prius: der Elektromotor befindet sich neben dem Verbrennungsmotor, die Batterie hinter der Rücksitzbank (Quelle: Toyota)

Für den Einsatz von Elektromotoren spricht vor allem, dass diese bei allen Drehzahlen effizient arbeiten und aus dem Stand weg ein hohes Drehmoment erzeugen – gerade hier sind Verbrennungsmotoren konzeptionell unterlegen. Zusätzlich wirkt der Elektromotor beim Bremsen oder bei Talfahrten als Dynamo und lädt die Bordbatterie auf, so dass das Auto keinen externen Stromanschluss benötigt und die mechanische Bremse aufgrund der E-Bremse weitgehend arbeitslos ist. Derzeit kann nur etwa die Hälfte der Bremsenergie rekuperiert werden, da der Akku die generierte Leistung nicht so rasch speichern kann. Superkondensatoren, die in Sekunden aufgeladen werden, können die Effizienz weiter steigern. Durch die Unterstützung des E-Motors kann der Hubraum des Verbrennungsmotors reduziert werden („Downsizing“). Otto-Motoren arbeiten bei Vollhybridfahrzeugen zudem weitgehend im effizienten Betriebsbereich, da die Leistung des Verbrennungsmotors an den Antriebsstrang oder den Generator verteilt wird.

Die Schwächen des Vollhybrid-Konzepts, bei dem auch der rein elektromotorische Antrieb vorgesehen ist, sind das höhere Fahrzeuggewicht durch Elektroaggregate und Batterien sowie die höheren Herstellungskosten. Der Erfolg des Prius dürfte auch darauf beruhen, dass Toyota das Fahrzeug grundlegend als Hybridfahrzeug neu konzipiert hat und zum Beispiel durch eine gute Aerodynamik weitere Einsparpotenziale erschließt, die nicht zwangsweise vom Antrieb abhängen. Auch die Klimaanlage wurde erstmals in einem Serien-PKW mit einem elektrischen Kompressor ausgestattet, arbeitet also auch bei ausgeschaltetem Verbrennungsmotor. Anders gesagt: mit dem Prius ging ein spezielles, von allen herkömmlich angetriebenen Modellen deutlich unterscheidbares Auto in Serie, das bei Misserfolg in der Schublade verschwunden

E-Motoren erzeugen hohes Drehmoment aus dem Stand

Bremsenergie wird zurückgewonnen

wäre. Alle anderen Automobilhersteller setzen jedoch auf adaptierte, bereits am Markt befindliche Modellreihen, die „von außen“ erst einmal nicht auffallen und dem Besitzer folglich nicht den Nimbus eines Innovators oder eines „Early Adopters“ geben. Eine Schweizer Marketingstudie hat nicht umsonst festgestellt, dass Prius-Besitzer weniger auf das Spritsparpotenzial bedacht sind, sondern auf die moderne und einmalige Technik. Dieses Kunden-Gefühl können nach dem Prius andere Hersteller kaum noch erzeugen. [ETH 05]

Verschiedene Varianten der Hybridtechnologie auf der Straße

Während der Vollhybrid die meiste Aufmerksamkeit auf sich zieht, gibt es noch abgeschwächte Varianten, die ebenfalls auf deutschen Straßen anzutreffen sind. Als „milder Hybrid“ (mild hybrid) gilt das Serienfahrzeug Honda Civic IMA, dessen Elektromotor als Kurbelwellenstarter zwischen Verbrennungsmotor und Automatikgetriebe angeordnet ist. Auch hierbei wird Bremsenergie zurückgewonnen, doch ist ein alleiniger Antrieb nur durch den Elektromotor nicht möglich – er soll unterstützend wirken.

Seit 2007 verfolgt BMW in der 1er-Reihe das Konzept des „Micro Hybrid“. Eine automatische Start-Stop-Funktion wird wirksam, wenn der Fahrer auskuppelt und das Schaltgetriebe in Nullstellung bringt. Sobald das Kupplungspedal betätigt wird, springt der Motor unverzüglich an. Lichtmaschine und Anlasser wurden durch einen speziellen Startergenerator von Bosch ersetzt. Durch die Motorabschaltung beim Fahrzeugstillstand kann besonders im Stadtverkehr Kraftstoff gespart werden, die Lichtmaschine speist die Batterie mit Bremsenergie. Bei Vollhybridfahrzeugen wird der Motor übrigens schon beim Bremsvorgang abgeschaltet.

Hersteller in Europa und USA arbeiten vereint an Hybridfahrzeugen

Während alle Varianten des Hybridantriebs in Großserien – und dennoch als Nischenprodukte – gefertigt werden, geht die Entwicklung mit verschiedenen Schwerpunkten weiter. In Konsortien versuchen europäische und US-amerikanische Autohersteller, ihre Voll- und Mild-Hybridkonzepte serienreif zu machen, denn neben den japanischen Herstellern hat nur Ford in den USA mit dem Ford Escape bereits ein Hybridfahrzeug im Programm. Daimler, BMW und General Motors arbeiten zusammen, ebenso die Zulieferer ZF und Continental mit Siemens VDO. Bosch entwickelt für VW, Audi und Porsche. Die Firmen sind bemüht, ihre Rückstände aufzuholen und den Dieselantrieb mit Hybridtechnologie voranzubringen, gerade um den europäischen Markt zu befriedigen. Der französische PSA-Konzern möchte ab 2010 sowohl den Citroen C4 als auch den Peugeot 308 als Hybridversion anbieten. Ansonsten stehen allerdings Premium-Limousinen wie VW Touareg, Audi Q7, Mercedes GL, BMW X5 und Porsche Cayenne auf dem Hybrid-Programm. Bei diesen kann der Kraftstoffverbrauch vom hohen Grundniveau aus reduziert werden, ein Weg, den sonst nur noch Toyota mit seiner Nobelmarke Lexus geht.

Hybridfahrzeuge können die herkömmliche Infrastruktur nahtlos weiterbenutzen: sie werden mit Benzin – oder Diesel – betankt und benötigen entgegen anfänglicher Klischees keine externe Stromversorgung. Dennoch plant unter anderem Toyota, die nächste Prius-Generation ab 2010 als „Plug-in-Hybrid“ auszuführen. Solche Plug-in-Hybride generieren ihren Strom weiterhin aus dem Verbrennungsmotor und der Bremsenergieerückgewinnung, können aber optional auch an der Steckdose aufgeladen werden, um von vornherein weitere Strecken im rein elektrischen Betrieb zurücklegen zu können. Begünstigt wird diese Entwicklung durch neue Lithium-Ionen-Akkus mit höherer Speicherkapazität. Langfristig wäre sogar denkbar, dass Plug-in-Hybridautos über preiswerten Nachtstrom die nächtliche Grundlast von Kraftwerken in Anspruch nehmen. [Kut 08]

Bisher nicht nötig:
Steckdose für Hybridauto

Um die immer größeren Leistungen an Bord eines Hybridfahrzeuges zu steuern, bieten sich Silizium-Carbid-Leistungsschalter an, die derzeit noch in der Entwicklung sind. Die derzeit eingesetzte Silizium-Technologie benötigt einen separaten Kühlkreislauf für die temperatursensible Leistungselektronik. Die Silizium-Carbid-Technik kann das Gewicht von Hybridfahrzeugen reduzieren.

2.2.3 Elektroantrieb

Neben der Hybridtechnologie zeichnet sich auch eine Renaissance von rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ab. Diese waren bereits in den 90er Jahren projiziert worden, als Zero-Emission-Regelungen im US-Bundesstaat Kalifornien aufkamen. Nach Abschwächung der Grenzwerte verschwand der Bedarf an solchen Fahrzeugen. Inzwischen sind wieder mehrere rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge in der Entwicklung, deren prominentestes Beispiel ein Sportwagen der Firma Tesla Motors ist. Eine Höchstgeschwindigkeit von 220 km/h bei einer Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in 4 Sekunden sowie eine Reichweite von über 400 km sprechen nicht vorrangig ökologisch motivierte Käufer an.

Elektroauto als ökologischer Sportwagen

Die Idee, einen Elektroantrieb gerade für sportliche Autos zu nutzen, liegt nahe, da Elektromotoren ihr maximales Drehmoment bereits beim Anfahren aufbauen können. Schalt- oder Automatikgetriebe sind nicht nötig. Radnabenantriebe gestatten zudem einen Vierradantrieb bei variabler Kraftverteilung auf jedes Rad mit hohem Wirkungsgrad und geringem Raumbedarf.

Auch eher klassische Fahrzeugkonzepte wie der Chevrolet Volt von General Motors sollen mit rein elektrischer Antriebstechnik angeboten werden. Der Volt wird aber zusätzlich zum Steckdosenanschluss noch einen kleinen Benzinmotor an Bord haben, mit dem der Lithium-Ionen-Akku während der Fahrt aufgeladen werden kann. Der Motor läuft dabei in seinem effizientesten Drehzahlbereich. [Grü 07a]

Versorgungsnetz für
Elektroautos in Israel

Ein ambitioniertes Projekt startet der ehemalige Vorstand der Software-Firma SAP, Shai Agassi. Er möchte in Israel ein flächendeckendes Netz von 500 000 Ladestationen aufbauen, teilweise mit Möglichkeit zum direkten Batteriewechsel. Elektroautos soll Renault mit seiner japanischen Tochter Nissan ab 2011 in Großserienfertigung liefern. [Lam 08]



Abb. 10: Konzeptfahrzeug Chevrolet Volt: ein 1,0-Liter-Dreizylinder-Turbobenzinmotor erzeugt mit konstanter Drehzahl Strom, um die Batterien im Mittelunnel wieder aufzuladen (Quelle: General Motors)

Benzin und Diesel ha-
ben eine viel höhere
Energiedichte als
Batterien

Elektromotoren haben den Verbrennungsmotoren die systembedingt gute Zugkraft auch bei niedrigen Geschwindigkeiten voraus. Damit bieten sie sich als Ergänzung zu Verbrennungsmotoren förmlich an, die außerhalb ihres optimalen Arbeitspunktes immer unter ihrer mangelnden Effizienz leiden. Das wirft die Frage auf, warum keine rein elektrisch angetriebenen Fahrzeuge auf dem Markt sind. Die Antwort liegt in der Energiespeicherung der beiden Antriebsarten: Die Energiedichte von Benzin und Dieselmotoren ist mit über 10 kWh/kg um den Faktor 50 und mehr höher als die heutiger elektrischer Energiespeicher. Hier werden in Lithium-Ionen-Batterien zwar respektable, jedoch vergleichsweise bescheidene 0,2 kWh/kg erreicht. Zwar ist der Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren nicht einmal halb so groß wie der von Elektromotoren, dies gleicht den Faktor 50 der Energiedichte zwischen Flüssigtreibstoff und Batterien jedoch bei weitem nicht aus. [Hon 06]

Alle Arten von wiederaufladbaren Batterien werden daher zuerst einmal an ihrer Energiedichte gemessen. An zweiter Stelle steht die Leistungsdichte, die über das realisierbare Beschleunigungsverhalten des Autos entscheidet. Jedoch lassen sich Energie- und Leistungsdichte nicht simultan auf Höchstwerte trimmen. Die bereits erwähnten Lithium-Ionen-Batterien kommen auf Leistungsdichten von 0,8 kW/kg. Als interessante Erweiterung gelten Superkondensatoren mit einer Leistungsdichte um 10 kW/kg - bei allerdings bescheidener Energiedichte von unter 0,01 kWh/kg. Da Superkondensatoren aber im Gegensatz zu Batterien innerhalb von Sekunden aufgeladen und entladen werden können, ergänzen sie die trägen elektrochemischen Batterien gut und eignen sich hervorragend, um zurückgewonnene Bremsenergie kurzzeitig zu speichern. [Sau 07]

Superkondensatoren setzen schneller Leistung frei als Batterien

Lithium-Ionen-Batterien könnten in Zukunft die bisherigen Nickel-Metallhydrid-Zellen beim Einsatz in Hybrid- und Elektroautos ablösen. Selbst als Ersatz für die Blei-Säure-Starterbatterie werden sie gehandelt, da sie bei vergleichbarem Energieinhalt bei halber Größe nur ein Drittel wiegen würden. Die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterien hat vor allem die Betriebssicherheit, Steigerung der Energie- und Leistungsdichte als auch ihre Lebensdauer im Blick. In den Jahren 2006 und 2007 machten Lithium-Ionen-Akkus von Laptops und Mobiltelefonen negative Schlagzeilen, da beim Überladen an der Kathode extrem reaktionsfähiges Kobaltoxid entstand, das sich bei Temperaturen von unter 500 °C von selbst zersetzt. Begünstigt wurde dies auch durch nicht eingehaltene Toleranzen bei der Separatorenfertigung, was groß angelegte Rückrufaktionen zur Folge hatte. Neuartige Separatoren-Membranen, die die beiden Elektroden voneinander trennen und wie sie Evonik Degussa entwickelt, können hier Fortschritte bringen. Die Tragweite des Problems wird daran deutlich, dass die nächste Generation des Toyota Prius mit Lithium-Ionen-Akkus erst im Jahr 2011 statt 2009 auf den Markt kommen soll. [Spi 07a]

Lithium-Ionen-Batterie: der Favorit macht noch Probleme

Nanostrukturierte Materialien können die elektrischen Kenndaten der Lithium-Ionen-Zellen in Zukunft verbessern: Beispiele sind Nanophosphate, nanoporöser Kohlenstoff als Elektrodenmaterial und nanostrukturierte Festelektrolyte. Keramische Membranen verbessern die Temperaturstabilität des Gesamtsystems und vermeiden Probleme durch Überhitzung der Zellen bei großen Strömen.

Für den Einsatz in Kraftfahrzeugen gibt es eine weitere Alternative: die Natrium-Nickelchlorid-Hochtemperaturbatterie. Diese arbeitet bei Temperaturen um 300 °C, dann liegen die Elektroden in flüssiger Form vor. Diese Temperatur kann aus der Reaktionswärme der Zellen aufbaut und in thermisch gut isolierten Behältern mehrere Tage gehalten werden. Kühlt die Batterie anschließend zu stark ab, muss sie durch externe Stromzufuhr wieder „initialisiert“ werden. Von Vorteil sind das vollständige Fehlen eines Memory-Effekts, weshalb die Batterie in jedem Be-

ZEBRA-Batterie speziell für das Auto

triebszustand nach Bedarf geladen und entladen werden kann, sowie ein unkritisches Energiemanagement, da sich Zellen in Serienschaltung nicht individualisieren. Die Betriebstemperatur der Module macht sie zudem unabhängig von externen Witterungseinflüssen. Daher sind Natrium-Nickelchlorid-Hochtemperaturbatterien trotz ihrer nur durchschnittlichen Energie- (0,15 kWh/kg) und Leistungsdichte (0,25 kW/kg) besonders für reine Elektrofahrzeuge attraktiv: In London verkehren einhundert rein elektrisch angetriebene und somit City-Maut-befreite Smart mit dieser sogenannten ZEBRA (Zero Emission Batteries Research Activity)-Batterie. [Grü 07b]

Superkondensatoren
ergänzen die trägen
Batterien

Superkondensatoren oder „Supercaps“ sind auf die schnelle Zwischenspeicherung von Energie in hochdynamischen Systemen spezialisiert. Ihre sehr hohe Kapazität beziehen sie aus einem bauartbedingten nur atomlagendicken Dielektrikum und großflächigem Elektrodenmaterial – möglich ist eine spezifische Oberfläche von über 1000 m² pro Gramm Elektrodenmaterial. Hier stehen neue Materialien im Fokus, so zum Beispiel Kohlenstoff-Aerogele und Keramiken, die aus Nanopulvern von Nitriden und Karbiden der Übergangsmetalle gesintert werden. Die neuen Materialien sind jedoch noch teuer und erfordern teilweise unverstandene Prozessschritte. Da jedoch inzwischen der Zusammenhang zwischen Porengröße der Elektrodenoberfläche, Wahl des Elektrolyten und elektrischen Kenndaten bekannt ist, sind hier maßgeschneiderte Superkondensatoren mit noch höherer Kapazität bei mäßiger Leistungsdichte absehbar. [Sci 06]

2.2.4 Kraftstoffe

Hybrid- und Elektroautos können den Kraftstoffverbrauch zwar reduzieren, es stellt sich jedoch die Frage, ob es auch ohne rein elektrische Antriebe Alternativen zum Erdöl gibt. Die Antwort lautet ja, und diese Alternativen werden bereits auf breiter Front genutzt, fallen allerdings kaum auf. In Deutschland ist Rapsmethylester als Biodiesel am bekanntesten. Aus den Samen eines Rapsfeldes mit einem Hektar Fläche lassen sich rund 1300 Liter Biodiesel gewinnen. Dieser wird herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff derzeit anteilig bis zu sechs Prozent beigemischt.

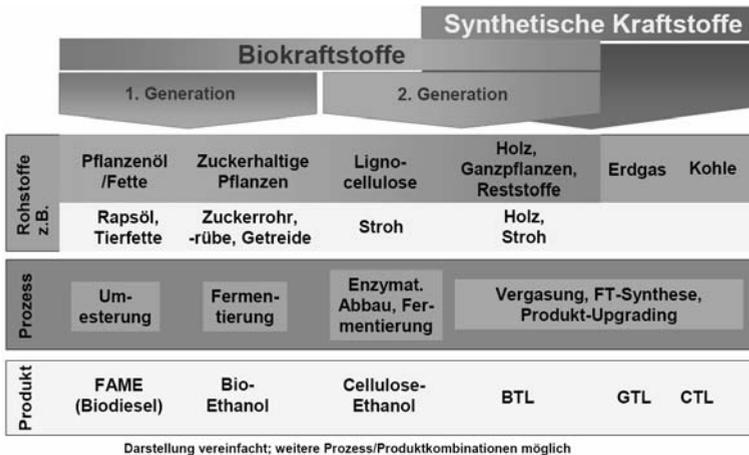


Abb. 11: Einsatzstoffe für die Produktion von Biokraftstoffen und synthetischen Kraftstoffen (Quelle: Shell)

Einige Tankstellen verkaufen auch reinen Biodiesel, allerdings muss sich der Autofahrer dann sicher sein, dass der Autohersteller das Modell für Biodiesel freigegeben hat, damit die Dichtungen und Einspitzsysteme harmonisieren. Reiner Biodiesel ist in der Herstellung etwa doppelt so teuer wie Dieselkraftstoff aus Rohöl, allerdings weitgehend steuerbefreit und daher an der Tankstelle letztendlich preiswerter. In den Jahren 2008 bis 2012 wird die Besteuerung für reinen Biodiesel gemäß eines Bundestagsbeschlusses vom Juni 2006 von 9 auf 45 Cent je Liter angehoben – Dieselkraftstoff aus Mineralöl wird mit 47 Cent je Liter besteuert.

Reiner Biodiesel verliert seine Steuervorteile

Dieselmkraftstoff lässt sich aber auch aus Erdgas gewinnen. Die Fischer-Tropsch-Synthese, im Deutschland der Zwanziger Jahre erfunden, macht „Gas to liquid“ (GTL) möglich. GTL-Kraftstoff ist schwefel- und aromatenfrei und reduziert die Partikelemission eines gängigen Euro-4-Aggregats um weitere 25 %. Shell mischt seinem teuren Premium-Diesel fünf Prozent GTL zu. [She 04]

Mag die flüssige Darstellung von fossilem Erdgas auch praktisch sein, die CO₂-Bilanz lässt sich damit nicht verbessern. Doch auch aus Biomasse (BtL, Biomass-to-Liquid) lassen sich verflüssigte Kohlenwasserstoffe herstellen. Dabei werden nicht nur Früchte oder Samen, sondern die Pflanzen mit Stiel und Stängel vollständig verwertet, so dass ein Hektar Feld schon 4000 Liter BtL-Diesel liefert. Das Freiburger Unternehmen Choren Industries rechnet für Ende des Jahrzehnts mit Herstellungskosten von unter sechzig Cent pro Liter, so dass BtL mit Rohöl konkurrenzfähig würde, selbst wenn Steuervorteile nicht mitberechnet werden. Die CO₂-Bilanz von Biomasse ist zwar immer noch nicht neutral, da Anbau, Düngung und Transport der Biomasse ebenfalls CO₂-Ausstoß verursachen, allerdings lässt sich beim von Choren benutzten Carbon-V-Verfahren der Fischer-Tropsch-Synthese jegliches organische Material

Pflanzliche Biomasse wird vollständig verwertet

Vollständige Verwertung von pflanzlicher Biomasse

verarbeiten, auch Holz, altes Fett, Altöl, Klärschlamm bis hin zu Kunststoffabfällen.

Doch auch für Benzin gibt es umweltfreundliche Alternativen. Allen voran Bioethanol, ein aus Getreide, Zuckerrüben oder Zuckerrohr vergorener Alkohol. In Brasilien wird dem Benzin für Standard-Autos bis zu 25 % davon beigemischt, in Deutschland sind es derzeit bis zu sechs Prozent, die aus Mais, Weizen oder Zuckerrüben vergärt werden. Wie bei reinem Biodiesel auch, gibt es auf dem Markt einige wenige spezielle Fahrzeuge, die für den Betrieb mit „E 85“ ausgerüstet sind. E 85 steht für 85 % Bioethanol und 15 % Benzin, um die ungünstigen Kaltlaufeigenschaften von reinem Ethanol zu kompensieren. Kraftstoff mit über 70 % Bioethanol wird – im Gegensatz zu Biodiesel – weiterhin steuerbefreit bleiben.

Im Jahr 2006 waren in Deutschland dem an Tankstellen verkauften Benzin- und Dieselmotorkraftstoff ohne besondere Deklaration 6,3 % Biokraftstoffe beigemischt. Dieser Anteil soll in den kommenden Jahren erheblich steigen. Darauf haben sich im November 2007 Bundesumwelt-, Landwirtschaftsministerium, Automobil- und Mineralölindustrie geeinigt. Die „Roadmap Biokraftstoffe“ sieht für das Jahr 2020 eine Biokraftstoffbeimischung von 20 % vor – die EU schlägt für alle EU-Staaten einen Anteil von 10 % vor.

Anteil von Bioethanol im Benzin steigt ab 2009 auf 10 %

In einem ersten Schritt soll der Ethanolanteil im Benzin ab 2009 auf 10 % erhöht werden. Der Bioanteil des Dieselmotorkraftstoffs wird zwar nur 7 % betragen, doch weitere 3 % resultieren aus einer Beimischung von Pflanzenölen zum Erdöl vor der Dieselmotorenherstellung. [VDI 07a]

Die zwanzigprozentige Beimischung im zweiten Schritt ist laut Roadmap nur mit Biokraftstoffen der zweiten Generation, Biomass-to-Liquid (BtL), zu schaffen. Noch steht dafür nur die Versuchsanlage von Choren Industries in Freiberg bereit. In Zukunft muss die Frage beantwortet werden, ob die Biokraftstoffbeimischung im Benzin folgenlos für die Fahrzeugtechnik (Dichtungen, Benzinleitungen und Aluminiumteile im Motor) bleibt. Die Mineralölindustrie plant, der Sorte „Super plus“ weiterhin nur 5 % Bioethanol beizumischen, welche Besitzer älterer Autos dann – zu einem entsprechenden Aufpreis – tanken können. [Rot 08] Wieviele Fahrzeuge ab 2009 auf Super plus angewiesen sind, ist umstritten – die Zahlen schwanken zwischen etwa 375 000 und fast zehn Millionen. [Hal 08]

Wächst der Kraftstoff erst einmal auf dem Acker, steht er in Konkurrenz zu Lebensmitteln. Anfangs wurde nur die Möglichkeit propagiert, brachliegende Felder mit Energiepflanzen zu bewirtschaften, doch inzwischen zeigt sich, dass im Agrarwesen den nachwachsenden Rohstoffen durchaus den Vorrang gegeben wird, was zum Beispiel in Mexiko bereits zu erheblich steigenden Mais-Preisen geführt hat. Hier können die Biokraftstoffe zweiter Generation aus BTL-Produktion helfen. [Sam 07]

In Deutschland sind in einem relativ dichten Tankstellennetz Flüssiggas (Liquified Petroleum Gas, LPG; auch Autogas genannt) und Erdgas (Compressed Natural Gas, CGN) vertreten. Die Stickoxid- und Partikelemissionen sind gering, es gibt einige Automodelle dafür auf dem Markt, und die Fahrer profitieren bis Ende 2018 von einem reduzierten Steuersatz. Als langfristige Option für die Zukunft gelten beide jedoch nicht, zumal die Verbreitung stark von der Steuerbegünstigung abhängt, wie Erfahrungen in Österreich gezeigt haben.

Flüssig- und Erdgas bis 2018 steuerreduziert

Doch auch klassischer Dieseldieselkraftstoff bietet noch Potenzial. Der Ausstoß von Stickoxiden kann bei Dieselfahrzeugen durch den Einsatz eines Speicherkatalysators auf das Niveau von Benzinern gesenkt werden. Dieser Speicherkatalysator ist Teil eines modularen Systems, das zusammen mit dem klassischen Oxidationskatalysator den Ausstoß von Kohlenmonoxid und mit einem Partikelfilter den Ausstoß von Rußteilchen senkt. Der Speicherkatalysator wird ergänzt durch einen SCR (Selective Catalytic Reduction)-Katalysator, der weitere Stickoxide abbaut. Dieses Gesamtsystem wird unter dem Namen Bluetec von Daimler vermarktet und ist zuerst mit einem Mercedes-Benz E 320 Bluetec für den US-amerikanischen Markt eingeführt worden. Dort steht seit 2006 schwefelarmer Dieseldieselkraftstoff zur Verfügung, ohne den ansonsten der Speicherkatalysator Schaden nehmen würde. Ab 2008 soll auch in den EU-Staaten flächendeckend schwefelfreier Diesel verfügbar sein, so dass die Bluetec-Fahrzeuge auch in Europa verkauft werden. [Dai 07a]

Katalysatorsystem für Dieselfahrzeuge

Die Wirksamkeit von Bluetec kann durch das Einspritzen von Ammoniak in den Abgasstrang vor dem SCR-Katalysator noch verbessert werden. Hierzu wird etwa ein Zwanzigstel der Kraftstoffmenge in Form einer wässrigen Harnstofflösung getankt, die das Warenzeichen „AdBlue“ trägt und an vielen Tankstellen verkauft wird, da dieselfetriebene Nutzfahrzeuge zur Erfüllung der ab 2009 gültigen Euro 5-Norm vermehrt auf AdBlue setzen.

Schwefelfreier Dieseldieselkraftstoff in den USA macht Speicherkatalysator möglich

Kraftstoffe/Antriebe	Umweltvorteile	Umweltnachteile	Bemerkungen
Biokraftstoffe - Ethanol - Rapsöl/Rapsöl- methylester	CO ₂ -Vorteil im Vergleich zu Diesel; biologische Abbaubarkeit	Grundwasser-, Bodenbelastung und hoher Flächenverbrauch für Anbau; N ₂ O-Emissionen durch hohen Düngemittelbedarf	Emissionen zu Diesel unverändert; unwirtschaftlich; hohe Subventionen für Landwirtschaft und durch Mineralölsteuerausfall
Erdgas - komprimiert (CNG) - verflüssigt (LNG)	niedrigste Emissionen; 25% geringere CO ₂ -Emission pro Energieeinheit im Vergleich zu Benzin und Diesel	Schwere Speicher erhöhen das Fahrzeuggewicht	Infrastruktur entsteht; reduzierte Reichweite; für Flotten sinnvoll; alle Sicherheitsstandards sind erfüllt
Flüssiggas (LPG)	niedrige Emissionen; 10-16% geringere CO ₂ -Emission pro Energieeinheit als Otto-, Dieselmotor	Schwere Speicher erhöhen das Fahrzeuggewicht	Vergleichbar mit Erdgas, mit Vorteilen bei Tankstelle, Speicher, Reichweite, Handling; teilweise Tiefgarageneinfahrt verboten
Wasserstoff (H ₂)	keine Schadstoffemissionen außer NO _x am Ort der Verbrennung	Emissionen bei Erzeugung aus fossiler Energie; immer hohe Herstellungsverluste	aufwendige Speicher; unwirtschaftlich; besonders wenn solar erzeugt, ist direkte Nutzung der Solarenergie vorzuziehen
Elektrizität	nahezu keine lokale Emission am Ort der Verwendung; geräuscharm	Emissionsverlagerung zum Kraftwerk; Batteriefragen (Recycling, Herstellung); sehr hohes Fahrzeuggewicht	unwirtschaftlich; stark eingeschränkte Einsatzgebiete (Schutzgebiete); keine flächendeckende Emissionsentlastung
Brennstoffzellen (BZ)	fast keine Emissionen am Ort der Verwendung; katalytische Brennstoffausnutzung; hoher Wirkungsgrad; niedrige Temperaturen	zusätzliche Verluste bei Zusatzaggregaten der BZ; hohe Anforderungen an H ₂ -Reinheit	Entwicklungsstand in Grundlagenforschung und Versuchsträger; Einsatz frühestens in 10-20 Jahren; BZ in Stationäranlagen vorzuziehen

Abb. 12: Alternative Kraftstoffe und Fahrzeugantriebe (Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)

2.2.5 Brennstoffzellen

Eine Schlüsselrolle für die Suche nach den so genannten Null-Emissionsfahrzeugen spielt Wasserstoff. Seit Beginn der 90er Jahre wird intensiv auf diesem Gebiet geforscht, wobei grundlegend zwei Konzepte unterschieden werden: Einerseits der Antrieb eines Fahrzeuges durch die direkte Verbrennung von Wasserstoff in einem entsprechend angepassten Verbrennungsmotor. Dieser Ansatz wird inzwischen nur noch von BMW verfolgt. Andererseits wird an Bord des Autos in Brennstoffzellen elektrischer Strom aus Wasserstoff produziert, der einen Elektromotor versorgt.

Für automobiler Anwendungen sind PEM (Proton Exchange Membrane)-Brennstoffzellen am besten geeignet. Sie liefern für PKW und auch Bus-

se ausreichend Leistung. Die im Wasserstoff gespeicherte chemische Energie wird zusammen mit Sauerstoff direkt in elektrische Energie umgewandelt, ohne die sonst in Kraftwerken nötigen Zwischenschritte über Wärme und mechanische Energie. Die namensgebenden Protonen werden durch eine Polymermembran ausgetauscht, die mit einem Katalysator beschichtet ist, damit die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser rein elektrochemisch abläuft. Die Arbeitstemperatur ist auf 80 °C begrenzt, was eine aufwändige Kühlung bedingt. So braucht ein solches Brennstoffauto rund dreimal mehr Kühlerfläche als ein Auto mit Dieselmotor. Ursache für die geringe Arbeitstemperatur sind Wassermoleküle in der Austausch-Membran, die für den Protonentransport notwendig ist. Volkswagen arbeitet daher an einer Hochtemperatur-PEM Zelle mit einer Betriebstemperatur von 160 °C. Statt Wasser wird hier Phosphorsäure als Elektrolyt eingesetzt. [Sch 06]

Für alle Brennstoffzellentypen wird nach einem kostengünstigen und ausreichend verfügbaren Katalysatormaterial gesucht. Denn der bisher eingesetzte Katalysator besteht in der Regel aus Platin und stellt den größten Kostenfaktor bei Brennstoffzellen dar. Bis zu einem halben Kilogramm Platin für mehrere Tausend Euro benötigt ein Forschungsfahrzeug.

Noch sind Brennstoffzellen selbst in Serienfertigung teuer

Die Speicherung von Wasserstoff im Auto geschieht entweder unter hohem Druck oder kälteverflüssigt oder auch als gebundenes Metallhydrid. Letzteres ist aufgrund des großen Gewichts des Metallspeichers und der beim Betanken entstehenden Absorptionswärme derzeit kaum realisierbar und benötigt noch Einiges an Grundlagenforschung. Chancen bestehen durch den Einsatz von Kohlenstoff-Nanotechnologie. Auch die Masse von Druck- oder Kältetanks ist relativ zur transportierten Energiemenge groß, entsprechend ist die Reichweite der Fahrzeuge begrenzt. Zusätzlich verflüchtigt sich der kälteverflüssigte Wasserstoff mit der Zeit. In der Praxis ist die Drucktankspeicherung handhabbar, auch bei Crashes und Beschuss mit scharfer Munition besteht keine Explosionsgefahr, teilte Ford mit.

Die Speicherung von Wasserstoff muss verbessert werden

Die Zahl der Wasserstoffauto-Prototypen und -Kleinstserien ist immens - am Brennstoffzellenantrieb wird intensiv geforscht. Allein Daimler beschäftigt eine Entwicklungsmannschaft von 500 Mitarbeitern und hat bisher weit über eine Milliarde Euro investiert. Am weitesten gediehen ist der Brennstoffzellenantrieb bei Nahverkehrs-Linienbussen, die ausreichend Platz für alle Komponenten bieten und bei den Verkehrsunternehmen regelmäßig gewartet werden. In mehreren europäischen Städten betreiben Verkehrsgesellschaften ihre Fuhrparks mit mehreren Wasserstoffbussen, deren rund sechsmal höhere Anschaffungskosten meist von der EU gefördert werden und wertvolle Erkenntnisse aus dem Alltagsbetrieb liefern. [Wei 04]

Daimler wird ab dem Jahr 2010 die B-Klasse als neuen Technologieträger für Brennstoffzellen in Kleinserie starten. Der Sandwichboden der B-

als auch A-Klasse reicht inzwischen für die Integration der Brennstoffzellentechnik vollkommen aus. Für die „B-Klasse F-Cell“ sind 136 PS (100 kW), 170 km/h und eine Reichweite von 400 km geplant. Startbereit ist das Fahrzeug selbst bei -15 °C. [Dai 07c]

Honda hat für den Sommer 2008 einen ambitionierten Schritt angekündigt: der „FCX Clarity“ mit Brennstoffzellenantrieb soll repräsentativen Kunden für eine monatliche Leasingrate von 600 US-Dollar in einer Kleinserie zur Verfügung gestellt werden. Honda benutzt keine PEM-Brennstoffzellen, sondern eine Eigenentwicklung. Der FCX Clarity ist speziell für den Brennstoffzellenantrieb konstruiert worden. [Hon 07]

Daimler und Honda
kündigen Kleinserien
von Brennstoffzellen-Autos an



Abb. 13: Belieferung einer Tankstelle in Berlin mit flüssigem Wasserstoff
(Quelle: BMW Group)

Das Brennstoffzellen-Auto ist ein
Elektro-Auto

Wie beim Verbrennungsmotor haben Brennstoffzellen einen optimalen Arbeitspunkt, der an sich nicht vereinbar ist mit den ständigen Lastwechseln eines Straßenfahrzeugs. Daher ist die Zwischenspeicherung der elektrischen Energie in Batterien und Superkondensatoren erforderlich. Die dazu nötigen Technologien werden mit der Einführung der Hybridfahrzeuge, die zusätzlich zum herkömmlichen Verbrennungsmotor mit Elektroantrieb fahren, ebenfalls weiterentwickelt.

Langfristig könnte ein serienreifes Wasserstoff-Automobil zur Verfügung stehen, das sich in Aussehen und Benutzung nicht wesentlich vom heutigen unterscheidet, dessen Treibstoff jedoch unabhängig vom Erdöl in einer vollkommen neuen Infrastruktur bereitgestellt wird. Auch der Anteil mechanischer Komponenten im elektrisch angetriebenen Automobil würde drastisch zurückgehen.

Umstritten ist die Effizienz des Wasserstoffantriebs über die gesamte Energiekette. Zwar findet die Umwandlung im Fahrzeug relativ effizient statt – jedenfalls wesentlich effizienter als bei Verbrennungsmotoren –, doch in der Gesamtbetrachtung verschlechtert die Herstellung des Wasserstoffs mittels Elektrolyse oder durch Reformierung von Kohlenwasserstoffen die Gesamtbilanz. Wasserstoff ist ein Energieträger, der nicht einfach „gefördert“ werden kann. Entscheidend ist daher, aus welchen Energiequellen der Wasserstoff gewonnen wird.

Die Gesamtbilanz muss die Quellen für den Energieträger Wasserstoff berücksichtigen

Eine PEM-Brennstoffzelle mit einem speziellen Platin-Ruthenium-Katalysator kann im Fahrzeug Methanol verstromen, wodurch der Aufbau einer neuen Infrastruktur für Wasserstoff verzögert werden könnte. Zwar ist die Leistungsdichte geringer, doch das flüssige Methanol ist einfacher handzuhaben und lässt sich prinzipiell aus jeder Kohlenstoffquelle gewinnen (Rohöl, Erdgas, Holzabfälle, Biomasse). [But 07]

Letztendlich könnte die Gesamtbilanz der gesamten Wasserstoffwirtschaft nach einer Betrachtung der Alternativen positiv ausfallen: wenn außer der Effizienzsteigerung herkömmlicher Verbrennungsmotoren langfristig keine Alternativen entstehen, könnte Wasserstoff der Energieträger der Zukunft werden. Falls aber die Batterietechnik weitere Fortschritte macht, könnte die Speicherdichte von Batterien an die von Wasserstofftanks herankommen. Dann würde die elektrische Energie des Autos der Zukunft elektrochemisch gespeichert und könnte auf den Zwischenschritt Wasserstoff verzichten.

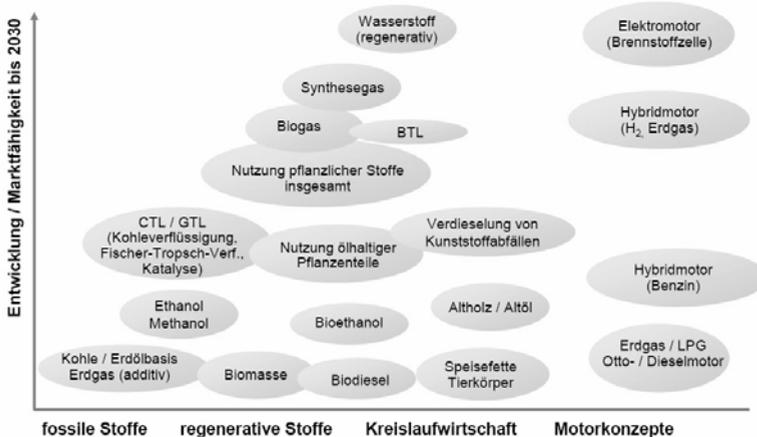


Abb. 14: Entwicklungspfade für neue Kraftstoffkonzepte (Quelle: Energie-Agentur.NRW)

2.3 Fahrwerk

Eines der ambitioniertesten Ziele der Automobilindustrie ist die Einführung von Steer-by-Wire. Hinter diesem Begriff verbirgt sich die elektrische Lenkung ohne mechanische Lenksäule. Diese beeinflusst bisher die konstruktionsbedingte Anordnung von Motor und Getriebe und erhöht die Verletzungsgefahr bei Auffahrunfällen für den Fahrer.

2.3.1 Steer-by-Wire

Ein elektrisch unterstütztes, mechatronisches Lenksystem erlaubt weitere automatische Eingriffe durch Fahrerassistenzsysteme wie ESP, da nicht nur Bremsen, sondern auch Gegenlenken zur Fahrstabilität beitragen kann. Spurhalteassistenten machen sich mit einem erhöhten Lenkwiderstand oder leichtem Rütteln am Lenkrad bemerkbar. Unterstützende Einparkhilfen profitieren ebenfalls von einer elektrischen Lenkung, wie beim Toyota Prius, der in Parklücken einlenkt, ohne dass der Fahrer dabei die Hände am Lenkrad hat.

Steer-by-Wire muss
redundant ausgelegt
sein

Rein elektrische Steer-by-Wire-Systeme dürfen nicht ausfallen, denn die Lenkung ist für die Fahrzeugbeherrschung fast noch wichtiger als die Bremse. Ohne Bremsen kann ein Fahrer durch Herunterschalten die Motorbremse nutzen, ausrollen oder an Leitplanken entlangrutschen und somit Bewegungsenergie reduzieren oder Hindernisse umfahren. Beim Totalausfall der Lenkung bleibt nur die Möglichkeit zu bremsen. Daher ist gesetzlich vorgeschrieben, dass Lenkanlagen keine rein elektrischen und keine rein pneumatischen Übertragungseinrichtungen haben dürfen. Die Sicherheit weitergehender Systeme muss von den Autoherstellern nachgewiesen werden, bevor Richtlinien und Gesetzeslage verändert werden könnten. Dieser Beweis steht noch aus, denn Steer-by-Wire bedingt mehrfach redundante Systeme, möglichst mit autarker Stromversorgung, was die Fahrzeugmasse deutlich erhöht. Doch es gibt auch Kompromisse: BMW ergänzte die mechanisch betriebene Lenksäule um ein integriertes Planetengetriebe, das den vorgegebenen Lenkwinkel je nach Fahrsituation und -geschwindigkeit variiert. Fällt diese aktive Lenkhilfe aus, entspricht die Situation dem Ausfall der hydraulischen Servolenkung, das Fahrzeug bleibt steuerbar. [Lem 05]



Abb. 15: Es gibt bereits reine Steer-by-Wire- als auch Drive-by-wire-Systeme im Sonderfahrzeugbau für mobilitätseingeschränkte Fahrer, redundant ausgelegt und TÜV-zugelassen. Die linke Hand steuert ein Mini-Lenkrad, die rechte den Schubhebel (Quelle: Paravan GmbH)

Eine Lenkung mit elektrischer Datenübertragung lässt jedoch das authentische Fahrgefühl vermissen, da das Lenkrad mechanisch von der Straße entkoppelt ist. Dieser Mangel muss durch Force-Feedback-Systeme ausgeglichen werden, die das Fahrgefühl in Echtzeit vermitteln sollen. Damit bestehen noch Herausforderungen, bevor die softwaredefinierte Lenkung nicht nur sicher, sondern auch praktikabel wird.

In der Fahrwerkstechnik gibt es in den nächsten Jahren noch einige Verbesserungsmöglichkeiten. Der Komfort kann mit Systemen zur Kompensation von Spurrillen und Seitenwind gesteigert werden, ebenso ist das vollautomatische Einparken denkbar. Doch während der Fahrt wird sich ein aktives Fahrwerk als besonders komfortabel herausstellen: es passt über Aktuatoren die Dämpfungskennlinie der Stoßdämpfer an unterschiedliche Straßenverhältnisse an und wird von Sensoren für Geschwindigkeit, Querbeschleunigung und Straßenzustand gesteuert. Die optimale Dämpfungskraft wird innerhalb von Millisekunden für jedes Rad einzeln angepasst.

Die Kurvengängigkeit des Autos kann durch lenkbare Hinterräder gesteigert werden: der Mindestradius würde sich verkleinern und die Manövrierfähigkeit in Parklücken und Parkhäusern erhöhen. Wenn im Gegensatz die Hinterräder in die gleiche Richtung auslenken wie die Vorderräder, dann gelänge ein Spurwechsel im Gefahrenfall rascher. Continental Automotive Systems arbeitet an solchen Systemen, sieht die Einführung aber nicht vor dem Jahr 2020. [Wal 06]

Neue Technologien
für das Fahrwerk
verbessern den Kom-
fort

2.3.2 Bremsen

Die elektrisch-
hydraulische Bremse
existiert bereits

Für „Brake-by-wire“, die „Bremse am Draht“ gelten elementare Sicherheitsüberlegungen. Brake-by-Wire ist mit elektrohydraulischen Bremssystemen bei einigen Modellen von Mercedes-Benz sowie den Hybridautos von Toyota und Ford im Serieneinsatz, bei denen die Bremspedalstellung elektrisch aufgenommen wird und die Bremskraftverteilung elektrohydraulisch erfolgt. Am Bremspedal selbst wird der passende Gegenstand nur simuliert. Ein Ausfall des Bordnetzes wird durch Superkondensatoren gepuffert, der Ausfall des Steuersystems wird durch eine konventionelle, direkte Verbindung zwischen dem Hauptzylinder und den Radzylindern kompensiert.

Rein elektrisches
Bremsen ist Zu-
kunftsmusik

Für künftige Anwendungen sind rein elektromechanische Systeme von Interesse, bei denen die Bremsklötze mittels Motor bzw. Aktor auf die Scheiben gepresst werden. Viele Zulieferer arbeiten daran, sind jedoch wegen des hohen Energiebedarfs auf ein Bordnetz mit 42 Volt Spannung angewiesen, das so nicht existiert – erst recht nicht in einer ausfallsicheren Variante.

Alternativ entwickelt Continental (vormals Siemens VDO) eine elektronisch geregelte Keilbremse (Electronic Wedge Brake, kurz EWB), die den Anpressdruck zum größten Teil aus der Bremsreibung selbst bezieht und mit 12 Volt betrieben werden kann. Selbst auf glatten Straßen kann mit ihr die Bremsstrecke um 15 % reduziert werden. Die Serienproduktion soll ab 2010 starten.



Abb. 16: Eine elektronische Keilbremse wird auf dem Bremsenprüfstand getestet (Quelle: Continental/Siemens VDO)

2.3.3 Räder und Reifen

Alle Kräfte zwischen Fahrzeug und Fahrbahn werden über die Reifen übertragen, denen trotz großer Bedeutung für die Sicherheit meist viel zu wenig Beachtung geschenkt wird. Zwar werden für die aktiven Sicherheitssysteme an Bord die Drehzahlen der Räder registriert und die Dynamik des Fahrzeugs durch Beschleunigungssensoren erfasst. Doch der Reifenzustand selbst und die Qualität des Reifen-Fahrbahnkontakts sind noch Gegenstand von Forschungsprogrammen wie den EU-Projekten APOLLO und FRICTION. Der „intelligente Reifen“ erfasst über einen optischen Sensor in der Felge die Gürtelbewegung des Reifens und ermittelt Parameter aus der Reifenverformung und einem Vergleich mit einem mathematisch vereinfachten Reifenmodell. Reifendruck und -zustand sind damit messbar. Wie der Reibwert und Straßenzustand abgeleitet werden kann, wird derzeit erforscht. [Wal 06]

Bisher unberücksichtigte Daten über den Reifenzustand werden ins Fahrzeug gefunkt

Reifenhersteller Continental hat den herkömmlichen Reifendrucksensor mit neuen Funktionen ausgestattet: ein sieben Gramm leichtes Modul auf der Innenseite des Reifens meldet die aktuelle Radlast und statische Reifendaten ins Fahrzeuginnere. Neben der Optimierung des Reifendrucks mit entsprechender Kraftstoffersparnis ist auch ungleichmäßige Lastverteilung direkt am Ort des Geschehens detektierbar, wichtig bei Transportern und LKW.

Den Auto-Rädern könnte in Zukunft eine ganz andere Bedeutung als heute zukommen. Continental (vormals Siemens VDO) entwickelt ein Radsystem mit dem Namen „eCorner“, das den Antrieb, die klassische Radaufhängung mit hydraulischen Stoßdämpfern, die mechanische Lenkung und die hydraulische Bremse ersetzen soll und besonders für Elektrofahrzeuge gedacht ist.

Das integrierte Rad vereint mehrere Baugruppen auf kleinstem Raum

Dabei beschleunigen elektrische Radnabenmotoren im Rad selbst das Auto. Den Kontakt zur Straße wird auch hierbei ein Reifen übernehmen, in dessen Innerem ein Sensor (Tire Guard) den Reifendruck unter Beobachtung hält. Aber schon bei der Aufhängung wird sich das Zukunftsrads deutlich von heutigen Rädern unterscheiden: Wo heute aufwändige mechanisch geprägte Radaufhängungen mit Öldruck-Federelementen dafür sorgen, dass die Passagiere eine komfortable Fahrt und die Räder immer einen sicheren Kontakt zum Boden haben, spielt in Zukunft die Elektronik eine erheblich größere Rolle. Elektromotoren übernehmen die Aufgabe, für den dauerhaften Kontakt zwischen Rad und Straße zu sorgen. Die neue Aufhängung ermöglicht den Verzicht auf eine hydraulische Lenkung – zukünftig kann jedes einzelne Rad einen individuellen Lenkwinkel einschlagen. Beim Reduzieren der Geschwindigkeit kann schließlich der Radnabenmotor durch den Generatoreffekt als Hilfsbremse genutzt werden. Die so erzeugte elektrische Energie lädt die Fahrzeugbatterie, bis die elektronische Keilbremse (EWB) zusätzlich zur Generatorbremse jedes Rad einzeln verzögert. Das eCorner-System kann dank der drehbaren Räder fast quer einparken oder mit elektronischem Lenkein-

griff und gezielter Beschleunigung einzelner Räder das Fahrzeug in Gefahrensituationen besser stabilisieren.

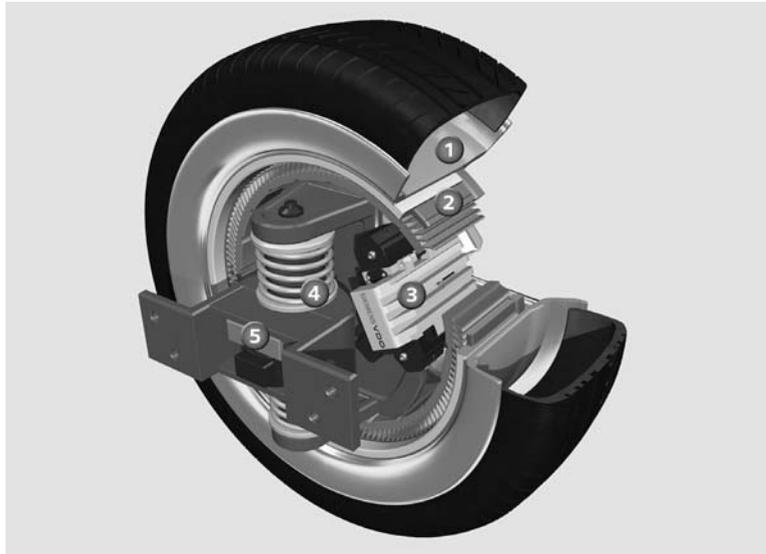


Abb. 17: Vision „eCorner“: Die Felge (1) bleibt bestehen. Darunter findet sich der Radnaben-Elektromotor (2). Gebremst wird über die elektronische Keilbremse (3). Die aktive Dämpfung (4) ersetzt wie die elektronische Lenkung (5) die klassische Hydraulik. (Quelle: Continental)

Das aktive Fahrwerk sieht Unebenheiten der Straße voraus und stellt die Dämpfung darauf ein

Während das eCorner-System für Drive-by-Wire-Autos gedacht ist, die in 15 Jahren auf der Straße zu sehen sein werden, zeigt sich bei den Schwingungsdämpfern schon heute eine interessante Entwicklung auf. Magneto-rheologische flüssigkeitsgefüllte Dämpfer erlauben eine kontinuierliche, variable Dämpfungsregelung, indem die Dämpferflüssigkeit auf ein Magnetfeld reagiert. Die Dämpfkraftverstellung ist bei sehr schnellem Ansprechverhalten über einen wesentlich weiteren Bereich möglich als mit herkömmlichen, über Ventile geregelte Dämpfungssystemen. Wird nun die vorausliegende Straße durch einen Laserscanner des Autos abgetastet, kann der Fahrzeugaufbau vollkommen von der Fahrbahn entkoppelt werden. Das „aktive Fahrwerk“ lässt sich nicht nur nach Fahrerwunsch auf sportliche oder komfortable Dämpfung umschalten, es stellt sich zusätzlich vorausschauend auf Unebenheiten der Straße ein. Dadurch ist ein bisher unbekannter Fahrkomfort realisierbar. [Dai 07b]

Der Rollwiderstand unterstützt die Kraftstoff-Ersparnis

Den Reifen kommt eine besondere Bedeutung unter dem Aspekt der Kraftstoffersparnis zu. Ein Teil der Reduktion des Kohlendioxid-Ausstoßes soll nicht allein durch Verbesserung des Verbrennungsmotors und Beimischung von Biokraftstoffen erzielt werden, sondern durch Leichtlaufreifen. Die Politik plant zu diesem Zweck ein Klassifizierungssystem, bei dem die Reifen ähnlich wie Kühlschränke einer Umweltklasse zugeordnet werden sollen. Die alleinige Klassifizierung nach Leicht-

laufeigenschaften sehen die Reifenhersteller eher kritisch. Ein guter Rollwiderstand resultiert aus einer besonders harten Gummimischung. Diese verschlechtert jedoch Fahr- und Bremseigenschaften auf nasser Straße deutlich. In einer Klassifizierung müsse daher auch das Nassbremsen und die Geräusentwicklung des Reifens berücksichtigt werden. Ungeklärt bleibt die Frage, inwieweit der Reifenabrieb zur Feinstaubbelastung beiträgt. [Sch 08a]

Ein neu entwickeltes Hochleistungs-Gummi-Additiv des Spezialchemie-Konzerns Lanxess kann den Abrieb der Laufflächen von Automobilreifen deutlich verringern. Die Nanopartikel bestehen aus den herkömmlichen Reifengummi-Rohstoffen und verbinden sich sehr gut mit Kieselsäure, die anstelle von Ruß zur Verringerung des Rollwiderstandes bei gleichzeitiger Verbesserung der Nassrutschfestigkeit eingesetzt wird. [Sch 08b]

2.4 Elektronik

Einen immer größeren Anteil der Fahrzeugtechnik bildet die Elektronik im Automobil. Noch hat sie einen Anteil von 20 % an der Wertschöpfung in Neufahrzeugen, im Jahr 2015 sollen es schon 35 % sein, prognostiziert der Verband der Automobilindustrie (VDA). [VDA 06]

Navigationsgeräte sind die Anwendung mit dem größten Wachstum. Während sich immer mehr Autofahrer fest installierte oder mobile Navigationssysteme anschaffen, entwickeln die Hersteller Software, die nicht nur eine Straßenkartenansicht, sondern auch gleich markante Gebäude in 3D-Ansicht als Orientierungshilfe zeigt. Wäre die Ortungsgenauigkeit der Satelliten des Global Positioning Systems für zivile Anwendungen besser, ließen sich auch Fahrspur-genaue Fahrtinformationen geben. Für solch präzise Angaben ist das europäische, zivile Satellitennavigationssystem GALILEO geplant, das nach vielen politischen und wirtschaftlichen Schwierigkeiten frühestens 2013 in Betrieb gehen soll. [EU 07]

Bisher sind die Dateiformate der heutigen Navigationssysteme nicht genormt: fast jedes Modell benutzt ein eigenes Datenformat, für das die Rohdaten der Kartenlieferanten eigens umgesetzt werden müssen. Bei Volkswagen müssen deshalb allein 200 verschiedene DVD-Versionen aus den jährlichen Kartenupdates für die festeingebauten Navigationssysteme generiert werden. Mehrere Autokonzerne, Gerätehersteller und Kartenlieferanten haben daher in der PSF-Initiative beschlossen, das „Physical Storage Format“ einzuführen, mit dem die Datenspeicherung vereinheitlicht werden kann.

Europäische Satelliten erlauben fahrspurgenaue Navigation

2.4.1 Fahrerassistenzsysteme

Den größten Anteil der Elektronik im Automobil haben die Fahrerassistenzsysteme. Viele davon sind inzwischen in fast allen Fahrzeugen serienmäßig eingebaut, wie etwa das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) oder das Antiblockiersystem (ABS). Beide sollen in Ausnahmesituationen das Auto steuerbar halten, indem sie in die Fahrphysik eingreifen. Ihr Nutzen ist heute unstrittig.

Für Oberklasse-PKW gibt es bereits Nachtsichtsysteme, die gewissermaßen den Horizont des Fahrers erweitern. Selbst mit einem leistungsstarken Xenon-Fernlicht ist die Sichtweite begrenzt, weil das Lichtkegeldeign verhindern muss, Fahrer auf der Gegenseite zu blenden. Passive Nachtsichtsysteme nehmen Infrarotstrahlung auf, so dass auf einem Monitor wärmere Objekte wie Menschen und Tiere in bis zu 300 Metern Entfernung erkannt werden können. Aber auch die nächtliche Beleuchtung der Region vor dem Fahrzeug durch spezielle Infrarotscheinwerfer ist möglich. Eine Kamera hinter der Windschutzscheibe nimmt das so unsichtbar beleuchtete Bild auf und zeigt auch Fahrbahnmarkierungen und Verkehrsschilder in bis zu 150 Metern Abstand auf einem Schwarz-Weiss-Monitor. Angesichts der steigenden Zahl älterer Fahrer mit Schwierigkeiten beim Nachtsehen wird diese Technik alle Fahrzeugklassen erreichen. Eine simple und gängige Technik sind Rückfahrkameras. Die aerodynamikgetriebene Karosserieform bedingt häufig eine schlechte Straßensicht durch die Heckscheibe, die das „elektronische Auge“ ausgleicht. [Cro 07a]

Nachtsichtgeräte erweitern den Horizont



Abb. 18: Nachtsichtsystem auf Infrarotbasis (Quelle: Servicebüro FAS)

Im vergangenen Jahr waren im deutschen Straßenverkehr über 2,5 Millionen Unfälle mit knapp 460 000 Verletzten und mehr als 6 500 Unfalltoten zu beklagen. Die meisten der Unfälle ereignen sich, weil der Fahrer unaufmerksam, abgelenkt oder von der Situation überfordert ist. Hier setzen vorausschauende, aktive Sicherheitssysteme an und korrigieren den Fahrer bei Bedarf. So bestimmen Laserscanner, Kameras und angeschlossene Bordcomputer die Position des Autos auf der Straße. Mit diesen Informationen können sowohl Spurwechselassistenten als auch Spurverlassenswarner realisiert werden: bei ersterem wird ein Fahrer gewarnt, wenn beim beabsichtigten Spurwechsel sich von hinten ein anderes Fahrzeug auf der angestrebten Fahrspur nähert, das ansonsten im toten Winkel übersehen werden könnte. Bei letzterem registriert das Fahrzeug, wenn der Fahrer aus Unachtsamkeit die eigene Fahrspur verlässt und warnt ihn zum Beispiel durch Vibration des Sitzes. Diese Systeme sind bereits in Oberklassefahrzeugen von Mercedes-Benz, Audi und Volvo verfügbar. Zukunftsmusik ist die elektronische Unterstützung bei der Beobachtung des Querverkehrs: Kameras mit dreidimensionaler Wahrnehmung können zum Beispiel querschneidende Fahrradfahrer erkennen. Da sich fast ein Drittel der Unfälle an Kreuzungen und Einmündungen ereignet, kann die elektronische Überwachung sehr hilfreich sein. Problematisch ist allerdings die Generierung der dreidimensionalen Ansicht: Es sind mindestens zwei herkömmliche Kameras nötig, deren Bilder aufwändig verrechnet werden müssen. Alternativ kommt eine neuartige, mikrointegrierte 3D-Echtzeitkamera zum Einsatz, die die Tiefenwirkung der Aufnahmen berücksichtigt.

Assistenzsysteme
korrigieren aktiv un-
aufmerksame Fahrer

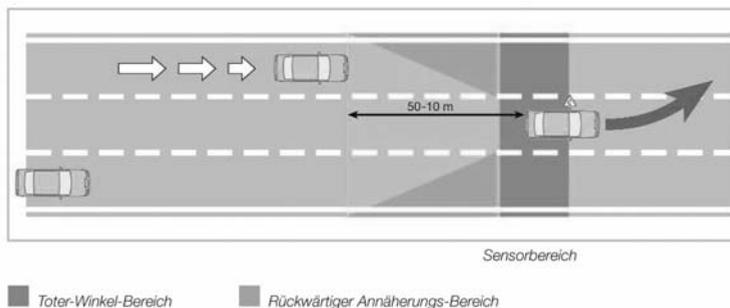


Abb. 19: Der Spurwechselassistent behält rückwärtige, benachbarte Fahrzeuge im Blick (Quelle: Servicebüro FAS)

Die vorausschauenden Sicherheitssysteme können bei einem drohenden Unfall mit den passiven verknüpft werden. Auf diese Weise wird das Luftfederfahrwerk verhärtet und macht dadurch das Fahrverhalten stabiler. Die Lenkung wird adaptiert und spricht direkter an. Die Bremsen werden in Alarmbereitschaft gesetzt und der Bremsdruck für eine Schnellbremsung vorsorglich aufgebaut. Die Sicherheitsgurte straffen sich leicht, und elektrisch einstellbare Sitze fahren automatisch in die

Bei drohenden Unfällen werden Vorsorgemaßnahmen eingeleitet

optimale Position zu den Airbags. Seitenscheiben und Schiebedach schließen sich – so können keine Fremdkörper ins Auto gelangen. Kommt es nicht zum Unfall, sind alle Maßnahmen umkehrbar. Geschieht tatsächlich ein Unfall, sind die passiven Sicherheitssysteme optimal darauf vorbereitet.

Ein Tempomat hält die vorgewählte Geschwindigkeit automatisch, wird jedoch erst mit einem integrierten Abstandsregler zum ersten Fahrerassistenzsystem mit integrierter Umfeldsensorik. Dieses System beobachtet den voraus fahrenden Verkehr mittels Radar oder Infrarotkameras und bremst das Fahrzeug automatisch ab, wenn der Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen zu gering ist. Eventuell wird der Fahrer noch zusätzlich gewarnt, da die Verzögerung für dieses automatische System vom Gesetzgeber auf 40 % der maximal möglichen Verzögerung begrenzt ist.

Auf eine ganz andere Weise „vorausschauend“ ist ein System von Nissan, das vor dem Anlassen des Motors über einen Sensor im Gangschalthebel aus dem Schweiß des Fahrers den Blutalkoholgehalt bestimmt. Bei Überschreitung eines Grenzwertes verweigert das Fahrzeug den Dienst. Da ein privater PKW mit dieser Schutzeinrichtung kaum verkäuflich wäre, werden gewerbliche Fahrer wie Taxen und Transportunternehmer als Kunden anvisiert.



Abb. 20: Der Querverkehrsassistent warnt über ein Head-up-Display auf der Windschutzscheibe vor bewegten Objekten außerhalb des direkten Sichtfeldes des Fahrers (Quelle: BMW Group)

Informative Systeme wie Navigationshilfen sind inzwischen weit verbreitet. Der Markt für Navigationssysteme boomt, und die stetige Verbesserung der Hardware sorgt dafür, dass das Straßennetz ganz Mitteleuropas mit Zusatzinformationen auf eine einzelne Speicherkarte passt. Mehr mobile Rechenleistung und mehr Speicherplatz wird schon bald nicht nur dreidimensionale Karten aus der Vogelperspektive ermöglichen, sondern auch die Abbildung der Fassaden markanter Gebäude. Der Fahrer muss weniger abstrahieren, die Orientierung wird noch einfacher.

Zwei Verbesserungen werden in Zukunft Navigationsgeräte ganz besonders beeinflussen: derzeit sind die geografischen Kartendaten meist über ein halbes Jahr alt, bevor sie auf CD-ROMs, DVD oder Speicherkarten die Kunden erreichen. Auf einem zentralen Server gespeicherte Pläne und online übertragene Routenführungen, wie sie heute schon in Navigationslösungen für Handys benutzt werden, könnten die Aktualität erheblich steigern. Voraussetzung ist ein akzeptabler Preis für die Datenübertragung, der im Kaufpreis des Gerätes enthalten ist oder für jede Routenberechnung einzeln abgerechnet wird. Wenn dann das neue europäische Navigationssatellitensystem Galileo eine noch exaktere Positionierung möglich macht, könnten Fahrempfehlungen auch in der Stadt Fahrspurgenau gegeben werden. Galileo wird im nächsten Jahrzehnt mit dem kommerziellen Betrieb starten und, zusammen mit dem bisherigen Global Positioning System GPS, eine Zentimeter-genaue und zuverlässige Positionsbestimmung erlauben.

Schon heute wird von Navigationssystemen als Zusatzinformation häufig die zulässige Höchstgeschwindigkeit angegeben - mit dem Risiko, dass die Information nicht aktuell ist. Das träfe selbst bei einer Online-Übertragung der Daten zu. Es liegt also nahe, dem Fahrer die relevanten Verkehrszeichen einzublenden, nachdem eine Kamera die Umgebung daraufhin abgesucht hat. Zusammen mit dem bereits erwähnten Nachtsichtgerät kann gerade in unübersichtlichen Situationen Ordnung geschaffen werden.

Die 3D-Ansicht von Navigationssystemen zeigt auch Gebäude mit Fassaden

Kartendaten können mit lokalen Informationen von Fahrzeug-Kameras zusammengeführt werden



Abb. 21: Lokale „Car-to-Car“-Kommunikation (Quelle: CAR 2 CAR Communication Consortium)

Autos kommunizieren
untereinander über
die Verkehrslage

Anstatt sich Informationen per Satellit aus dem All oder aus zentralen Datenbanken zu holen, erscheint ein anderer Weg attraktiv: Die Fahrzeuge selbst kommunizieren untereinander. Bei der „Car-to-Car“-Kommunikation können Autos die aktuelle Lage an benachbarte Fahrzeuge weitergeben. Das können zum Beispiel Informationen über plötzlich auftretendes Glatteis sein, oder eine Verkehrsstockung hinter einer Kuppe oder Kurve. Als Übertragungsmedium kommt eine Funktechnik wie W-LAN in Frage, aber auch optische Impulse in Scheinwerfern und Rückleuchten sind denkbar. Durch den Einsatz von Leuchtdioden können diese sehr schnell und für Menschen unmerklich moduliert werden und somit Daten weitergeben. Bei allen Konzepten ist natürlich eine Normung und eine gewisse Verbreitung ausgerüsteter Fahrzeuge nötig, damit sich das System selbst am Laufen hält. Die Firmen Fiat, Volkswagen, Daimler, Renault und Audi entwickeln darum im Konsortium „CAR 2 CAR“ das „Network on Wheels“. [Sti 07]

Die Informationsübertragung von Fahrzeug zu Fahrzeug im vernetzten Verkehr beinhaltet neben technischen Problemen – etwa der Störsicherheit – aber auch ein psychologisches. Damit das Gesamtsystem funktioniert, müssen sich viele Verkehrsteilnehmer aktiv beteiligen. Der Bezug von Informationen wird den meisten Verkehrsteilnehmern leichtfallen, die Preisgabe von durchaus „unbequemen“ Daten, wie der aktuellen Fahrgeschwindigkeit, weniger. Sollte die sich außerhalb des erlaubten Rahmens bewegen, wird das Fehlverhalten für alle sichtbar. Behörden könnten Interesse an solchen Daten haben. [Set 07]

Manche Fahrerassistenzsysteme wie Navigationshilfen, Telefone, Infotainmentsysteme aber auch Klimaanlage müssen vom Fahrer manuell bedient werden. Spracherkennungssysteme sollen hier Abhilfe schaffen. Diese arbeiten inzwischen auch sprecherunabhängig, also ohne vorheriges Training. Die Steuerung durch einzelne Sprachbefehle oder Aussprache von Ortsnamen ist bereits möglich, doch in Zukunft kann der Fahrer auch mit ganzen Sätzen mit den Assistenzsystemen interagieren.

Spracherkennung erleichtert die Bedienung

Manchmal ist das Sprechen vielleicht gar nicht mehr möglich: im Falle eines Unfalls soll „eCall“ automatisch Hilfe holen und dabei den mittels GPS oder Gallileo ermittelten Fahrzeugstandort an eine Notrufzentrale senden. Das von der EU initiierte Projekt sieht mittelfristig eine gesetzlich vorgeschriebene Bestückung von Neuwagen vor.

Automatischer Hilferuf nach Unfällen

Forscher haben langfristig nicht nur eine Vielzahl von Assistenzsystemen im Auge, sondern arbeiten bereits am vollständig autonomen PKW. Der Fahrer kann sich dann wie in Bahn oder Bus während der Fahrt mit anderen Sachen beschäftigen. Mehrere Videokameras und 360°-Laserscanner erfassen die Fahrzeugumgebung, leistungsstarke Computer berechnen in Echtzeit die nötigen Aktionen. Da der Fahrer keine Fahrfehler mehr begehen kann, soll dadurch die Zahl der Unfälle drastisch zurückgehen. Bis dahin wäre aber auch die Rechtsfrage zu klären, inwieweit die passiven Fahrer oder die Hersteller für die Fehlentscheidungen der autonomen PKW haften. [Kür 07]

Durch autonome Autos kann die Verkehrsdichte erhöht und folglich der Straßenraum besser genutzt werden. Umgekehrt werden die Erkenntnisse aus der Entwicklung der Roboter-Fahrzeuge auch in die Gestaltung einzelner Fahrerassistenzsysteme einfließen, die in den nächsten Jahren den Markt erreichen. General Motors kündigte in einem ambitionierten Zeitplan die Serienfertigung von autonomen PKW für das Jahr 2018 an. [Spi 08]

Autonome Autos kommen ohne Fahrer aus

Eine Vorstellung von den Fähigkeiten vollständig autonomer Autos geben mehrere von der Forschungsabteilung des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums veranstaltete Wettbewerbe. Im Jahr 2004 kam keines der Fahrzeuge im 240 Kilometer entfernten Ziel der Wüstenstrecke an, immerhin eines schaffte die ersten 12 Kilometer. Im nächsten Jahr schafften 22 von 23 teilnehmenden Autos das erste Dutzend Kilometer und fünf erreichten sogar das entfernte Ziel nach rund sieben Stunden Fahrzeit. Im November 2007 führte die Route 96 Kilometer weit durch eine stillgelegte Militärbasis. Diesmal trafen die Fahrzeuge in einem stadtverkehrsähnlichen Umfeld auf 50 bemannte Autos, die normalen Straßenverkehr simulierten, und mussten die Verkehrsregeln beachten. Immerhin sechs von elf Wagen der Finalfahrt erreichten das Ziel ohne längeren Stillstand oder Kollisionen, leider keines der zwei deutschen Teams, die wie das zweitplatzierte US-Team umgebaute VW Passat benutzen.

2.4.2 Displays und Beleuchtung

Die Anzeigeeinstrumente haben in den letzten Jahren eine immer größere Bedeutung gewonnen. Die Zahl der Informationen, die den Fahrer erreichen, sind durch Navigationssystem, Meldungen neuartiger Zustandssensoren und komplexer werdender Komponenten wie vielfältig einstellbarer Klimaanlage, enorm gestiegen. Bestehen bleibt ein grundsätzliches Problem: um eine Information vom Armaturenbrett aufzunehmen, muss der Fahrer den Blick kurz von der Straße wenden.

Blick auf die Straße
statt auf das Arma-
turenbrett

Eine mögliche Strategie dagegen sind sogenannte Head-up-Displays, deren Informationen in die Windschutzscheibe eingespiegelt werden und im Sichtfeld des Fahrers ein bis zwei Meter voraus über der Motorhaube zu schweben scheinen. Dazu wird das Bild eines Displays mit Hilfe von Optik- und Spiegelsystemen auf einen sogenannten „Combiner“ projiziert, meist eben die Windschutzscheibe, deren Krümmung durch den geschickten Einsatz von Hohlspiegeln in der Optik ausgeglichen wird. Dabei wird das Auge nicht nur nicht mehr auf eine andere Stelle außerhalb der Fahrbahn abgelenkt, es muss auch nicht umfokussieren, da die Information auf der Windschutzscheibe virtuell weit entfernt zu stehen scheint.

Hierbei sollten natürlich nur fahrtrelevante Informationen oder Warnungen eingelendet werden, um den Fahrer nicht zu verwirren. Die weitaus meisten Anzeigen bleiben im Armaturenbrett und in der Mittelkonsole. Auch hier stellt sich die Frage der Aufmerksamkeitsökonomie. Da der Blickwinkel des Fahrers gerade bei flüchtiger Betrachtung eingeschränkt ist, müssen Symbole entsprechend farblich kodiert sein: eine blaue Motortemperaturleuchte zeigt den Normalzustand, eine rote hingegen Überhitzung. Die Signalfarbe wird auch aus dem Augenwinkel besser registriert als die Form. Farbige LC-Displays erfüllen diesen Wunsch hinreichend und setzen sich in Automobilen immer mehr durch. Dieser Prozess ist jedoch langsam, denn die Ansprüche an sie sind im Automobil wesentlich höher als zum Beispiel bei Anwendungen in Computern, was Temperaturfestigkeit und Ablesbarkeit bei hellem Umgebungslicht angeht.

Flexible Anzeigen
dienen dem Design

Auch flexible Displays aus Kunststoffen, die ohne einen starren Glasmantel auskommen, wecken das Interesse der Automobilbauer. Mit ihrer geometrisch freien Form und Mehrfarbigkeit könnten sie neue Aspekte der Gestaltung setzen. Kunststofffolien haben jedoch noch eine relativ geringe Haltbarkeit, daher besteht Forschungsbedarf. Es besteht die Hoffnung, dass flexible Displays den Durchbruch in Geräten des Konsumenten-Massenmarkts schaffen, die Herstellkosten sinken und allein dadurch der Einsatz im Automobil interessant wird, denn die echte „Killerapplikation“ wird noch gesucht. Ob es am Ende sogar Sitzbezüge sein werden, deren Farbe auf Knopfdruck wechselt, ist noch nicht abzusehen. Auch die Innenraumbeleuchtung, über den gesamten „Auto-Himmel“

aufgespannte flächige organische Leuchtdioden als Innenraumbeleuchtung sind denkbar. [Fih 07]

Das klassische Zeigerinstrument hat noch nicht ausgedient. Fortschritte sind auch in anderen Bereichen zu erwarten: ein mittig im Cockpit angebrachter Monitor kann je nach Betrachtungswinkel zwei verschiedene Bilder anzeigen. Möglich macht das eine feine Lochmaske, die dem Fahrer die Navigationskarte, dem Beifahrer einen Spielfilm zeigt.

Mithilfe moderner Displays ist ein verbessertes Bedienkonzept realisierbar. Derzeit gibt es die klassischen, haptischen Taster und Drehregler in der Mittelkonsole, LCD-Displays mit Software-definierten Funktionstasten an ihrer Seite sowie den kombinierten Dreh-/Druckknopf, wie ihn BMW mit dem iDrive als multifunktionales Bedienelement eingeführt hat. Ergänzend kommt noch der Touchscreen hinzu, der durchaus verstärkt mit Gesten anstelle einfachen Fingerdrucks funktionieren könnte. Der kanadischen Firma Digital Dash Ltd. in Montreal erforscht eine Kombination aus Display und Bedienelementen: auf die Bedienoberfläche mit real-physikalischen, aber passiven Tasten und Drehknöpfen werden rückwärtig Beschriftungen und Zustandsanzeigen projiziert und die Bewegung der Bedienelemente mit Kamera-ähnlichen Sensoren von hinten optisch abgetastet, damit die Stellung von Tasten und Drehreglern berührungslos ohne weitere elektrische Verbindungen erfasst werden kann.

Virtuelle Mensch-
Maschine-
Schnittstelle

Bei der Fahrzeugbeleuchtung ist der Fortschritt im wahrsten Sinne des Wortes sichtbar. Gasentladungslampen anstelle von Glühlampen, verbesserte Reflektortechnik, die exakte und blendungsfreie Ausleuchtungsprofile ermöglicht und adaptives Kurvenlicht setzen sich durch. Auch Richtungsanzeiger und Schluss- sowie Bremsleuchten mit Leuchtdioden setzen sich immer mehr durch. Leuchtdioden haben im Automobil eine Menge Vorteile: sie sind sparsam im Energieverbrauch, schalten sehr schnell - und zeigen somit dem nachfolgenden Fahrer den Bremsvorgang ohne Verzögerung an - und sind wartungsarm. Ihre Lebensdauer beträgt ein Vielfaches herkömmlicher Glühlampen, allein schon, weil sie unempfindlich gegen Erschütterungen sind.

Leuchtdioden sind in den Farben Rot, Gelb und Grün verfügbar und sind darum für die Verwendung in Lichtsignalanlagen und als Blink- und Schlusslicht am Fahrzeug prädestiniert. Die große Herausforderung ist die Gestaltung der Frontscheinwerfer aus weiß leuchtenden LEDs. Weiße LEDs haben inzwischen den Status erreicht, dass sie nicht nur zur Signalisierung und als Hintergrundbeleuchtung für Displays geeignet sind, sondern auch aktiv größere Flächen ausleuchten können. Die Lichtstärke,

Leuchtdioden erset-
zen Glühfadenlampen



Abb. 22: Der erste Voll-LED-Scheinwerfer mit 54 Leuchtdioden im Audi R8 (Quelle: Audi)

wie sie für Fernscheinwerfer nötig ist, erreichen sie aber noch nicht. Für Positionslicht, Tagfahrlicht und Abblendlicht reicht die Lichtstärke jedoch aus. Ausnahme bleibt bisher ein Scheinwerfer als Sonderausstattung für den Audi A8, bei dem Leuchtdioden alle Frontlichtfunktionen übernehmen. Insgesamt sind dabei in einem Scheinwerfer 54 Leuchtdioden im Einsatz. Zwei kleine Lüfter verteilen die wegen der hohen Ströme entstehende Wärme nach vorn zur Abdeckscheibe, die damit im Winter auch gleich enteist wird. Besonders die Anordnung der beinahe punktförmigen Lichtquellen, die zum Beispiel band- oder ringförmig angeordnet werden können, nutzen Designer für ein unverwechselbares, leuchtendes „Outfit“ der Fahrzeuge. Die Tageslicht-ähnliche Lichtfarbe der weißen LEDs wirkt zudem für den Fahrer kontraststeigernd.

LEDs sind besonders für eine punktgenaue Beleuchtung geeignet. So wäre durch das Schalten spezieller LED vor bestimmten optischen Reflektoren ein rein elektrisch angesteuertes Kurvenlicht ohne Mechanik möglich. Langfristig werden LED die bisherigen Halogen- oder Xenonleuchten ablösen. LED-Arrays, die mehrere LEDs für eine Funktion enthalten, können flach gehalten werden und neue Bauformen möglich machen.

2.4.3 Software und Vernetzung

Die Vielzahl der elektrischen und elektronischen Komponenten im Fahrzeug wird mit Steuergeräten betrieben, die auch untereinander kommunizieren müssen. Die Fahrgeschwindigkeit wird beispielsweise vom Elektronischen Stabilitätsprogramm, den Tempomat und der Lautstärkeanpassung des Radios ausgewertet. Die miteinander verknüpften Systeme müssen dazu physikalisch verbunden werden und über ein einheitliches Protokoll kommunizieren.

Die Software für die Steuergeräte entwickeln die Automobilhersteller selbst, weswegen neue Komponenten der Zulieferer an die herstellereigenen Standards angepasst werden müssen. Um diesen aufwändigen Prozess zu vereinfachen, passt daher der Standard „Automotive Open System Architecture“ (Autosar) seit 2003 die Schnittstellen aneinander an. Über einhundert Firmen haben sich dem Konsortium angeschlossen, das über das effiziente Zusammenspiel der Kfz-Software die Komplexität und die Kosten reduzieren möchte. Im VW Passat ist bereits ein Steuergerät Autosar-konform, zwischen 2012 und 2014 wird mit dem ersten komplett auf Autosar basierenden Autoelektroniknetzwerken gerechnet. [VDI 07c]

Software im Auto
verständigt sich über
neue Schnittstellen

Der Autosar-Initiative gehören deutsche, französische und US-amerikanische Firmen an, ebenso Toyota. In Japan wird ebenfalls an einem eigenen Automotive-Betriebssystem namens JasPar (Japan Automotive Software Platform Architecture) gearbeitet. Das japanische Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie unterstützt ein Jointventure aus führenden Automobilhersteller und -zulieferern sowie Elektronikunternehmen im Jahr 2008 mit 6 Millionen Euro. [Hei 07]

Wie Steuergeräte sowie Sensorik und Elektronik an Bord untereinander kommunizieren, hängt vom sogenannten Datenbus ab. Bisher sind CAN (Controller Area Network), LIN (Local Interconnect Network) und MOST (Media Oriented System Transport) im Einsatz. Jedes dieser Bussysteme erfüllt spezielle Ansprüche bezüglich Übertragungsgeschwindigkeit, Echtzeitfähigkeit und Tauglichkeit für verschiedene Anwendungen. Die anwachsende Länge der Verkabelung zur Datenübertragung – in einem BMW der 3er Reihe etwa 1800 Meter mit 30 kg Gewicht – sowie die Integration der verschiedenen Bussysteme untereinander stellt jedoch ein Problem dar, das in Zukunft durch Flexray gelöst werden soll. Dieser Datenbus soll die Aufgaben der anderen Bussysteme langfristig übernehmen und für eine sichere Verbindung bei anspruchsvollen Aufgaben wie der By-wire-Steuerung sorgen. Den ersten Serieneinsatz hat Flexray seit 2006 bei der aktiven Dämpferkontrolle des BMW X5.

Datenkabel werden
vereinheitlicht und
leichter

Einen anderen Ansatz, um die ausufernden Leitungslängen der Kabelbäume wesentlich zu reduzieren, hat die BMW Forschung und Technik GmbH Ende 2007 vorgestellt: das Internet Protocol (IP) soll alle Kommunikationsaufgaben integrieren und mit den Weltstandards Ethernet und WLAN kombiniert werden. Maximal fünf Leitungen würden dann ein sicheres und flexibel ausbaufähiges Bordnetz bilden, bedient durch fünf Steuergeräte für Fahrwerk, Antrieb, Infotainment, Komfort und Fahrerassistenz. Das Internet Protocol würde auch die Integration neuer Steuergeräte durch die Servicewerkstatt oder die Einbindung von Endgeräten mit Internetzugang erleichtern. [VDI 07d]

Internet Protocol
zieht unter der Mo-
torhaube ein

3 NEUE FAHRZEUGKONZEPTE

Besonders bei Automobilmessen treten sie ins Rampenlicht, Fahrzeugkonzepte, die in Zukunft Wirklichkeit werden könnten. Über die unter Umständen funktionslosen Einzelstücke können Designer und Strategen erste Reaktionen von Fachleuten, Journalisten und Publikum auf die automobilen Zukunft erfahren. Dabei geht es sowohl um noch höher technisierte und hochpreisige Fahrzeuge („High-Tech Autos“) als auch um kostengünstigere, einfacher ausgestattete Fahrzeuge („Low-Cost Autos“).

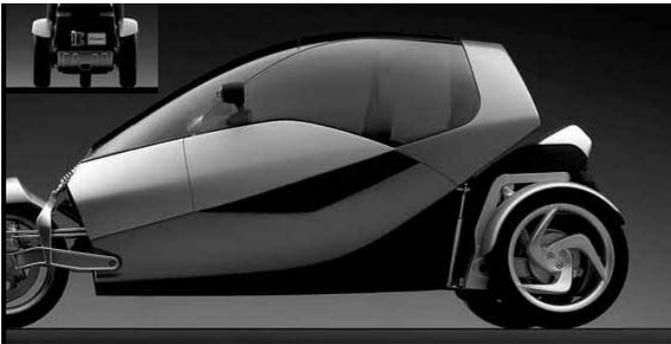


Abb. 23: Fahrzeugstudie „Clever“. Der Clever ist klein, leicht und sparsam – und doch kein reines Umweltfahrzeug. Um die Marktchancen zu erhöhen, haben die Entwickler sehr großen Wert auf das Design gelegt (Quelle: Innovate! 2/06)

3.1 High-Tech Autos

Aus heutiger Sicht werden neue Fahrzeugkonzepte in Zukunft auf den beiden Antrieben Verbrennungsmotor und Elektromotor bzw. einer Kombination aus beiden, dem Hybridantrieb basieren. Die Verbrennungsmotoren stellen nach über 100 Jahren Entwicklungsgeschichte eines der am weitesten optimierten Industrieprodukte dar. Dennoch sehen die Entwickler hier noch weiteres, teils erhebliches Verbesserungspotenzial. Während der Wirkungsgrad im Volllastbereich bereits sehr gut ist, fällt dieser im Teillastbereich – beim Ottomotor stärker als beim Diesel – stark ab. Der Elektromotor dagegen bringt bereits im Teillastbereich gute Wirkungsgrade. Gegenüber dem Verbrennungsmotor ist der Elektromotor jedoch bei weitem noch nicht für einen Dauereinsatz in einem marktfähigen Fahrzeug entwickelt. Mit der heute verfügbaren Batterietechnologie könnten theoretisch Reichweiten von bis zu 100 km erreicht werden. Dies würde lediglich für einen begrenzten Einsatzbereich wie z. B. Stadtbetrieb in Frage kommen. Zukünftig rechnet man damit, durch ganz neue Batteriekonzepte auf Reichweiten von bis zu 500 km zu kommen.

Verbrennungsmotor
wird kontinuierlich
besser

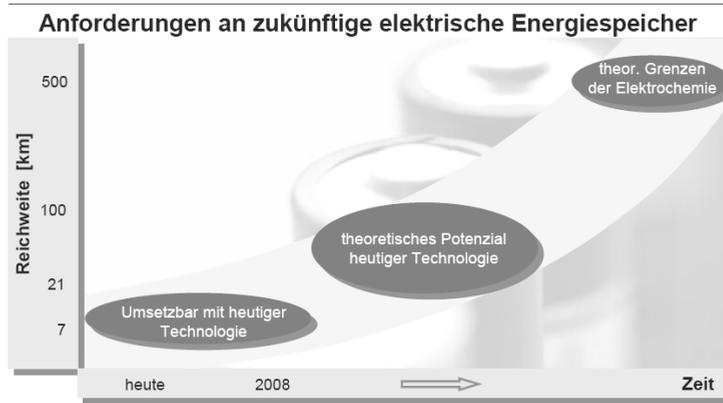


Abb. 24: Entwicklungspotential von zukünftigen Elektromotoren (Quelle: VW Konzernforschung)

Vor diesem Hintergrund arbeiten die Automobilhersteller an verschiedenen Konzeptstudien, um die Fahrzeuge hinsichtlich der Technik und der Kosten effizienter zu machen.

Ein vielfältiges Angebot kommt aus dem Bereich Hybridfahrzeuge. Nachdem Toyota mit dem Prius und Honda mit dem Civic IMA seit Jahren auf dem deutschen Markt vertreten sind, sind die Ambitionen der europäischen Hersteller nach anfänglichem Zögern groß, ebenfalls Hybridfahrzeuge zu präsentieren. Welches der Konzeptfahrzeuge den Kunden zuerst erreicht, wird sich frühestens ab 2009 zeigen.

Während für den einen ein Auto mit Hybridantrieb tatsächlich noch ein neues Konzept zu sein scheint, denken die anderen schon etwas weiter in die Zukunft. Opel respektive General Motors schaffen mit dem „E-Flex-System“ ein variables Antriebssystem für rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge, die an der Steckdose aufgeladen werden. Zu den verschiedenen Varianten gehört ein „Range Extender“, ein mitgeführter Dreizylinder-Benzinmotor mit einem Liter Hubraum, der mit konstanter Drehzahl die Batterien während der Fahrt wieder auflädt und die Reichweite erhöht. Maßgeblich ist das Batteriesystem selbst – General Motors setzt auf Lithium-Ionen-Batterien und hat den deutschen Zulieferer Continental Automotive Systems sowie Compact Power Inc. in den USA mit der Weiterentwicklung beauftragt. Außerdem arbeitet GM noch an einer Brennstoffzellenversion.

Ohne elektrischen Antrieb, mit einem Verbrennungsmotor mit nur 15 kW Leistung, geht die Loremo AG mit ihrem gleichnamigen Auto an den Start. Loremo steht für „low resistance mobile“, was den Antrieb mit geringer Leistung erklärt: Das Leergewicht ist auf unter 600 kg reduziert, der Luftwiderstandsbeiwert beträgt lediglich 0,2. Damit erreicht der Lo-

Hybridautos kommen nicht nur aus Japan

Elektro-Auto mit Range-Extender

Leichtes Auto, kleiner Motor

remo autobahn-taugliche 160 km/h, von null auf hundert kommt er in 16 Sekunden, also ebenso schnell wie ein Kleinwagen. Der Verbrauch des Zweizylinder-Turbodiesels wird mit weniger als 2 Liter/100 km spezifiziert. Fahrer und Beifahrer müssen über eine aufgeklappte Fronthaube einsteigen. Platz ist für zwei Erwachsene und auf zwei Sitzen entgegen der Fahrtrichtung für zwei Kinder oder auch Gepäck. Herzstück der Karosserie ist eine 95 Kilogramm schwere Schale aus Stahl. Die übrige Karosserie ist aus leichtem Kunststoff. Der Motorblock liegt hinter den Fahrersitzen, mit entsprechend gleichmäßiger Gewichtsverteilung. Ein fahr-fähiger Prototyp wird im Jahr 2008 fertiggestellt, der Endkundenpreis der ersten Kleinserie soll um 15 000 Euro liegen. [Lor 08]



Abb. 25: Das „Low Resistant Mobile“ mit geöffneter Fronttür und Heckklappe (Quelle: Loremo AG)

Volkswagen hat im Jahr 2007 gleich eine ganze Modellfamilie mit dem Titel „Up!“ vorgestellt. Die Grundform des Up! ist ein Auto für vier Personen mit nur 3,45 Meter Länge, also wesentlich kürzer als der Fox mit 3,83 Metern und der Polo mit 3,92 Metern. Wesentlich ist der Heckantrieb mit flach gebautem Motor, so dass sowohl vorn als auch hinten Stauraum geboten wird. Zusätzlich lassen sich die Sitze für die drei Mitfahrer ausbauen. Der Fahrer wird auf zwei Displays über alle Betriebszustände informiert.

Modellfamilie
VW „Up!“

Der viertürige VW „space up!“ erweitert die „New Small Family“. Mit 3,68 Metern Länge - immer noch kürzer als ein VW Fox - erreicht er als Einziger über 1000 Liter Ladevolumen. Der Beifahrersitz lässt sich auch entgegen der Fahrtrichtung drehen. Wie alle Sitze ist er sehr flach gebaut und kann sich über eine Luftpolsterung an seinen Besitzer anpassen. Möglich ist Benzin, Diesel- oder Elektromotorisierung. Letzteres ist in der Studie „space up! blue“ verwirklicht, bei der das Fahrzeug mit einem 45 kW starken Elektromotor in 13,7 s 100 km/h erreicht, bei einer Spitzengeschwindigkeit von 120 km/h. Gespeist wird der durch eine Lithium-Ionen-Batterie unter der Fondsitze, mit der allein etwa 100 km Reichweite möglich sein sollen. Eine Brennstoffzelle mit Wasserstoff-tanks an Bord erhöht die Reichweite auf etwa 300 Kilometer, zusätzlich kann die Batterie über ein Solarzellenmodul auf dem Dach und aus der

Modularer Volks-
Wagen

Steckdose geladen werden. Zelle und Tanks werden so untergebracht, dass das Raumangebot des „space up!“ unverändert bleibt. [Reu 07]



Abb. 26: Der „space! up“ von Volkswagen (Quelle: Volkswagen AG)

Die Toyota-Konzeptstudie „iQ“ zeigt das kleinste viersitzige Automobil der Welt. Es unterbietet mit einer Länge von 2,98 Metern den VW space up! und ist 28 Zentimeter länger als der Zweisitzer von Smart.

Die Reiselimousine F 700 von Mercedes ist ebenfalls ein Viersitzer mit drehbarem Beifahrersitz, bei dem sich die hinteren Türen gegenläufig öffnen. Der Mercedes kommt jedoch auf über fünf Meter Gesamtlänge. Der 1,8-Liter-Motor leistet 175 kW und liefert 400 Nm Drehmoment. Es handelt sich um einen „Diesotto“, einen doppelt aufgeladenen Vierzylinder, der sein Gemisch direkt einspritzt und sich der sogenannten "Raumzündverbrennung" bedient. Von 0 auf 100 km/h kommt der F700 in nur 7,5 Sekunden, bei einem Benzinverbrauch von nur 5,3 Litern und unter 130 g CO₂-Ausstoß auf 100 Kilometern.

Bei allen Konzepten werden neue Technologien genutzt. Beispiele dafür sind neue Werkstoffe wie Leichtbau- und Nanomaterialien, Mikrosystemtechnik sowie Optische Technologien.

Nanotechnologien beispielsweise können aufgrund ihrer Effekte und Funktionalitäten in fast allen Branchen und Technologien zum Einsatz kommen. Wegen des Querschnittscharakters sind Nanotechnologien besonders wichtig für viele Bereiche des Automobilbaus. Das drückt sich in der Leitinnovation „NanoMobil“ des Bundesministeriums für Bildung

Mercedes mit
„Diesotto“-Motor

Nanotechnologien im
Automobil

und Forschung aus. Hierbei werden in verschiedenen Aspekten Nanotechnologien für den Einsatz im Automobil untersucht. So wird zum Beispiel Kleben als Fügeverfahren besonders im Fahrzeugleichtbau immer häufiger eingesetzt. Jedoch können die Serienklebstoffe aus der Fabrik im Reparaturfall nicht eingesetzt werden und die Verbindungen lassen sich in der Werkstatt nicht ohne weiteres trennen. Eine zerstörungsfreie Inspektion der Klebung ist ebenso nicht möglich. Hier kommen nanoverfüllte Klebstoffe ins Spiel, die von außen elektromagnetisch angeregt werden können. Die Klebschicht erwärmt sich, was entweder zu ihrer Trennung oder zu einem beschleunigten Aushärten führt.

Die Anwendungsmöglichkeiten von Nanotechnologien sind breit gestreut: in der Brennstoffzellentechnik, der Wasserstoffspeicherung, einfach zu reinigenden Lack- und Glasoberflächen, Fahrzeugtextilien mit Farbwechsel, bei der Luftreinigung in Klimaanlage und Nanopartikel für Leichtlaufreifen. Die Palette der Möglichkeiten zeigt die nachfolgende Tabelle.

Anwendungen der Nanotechnologie im Automobil ■ Existierende Anwendungen □ Mögliche zukünftige Anwendungen

Anwendung	Funktionalitäten	Außenhaut Exterieur	Karosserie	Interieur	Fahrwerk und Reifen	Elektrik und Elektronik	Motor und Antrieb
							
Mechanische Funktionalität	Härte, Reibung, tribologische Eigenschaften, Bruchfestigkeit	Nanoklarlack Polymerverschleißigung	Nanostahl		Carbon Black in Reifen Nanostahl		Reibungsarme Aggregatkomponenten
Geometrische Effekte	Großes Oberflächen- zu Volumenverhältnis, Porengröße		Geckoeffekt	Nanofilter Geckoeffekt		Supercaps Brennstoffzelle	
Elektronische/ Magnetische Funktionalität	Größenabhängige elektrische und magnetische Eigenschaften		Kleben auf Kommando		Schaltbare Werkstoffe (Rheologie)	GMR-Sensoren Solarzellen	Piezoinjektoren
Optische Funktionalität	Farbe, Fluoreszenz, Transparenz	Ultradünne Schichten Elektrochrome Schichten		Antireflexbeschichtungen			
Chemische Funktionalität	Reaktivität, Selektivität, Oberflächeneigenschaften	Pflege- und Versiegelungssysteme	Umformung von hochfesten Stählen Korrosionsschutz	Schutz vor Verschmutzung Wohlgeruch im Innenraum			Katalysatoren Treibstoffzusätze

Abb. 27: Anwendungen der Nanotechnologie im Automobil (Quelle: Nanotechnologien im Automobil, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung)

Um einen wichtigen Einzelaspekt geht es hingegen beim Verbundprojekt „LiBaMobil“ - neue Lithium-Ionen-Batterien für Automobilanwendungen mit erhöhter Leistungsfähigkeit und Sicherheit durch Nanotechnologie. Der Schwachpunkt jedes Hybrid- oder Elektroautos ist derzeit die Energiespeicherung in den mitgeführten, wiederaufladbaren Batterien. Die Energie- und auch Leistungsdichte müsste signifikant erhöht werden, gleichzeitig dürfen Sicherheitsaspekte nicht vernachlässigt werden. Li-BaMobil hat beides im Fokus: eine verbesserte, sichere Keramik-

Bessere Batterien dank Nanotechnologie

Zusammenwirken verschiedener Fahrerassistenzkomponenten

Membran und eine hochkapazitive Anode aus Kohlenstoff-Nanosilizium-Kompositen.

Im Forschungsprojekt AUTOSAFE gehen Siemens, Infineon und Porsche die Fahrzeugsicherheit aus der gesamtheitlichen Perspektive an. Zwar gibt es eine Vielzahl einzelner Fahrerassistenzkomponenten, die zusammenwirken müssen, um drohende Unfälle bereits im Vorfeld zu erkennen und zu vermeiden oder deren Folgen zu reduzieren, doch es wurde bisher vergleichsweise wenig für die Erforschung von geeigneten Signalverarbeitungsplattformen und Chipsystemen getan. Hier besteht ein enormer Bedarf auf dem Gebiet der Erforschung leistungsfähiger Algorithmen sowie dafür geeigneter, skalierbarer und modularer Hardware- und Softwarearchitekturen.

3.2 Low-Cost Autos

Die Namensgebung „Low-Cost Autos“, manchmal auch Billigautos genannt, klingt weder hochwertig noch nach Innovationen. Doch für Billigautos sind nicht neue und innovative Funktionen maßgeblich, sondern erhebliche Kosteninnovationen, die ein wenig aus dem Blickfeld zu geraten scheinen: In den letzten 20 Jahren stieg der Preis für ein Neufahrzeug auf das Doppelte. Neben den heimischen Märkten mit finanzschwachen Kunden sind auch Schwellenländer wie Indien, Iran, Russland, Indonesien interessant und können mit Low-Cost Autos bedient werden.

Neuwagen ab
3000 Euro

Billigautos sind bei Preisen zwischen drei- und achttausend Euro anzusiedeln. Die Kosteninnovationen resultieren aus dem Einsatz von Leichtbau mit geringem Metallanteil, modularem Aufbau - sowohl mechanisch, als auch elektrisch - und vereinfachte Montage bei einer überschaubarer Zahl von Produktkonfigurationen. Auch bei der Ausstattung sind Unterschiede möglich: in Fahrzeugen für die Märkte der Schwellenländer können in Westeuropa gültige Minimalstandards wie Katalysator oder Airbag weggelassen werden. [Bic 07]

Die rumänischen Renault-Tochter Dacia hat in Europa mit der Limousine Logan ein erstes Billigauto auf den Markt gebracht, zu einem Nettopreis von 5000 Euro in Osteuropa und um 6000 Euro in Westeuropa. Eine andere Strategie verfolgen beispielsweise Volkswagen und Toyota, mit ihren Studien „Up“ und „iQ“ eher das preiswerte Kleinstwagensegment bedienen wollen. Renault-Nissan arbeitet an einem 3000-Euro-Modell, das allerdings unter anderem wegen der Abgasnormen den westeuropäischen Markt nicht erreichen wird. In China gilt derzeit eine Emissionsnorm entsprechend „Euro 3“, die in Indien Ende des Jahrzehnts eingeführt werden soll.



Abb. 28: Dacia Logan aus dem Renault-Konzern (Quelle: Renault)

Exemplarisch für das Billig-Auto-Konzept steht das Modell „Nano“ des indischen Konzerns Tata, der ab September 2008 in Serie gehen soll und zu einem Kaufpreis von umgerechnet 1750 Euro (ohne Steuern) zu haben ist. Der im Heck untergebrachte Zweizylinder-Benzinmotor mit 0,6 Liter Hubraum leistet 24 Kilowatt (33 PS) und soll weniger als 5 Liter Benzin auf 100 Kilometer verbrauchen und die Abgasnorm Euro 4 erfüllen. Als Viersitzer mit vier Türen ausgestattet, bietet er wesentlich mehr Komfort und Möglichkeiten als die in Indien gängigen Motorroller, verzichtet aber trotz Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h auf Airbags. Die Basisversion des Nano ist nur halb so teuer wie der bisher preiswerteste PKW in Indien, der Maruti 800, baugleich mit dem Suzuki Alto aus den 1980er Jahren. Ausgerüstet ist der Tata Nano mit Komponenten der deutschen Zulieferer Bosch und Continental. Bosch liefert – unter anderem über die indische Tochterfirma Mico – die Einspritztechnik, das Bremssystem und Teile der Autoelektrik, Continental die Benzinpumpe und den Füllstandssensor. [Doh 08]

Preisbrecher aus Indien: der Tata Nano

QUELLENVERZEICHNIS

- [Bar 07] Bartsch, Christian: „Auf den Fährten der Forscher - Ein Blick auf künftige Antriebe von Volkswagen“; in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 28.08.2007
- [BAS 02] „Ein glanzvoller Auftritt: das Smart-Dach“, BASF Presseinformation, Ludwigshafen 2002,
http://www2.basf.de/basf2/html/plastics/deutsch/pages/presse/02_360.htm
- [Bau 02] Baumeister, J: „Herstellung von metallischen Schäumen für Leichtbaukomponenten“, in: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf: Leichtbau mit metallischen Werkstoffen. VDI-Seminar 342803; 24.-25. April 2002
- [Bec 07] Becker, Helmut: „Ausgebremst - Wie die Autoindustrie Deutschland in die Krise fährt“ (Berlin 2007)
- [Bic 07] Bickerstaffe, Simon: “Price is right - Low-cost cars require low-cost components”; in: Automotive Engineer, July/August 2007 (London 2007)
- [Bis 07] Bischoff, Jürgen; Barthel, Holger; Eisele, Michael: „Automobilbau mit Zukunft - Konzept und Bausteine für Produktion und Logistik“ (Stuttgart 2007)
- [But 07] Butscher, Ralf: „Zylinder gegen Zelle - Wasserstoff soll künftig als umweltfreundlicher Sprit dienen“; in: Bild der Wissenschaft, Juni 2007
- [Cro 07a] Crosse, Jesse: „Look alive – Drowsiness is the deciding factor in many road accidents“; in: Automotive Engineer, November 2007 (London 2007)
- [Cro 07b] Crolley, Hannelore: „Dicke Luft um Regeln für CO₂-Emissionen“, in: Das Parlament, 17.12.2007
- [Dai 07a] N.N.: „Zeit für die blaue Stunde“, in: HighTechReport 2/2007; Daimler AG (Stuttgart), 2007
- [Dai 07b] N.N.: „Forschungsfahrzeug F700“, in: HighTechReport 2/2007; Daimler AG (Stuttgart), 2007
- [Dai 07c] N.N.: „Buslinie H₂ – B-Klasse F-Cell“, in: HighTechReport 2/2007; Daimler AG (Stuttgart), 2007
- [Dan 07] Dannenberg, Jan; Burgard, Jan: Innovationsmanagement in der Automobilindustrie; Oliver Wyman Automotive (München 2007) (http://www.oliverwyman.com/de/pdf_files/Car_Innovation_2015_deutsch.pdf)
- [Doh 08] Dohms, Heinz-Roger: „Das 2500-Dollar-Auto – made by Bosch“, in: Financial Times Deutschland online, 10.01.2008, <http://www.ftd.de/unternehmen/autoindustrie/301412.html>
- [Duy 04] Van Duysen, Jean-Claude et al.: „Energieversorgung von morgen: Vorausschauend die Zukunft gestalten“, in: Karlsruher Wirtschaftsspiegel 2004/2005
- [EAA 07] European Aluminium Association (EAA), „Vorwärts mit Aluminium – leicht, stark und gewinnbringend“, Brüssel, März 2007

- [EU 07] Council of the European Union: "Launching the European Global Navigation Satellite System Programmes"; Brüssel 4.12.2007 (16090/07), http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/documents/doc/council_conclusions_301107.pdf
- [ETH 05] de Haan, Peter; Peters, Anja: „Charakteristika und Beweggründe von Käufern des Toyota Prius 2“, Forschungsbericht, ETH Zurich, Institute for Human-Environment Systems, 2005
- [FhG 07] Fraunhofer Institut Chemische Technologie, Broschüre Faserverbundwerkstoffe, Pfinztal 2007, http://www.ict.fraunhofer.de/fhg/Images/faser_d_tcm137-89463.pdf
- [Fih 07] Fihn, Mark: "Automakers Are Keeping a Sharp Eye on Flexible Displays"; in: Photonics Spectra, February 2007 (Pittsfield MA, USA, 2007)
- [Gär 08] Gärtner, Markus: "Richter entscheiden über strengere Verbrauchsgrenzwerte", in: VDI nachrichten, 11.01.2008
- [Grü 07a] Grünweg, Tom: „Unter Spannung“, in SPIEGEL online, 09.01.2007, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,458526,00.html>
- [Grü 07b] Grünweg, Tom: „Umsonst im Sperrbezirk“, in: SPIEGEL online, 08.08.2007, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,494250,00.html>
- [Hal 08] Halbach, Andreas; Rohde, Christian: "Autofahrer in der Kostenfalle – Der Zwang zu Super Plus"; Fernsehbeitrag im Zweiten Deutschen Fernsehen, Frontal21; 29.01.2008; <http://frontal21.zdf.de/ZDFde/download/0,6753,7002506,00.pdf>
- [Hei 07] N.N.: „Neues Automotive-Betriebssystem aus Japan“, Heise Autos, August 2007, <http://www.heise.de/autos/artikel/s/4219/1>
- [Hön 08] Hönighaus, Reinhard: „Autobauer sollen mehr Zeit für Umweltziele bekommen“, 16.01.2008, <http://www.ftd.de/politik/europa/304014.html>
- [Hon 05] Honda Pressemitteilung: „Engine of the Year awards 2005: Erneut exzellentes Ergebnis für Honda“, 01.06.2005, http://www.honda.de/content/news/17506_39807.html
- [Hon 06] Honsig, Markus; Sascha Mattke: Volle Ladung - Hybridautos waren nur der Anfang; in: Technology Review (dt. Ausgabe) 10/2006 (Hannover 2006)
- [Hon 07] Honda Pressemitteilung: „Honda Debuts All-New FCX Clarity Advanced Fuel Cell Vehicle“, 14.11.2007, <http://world.honda.com/news/2007/4071114A1-New-FCX/>
- [Ina 07] Inacker, Michael; Bläske, Gerhard; Wettach, Silke: „Krieg ums Auto“; in: Wirtschaftswoche, 17.12.2007
- [Kür 07] Kürten, Ludwig: Kognitive Automobile - Was uns die Zukunft des Fahrens bringen wird; in: SciTechs – Magazin für Technologietransfer 2/2007 (Düsseldorf 2007)
- [Kut 07] Kuther, Thomas: „10 Jahre Serienproduktion von Hybridfahrzeugen“, 14.08.2007, <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/articles/90035/>

- [Kut 08] Kuther, Thomas: „Erste Fahrzeuge mit Plug-in-Hybridantrieb und Lithium-Ionen-Akkus bis 2010 geplant“, 17.01.2008, <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/articles/105505>
- [Lam 08] Lambrecht, Matthias: „Agassi startet Netz für Stromaautos“, Financial Times Deutschland; 23.01.2008; <http://www.ftd.de/unternehmen/industrie/306812.html>
- [Lan 07] Lange, E.: „Super-Stahl“ brint noch mehr Sicherheit ins Auto; in: VDI nachrichten, 5.10.2007 (Düsseldorf 2007)
- [Lem 05] Lemmen, Markus; Ford-Werke AG, Köln: „Moderne Lenksysteme und ihre Komponenten“; Tagung „fahrwerk.tech 2005“, Gaching 2005, http://www.tuevsued.de/uploads/Mimges/1134742625576506248587/06_lemmen_d.pdf.pdf
- [Lor 08] Webseite der Loremo AG, Januar 2008, <http://evolution.loremo.com/content/view/98/lang.de/>
- [MPG 07] Max-Planck-Gesellschaft, Presseinformation, September 2007, <http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/2007/pressemitteilung20070904/index.html>
- [Nie 01] Nieberding, Rolf-Günther: Die Kompressionszündung magerer Gemische als motorisches Brennverfahren, Dissertation, Siegen 2001
- [Nie 06] Niesing, Birgit: „Die neue Leichtigkeit“, in: Fraunhofer Magazin 1/2006
- [Reu 07] Reuss, Ingo: „Innen-groß-außen-klein“-Autos bieten sich Chancen; in: VDI nachrichten, 02.11.2007 (Düsseldorf 2007)
- [Ros 03] Roßbach, Rainer: BMW M3 CSL: Intelligenter Leichtbau und fahrdynamischer Purismus, 2003, <http://www.prova.de/archiv/2003/00-artikel/0031-m3-csl/index.shtml>
- [Rot 08] Rother, Franz: „Nur noch Super plus“; in: WirtschaftsWoche, 14.01.2008
- [Sah 06] Christian Sahr: „Die Multi-Material-Bauweise – Leichtbau versus Kosten“; Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen 2006, <http://www.ika.rwth-aachen.de/forschung/veroeffentlichung/2006/07-10/abstract-sahr.pdf>
- [Sam 07] Samulat, Gerhard: Pack den Bio in den Tank; in: Spektrum der Wissenschaft, Juni 2007 (Heidelberg 2007)
- [Sau 07] Sauer, D. U.: „Energiespeicher in Fahrzeugen“, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen, Vortrag 2007
- [Sch 06] Schäfer, Karsten: „VW entwickelt neue Brennstoffzelle“, in: Technology Review, November 2006
- [Sch 07] Schönherr, Maximilian: „Motoren-Entwickler unter Druck – Wie Autoindustrie und Forschung den CO₂-Ausstoß drücken wollen“; Deutschlandfunk, Wissenschaft im Brennpunkt, 09.09.2007 (<http://www.dradio.de/dlf/sendungen/wib/664587/>)
- [Sch 08a] Schönherr, Maximilian: „Roll, Reifen, roll! – Von der Hassliebe zwischen Reifen und Fahrbahn“; Hörfunkbeitrag im Südwestrundfunk, 07.01.2008; Manuskript:

- <http://www.swr.de/swr2/programm/sendungen/wissen/-/id=2837062/property=download/nid=660374/ck7sss/swr2-wissen-20080107.rtf>
- [Sch 08b] Schröder, Caterina: „Lanxess verringert Reifenabrieb durch neues Nano-Additiv“; 14.01.2008;
<http://www.all4engineers.com/index.php;do=show/site=a4e/Ing=de/id=7281/alloc=1/>
- [Sci 06] Service, Robert F.: “New ‘Supercapacitor’ Promises to Pack More Electrical Punch”, in: Science, vol. 313 (2006), p. 902
- [Set 07] Settele, Claude: „Bring mich nach Hause!“; in: NZZ Folio 10/07 (Zürich 2007)
- [She 04] Deutsche Shell Holding GmbH, Pressemitteilung: “V-Power Diesel als zweite Dieselqualität“, 04.06.2004,
http://www.shell.com/home/content/de-de/news_and_library/press_releases/archive/2004/v-power_diesel_launch_04062004.html
- [Spi 07a] „Akku-Explosionsgefahr wirft Toyota zurück“, in: Spiegel online, 09. August 2007,
<http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,499015,00.html>
- [Spi 08] „Autofahrer ab 2018 überflüssig“, in: Spiegel online, 07. Januar 2008, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,527135,00.html>
- [Sti 07] Stibor, Lothar; Yunpeng Zang: „Schutzengel 2010 – Fahrzeugkommunikation schafft Sicherheitsreserven“; in: c’t 19/2007 (Hannover 2007)
- [Tec 07] Honsel, Gregor: „Vorbild Treibsand“, in: Technology Review (dt. Ausgabe), Oktober 2007
- [VCD 06] Verkehrsclub Deutschland: „Vision Zero: von den Nachbarn lernen“; 2006; <http://www.vcd.org/visionzero.html>
- [VDA 06] Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA): Auto Jahresbericht 2006, ISSN 0171-4317, Frankfurt 2006
- [VDI 05] Kötz, R.; Dietrich, Ph.; Hahn, M.; Büchi, F., Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz: „Supercaps – Eigenschaften und Fahrzeuganwendungen“, VDI-Berichte Nr. 1874, 2005, S. 175 - 188
- [VDI 07a] Böhret, B.: „Mehr Biomasse in den Tank“, in: VDI-Nachrichten, 30.11.2007
- [VDI 07b] „Autofahrer in den USA finden Gefallen an Diesel-Pkw“, in: VDI-Nachrichten, 17.08.2007
- [VDI 07c] Weidelich, F.: „Autonetze werden vereinheitlicht“, in: VDI-Nachrichten, 07.09.2007
- [VDI 07d] Pester, Wolfgang: „Kabelbäume im Auto vor dem Abholzen“, in: VDI-Nachrichten, 16.11.2007
- [Wal 06] Wallentowitz, Henning; Schrüllkamp, Thomas: Fahrwerkentwicklungen am Institut für Kraftfahrwesen Aachen (<http://www.ika.rwth-aachen.de/forschung/veroeffentlichung/2006/10-09/vortrag-schruellkamp-5tdf-2006.pdf>, 2006)
- [Web 08] Weber, Thomas: „Leichte Entschärfung“, 18.01.2008;
<http://www.automobil-industrie.vogel.de/mixed/articles/105267/>

[Wei 04] Wieder, Marc; Metzner, André; Rammner, Stephan: „Das Brennstoffzellen-Rennen“, Discussion Paper SP III 2004-101, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (2004)

[Win 08] Winterhagen, Johannes: „Common-Rail-Systeme mit 3.000 bar in der Entwicklung“; 04.01.2008;
<http://www.all4engineers.com/index.php;do=show/site=a4e/lng=de/id=7244/alloc=1/>

Alle hier genannten Webadressen waren im Januar 2008 verfügbar. Webseiten, die zum Zeitpunkt des Aufrufs nicht mehr online sind, können häufig in diesem Internet-Archiv nachgelesen werden:

<http://www.archive.org/web/web.php>

Zukünftige Technologien Consulting

ist eine Beratungseinheit der VDI-Technologiezentrum GmbH in Düsseldorf.

Zukünftige Technologien Consulting (ZTC) berät Entscheider aus

- Politik / politischer Administration / Regionen
EU - Bund - Länder - etc.
- Industrieunternehmen
Großunternehmen - KMU - junge Unternehmen - etc.
- Verbänden / Vereinen / Organisationen
Industrieverbände - Forschungseinrichtungen - etc.
- Finanzdienstleister
Banken - Venture Capital Gesellschaften - etc.
- Versicherungen
Rückversicherer - etc.

in technologischen und gesellschaftlichen Zukunftsfragen.

ZTC deckt durch ein Team verschiedenster Fachdisziplinen ein breites Themen- und Methodenspektrum ab. Systematisch und mit Unterstützung eigener Softwareinstrumente werden kundenspezifisch strategische Themen identifiziert, Ideen entwickelt sowie praxisnahe Lösungen umgesetzt.

Beispiele für Beratungsdienstleistungen sind:

- Innovations- und Technologiemonitoring
- Technologiefrüherkennung
- Newsmonitoring
- Szenarien und Prospektionen
- Studien und Innovationsanalysen
- Prozessberatungen, Prozessmoderationen
- Innovations- und Technologiemanagement
- Themengenerierung

Weitere Informationen erhalten Sie unter www.zt-consulting.de

VDI

Technologiezentrum

Zukünftige Technologien Consulting (ZTC)
VDI Technologiezentrum GmbH
Graf-Recke-Straße 84
40239 Düsseldorf
Telefon: +49 (0) 211 62 14-5 72
Telefax: +49 (0) 211 62 14-1 39
Email: ztc@vdi.de

www.zt-consulting.de