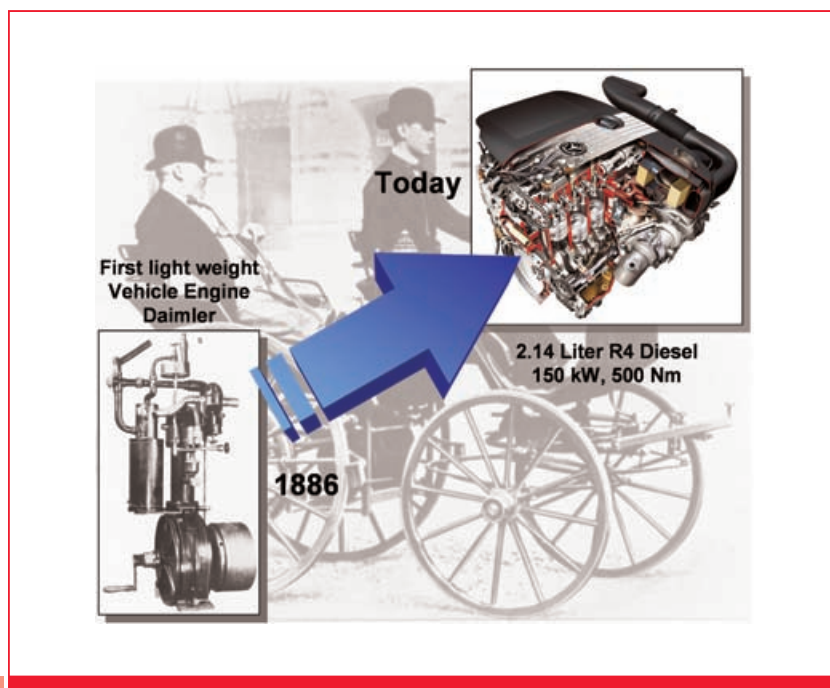


Fahrzeugantriebe heute und morgen

Brauchen wir noch 12-Zylindermotoren? Eine Antwort auf diese Frage könnte lauten: Wir haben sie noch nie gebraucht, sie waren schon immer reine Luxusgegenstände, also werden wir sie auch in Zukunft nicht brauchen. Eine andere, differenziertere Antwort könnte sein: Als Pkw-Antrieb haben wir sie noch nie gebraucht, für Nutzfahrzeuge benötigen wir sie nicht mehr, bei noch größeren Verbrennungsmotoren, z.B. für sehr große Baumaschinen, Stromerzeuger oder Schiffe werden sie weiterhin gebaut werden. In letzteren Großmotorenkategorien sind 12-Zylindermotoren noch nicht einmal die Obergrenze, selbst 20-Zylindermotoren können eine Notwendigkeit darstellen. Beide Antworten sind rein rational, der emotionale Aspekt der Motorisierung eines Fahrzeugs bleibt dabei unbeachtet. So kann es denn bei Pkws sein, weil wohlhabende Käufer auch in Zukunft daran Spaß haben, dass in kleinen Stückzahlen weiterhin vielzylindrige Motoren anzutreffen sein werden, sofern sie nicht schlicht verboten werden. Ein visionäres Zukunftsszenario könnte dann allerdings so aussehen, dass ein Elektrofahrzeug „auf Knopfdruck“ das Fahr- und Geräuschverhalten eines 12-Zylindermotors täuschend echt emuliert. Nichts Neues; dieses Szenario eines „intelligenten Automobils“ wurde vom Autor bereits vor zehn Jahren im Rahmen eines Workshops „Mobilität 2020“ formuliert. [1]

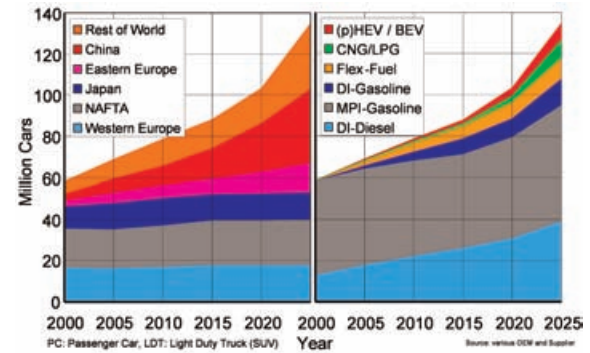


Diese ganz kurze Betrachtung soll zeigen, dass die Thematik vielschichtig und nicht nur rein rational ist. Emotionale Gesichtspunkte spielen eine nicht zu vernachlässigende Rolle und dies wird wohl auch in Zukunft so bleiben.

Bis vor wenigen Jahren war die Welt der Kraftfahrzeugantriebe allerdings noch recht einfach übersichtlich darstellbar (01). Am Beginn lagen Erfindung, Bau und Betrieb des ersten für einen Fahrzeugantrieb geeigneten Verbrennungsmotors von Gottlieb Daimler und Wilhelm Maybach im Jahre 1886. Auf dem Zeitstrahl bis heute hat sich dieser Motor völlig verändert, wenn man ihn mit einem aktuellen Dieselmotor vergleicht, der Dank intelligenter Hochtechnologielösungen nahezu keine Wünsche mehr unerfüllt lässt. Nur das Grundprinzip ist unverändert geblieben: die kontrollierte intermittierende Verbrennung in einem Brennraum dessen eine Wand – als Kolben – oszilliert und mittels eines Kurbeltriebs die im Brennraum erzeugte innere Arbeit in

FORECAST 2006					TRUE NUMBERS	
	2001	2002	2005	2008	2008	2009
1	11.5	12.4	12.0	12.1	11.6	13.8
2	9.8	10.3	10.8	10.8	9.3	7.9
3	5.7	5.5	5.8	7.7	8.7	5.7
4	3.6	3.7	5.7	5.6	6.0	5.2
5	2.8	3.3	3.7	4.8	3.8	3.5
6	2.7	3.1	3.5	3.5	2.6	3.2
7	2.3	2.7	2.8	2.9	2.5	2.6

Million Cars (PC and LDT)



02/03

ein nutzbares Drehmoment umformt. Dieser Zeitstrahl der letzten fast 130 Jahre spiegelt aber auch die Entwicklung unserer Gesellschaft und der globalen Weltwirtschaft wieder. Ohne die Erfindung des schnell laufenden, fahrzeugtauglichen Verbrennungsmotors hätte sich unsere Welt gänzlich anders entwickelt und u.a. würde dieser Beitrag sicherlich nicht geschrieben werden.

Warum suchen wir nun seit einigen Jahren so intensiv nach einer Alternative zu den Verbrennungsmotoren, die uns so viele Jahre so gut transportiert haben, uns auch immer noch teilweise viel Vergnügen bereiten und Dank intelligenter technischer Lösungen mit höchster Zuverlässigkeit glänzen?

Von der schieren Lust nach Veränderung einmal abgesehen, lassen sich drei wesentliche Treiber identifizieren: die Umweltbelastung, die kommende Ressourcenverknappung und – nicht zu vernachlässigen – der internationale Wettbewerb.

1. Internationaler Wettbewerb

Die Bedeutung des globalen Wettbewerbs wird anschaulich bei Betrachtung eines typischen „Forecast“ der sieben größten automobilproduzierenden Nationen (02). Hier ist der unaufhaltsame Aufstieg der chinesischen Volksrepublik zum weltweit größten Hersteller sehr gut sichtbar. Dem gezeigten „Blick in die Zukunft“ von 2006 können wir heute im Jahre 2010 bereits die tatsächlichen Produktionszahlen für 2008 und 2009 gegenüberstellen. Bereits 2009 hat China die Spitze erreicht (für 2010 prognostizieren manche Forecasts sogar 17 Millionen Stück) und die USA sind entgegen der Vorhersage sehr stark „abgestürzt“.

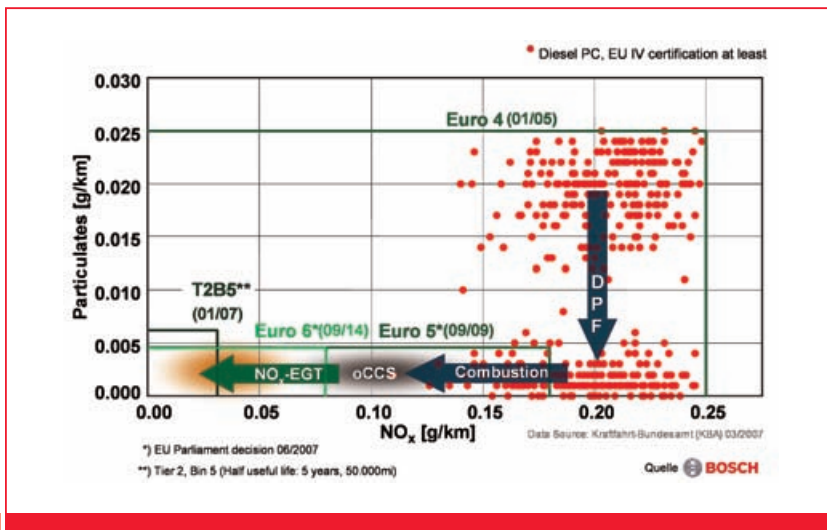
Links: Die sieben größten Automobil-Nationen (Pkw und Light Duty Truck (SUV) Produktion); (Quelle: OICA Statistics).

Rechts: Zunahme und Verteilung der weltweiten Pkw- und LDT-Produktion und ihre Antriebstechnologien; (Quelle: FKFS).

SUMMARY

Heutige Fahrzeugantriebe haben einen sehr hohen technischen Stand erreicht. Sowohl Otto- als auch Dieselmotoren können heute Dank ausgefeilter, intelligenter Regelung und Steuerung der innermotorischen Prozessabläufe und der Abgasnachbehandlung extrem niedrige Schadstoffemissionen erreichen. In den Emerging Markets besteht hier allerdings noch Nachholbedarf. Dies ist umso wesentlicher, als dort die großen Zuwachsraten in der Fahrzeugproduktion stattfinden. Die Elektrifizierung der Fahrzeugantriebe schreitet fort und Hybridantriebe werden zunächst in den etablierten Märkten wegen signifikant höherer Kosten zweistellige Prozentzahlen erreichen. In den Emerging Markets werden die absoluten Produktionszahlen zwar rasch steigen, im Verhältnis zu konventionellen Antrieben aber erst später höhere Prozentzahlen erreichen. Inwieweit rein batterieelektrische Antriebe mehr als eine dominierende Rolle für den rein innerstädtischen Verkehr erreichen können, hängt von der, hinsichtlich Speicherkapazität, Aufladbarkeit, Lebensdauer und Kosten, heute nicht beurteilbaren zukünftigen Batterieentwicklung ab. Die hohe Flexibilität der vielfältigen Hybridantriebslösungen hingegen wird langfristig zu großer Verbreitung führen, wobei die Komplexität nur mittels intelligenter technischer Lösungen beherrschbar sein wird. Hier besteht nach wie vor ein sehr großer, lang anhaltender Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Today's powertrain solutions have reached a very high level of technical perfectness. SI- and as well CI-engines are today able to emit extremely low concentrations of pollutants, thanks to high-sophisticated, intelligent algorithms and strategies for controlling the inner engine processes and the exhaust gas aftertreatment, respectively. But looking to the emerging markets there is still some backing demand. This is especially important because these markets generate the big growth rates in the production numbers of road cars. The electrification of powertrains makes continuous progress and hybrid electric vehicles (HEV) will first reach percentages in the two-digit range in the established markets due to significant higher cost levels. In the emerging markets we can foresee fast rising absolute numbers of HEV, but in relation to the gigantic increase of conventional powertrains produced it will take longer to reach higher percentages. The potential of battery electric vehicles (BEV) to cover more than a dominant role in pure urban transportation will depend on how batteries will develop in the future with respect to available capacity, chargeability, durability and costs. The high flexibility of the variety of hybrid powertrain solutions will guarantee in the long-run an immense distribution. The complexity of these powertrains can be handled only with intelligent technical solutions and control strategies. Therefore it will clearly continue with a tremendous, long lasting demand for research and development efforts on intelligent powertrains.



Entwicklung der Stickoxid- und Partikelemissionen bei Dieselmotoren.

Deutschland hat sich relativ gut gehalten im Unterschied zu Frankreich und Spanien, welche im Konzert der sieben Größten nicht mehr mitspielen.

Die nächste Darstellung veranschaulicht im linken Diagramm die in den Emerging Markets (vor allem China, Indien und Südamerika, aber auch Osteuropa) erwarteten Zuwächse bei gleichzeitiger Stagnation in den klassischen Märkten (03). Interessant ist dabei die zu erwartende Verteilung von Antriebstechnologien, dargestellt im rechten Diagramm. Dieselmotoren werden weiter zunehmen, vor allem in Westeuropa, aber auch zunehmend in USA wegen der niedrigen Kraftstoffverbräuche und des damit einhergehenden CO₂-Reduktionspotenzials, wobei eine zunehmende Beimischung von Biodiesel erfolgen wird. In den asiatischen Märkten ist bislang jedoch, trotz der großen Vorteile, noch immer keine Tendenz zum Dieselmotor erkennbar. Die größte Verbreitung werden auch weiterhin relativ einfache Ottomotoren mit kostengünstiger Saugrohreinspritzung (MPI) und 3-Wege-Katalysatoren haben. In den klassischen Märkten wird ihr Anteil abnehmen und es wird dem Benzin zunehmend Bioethanol zugefügt werden. Zukünftige Motoren werden geringere Zylinderzahlen aufweisen, Dank intelligenter Systemlösungen schärfste Abgasgrenzwerte erfüllen, mit Start/Stop-Systemen und teilweise mit Abgasturboladern zur Leistungsanpassung ausgerüstet sein. In den Emerging Markets hingegen werden aus Kostengründen „Einfach“-Ottomotoren dominieren, ohne Start/Stop oder Aufladung, aber mit im digitalen Steuergerät ab-

gelegten, ausgefeilten Steuerungs- und Regelungsalgorithmen. Diesen beiden größten Antriebstechnologiegruppen folgen die Ottomotoren mit Direkteinspritzung (zumeist wegen der teuren Abgasnachbehandlung nicht mit Schichtladung betrieben, aber mit Start/Stop und zunehmend mit Aufladung) vornehmlich in den klassischen Märkten, Flex-Fuel-Fahrzeuge (Ottomotoren, welche auch mit Ethanol in beliebiger Mischung mit Benzin betrieben werden können, wobei das Mischungsverhältnis durch entsprechende Sensorik automatisch erkannt wird) vornehmlich in USA, Südamerika und wenigen europäischen Ländern (z.B. Schweden), danach die CNG/LPG-Motoren (mit Erd- bzw. Autogas betriebene Ottomotoren) in verschiedenen Regionen der Welt, in denen eine ausreichend flächendeckende Versorgung mit dem jeweiligen Alternativkraftstoff existiert. Hybride und rein batterieelektrische Fahrzeuge werden sich bis 2025 auf eine jährliche Produktionszahl von stattlichen zehn Millionen Stück gesteigert haben, wobei es sich zum allergrößten Anteil um Hybride handeln wird. Die größten Anteile an der jeweiligen Produktion dürften in Japan, gefolgt von USA und Deutschland zu finden sein, wobei der Abstand zu Japan groß bleiben dürfte. Japan ist das prädestinierte „Hybrid-Land“, da urbaner Verkehr mit relativ niedrigen Geschwindigkeiten dominiert, Japaner begeistert sind von der komplizierten Technik und die Kaufkraft für Hybride vorhanden ist.

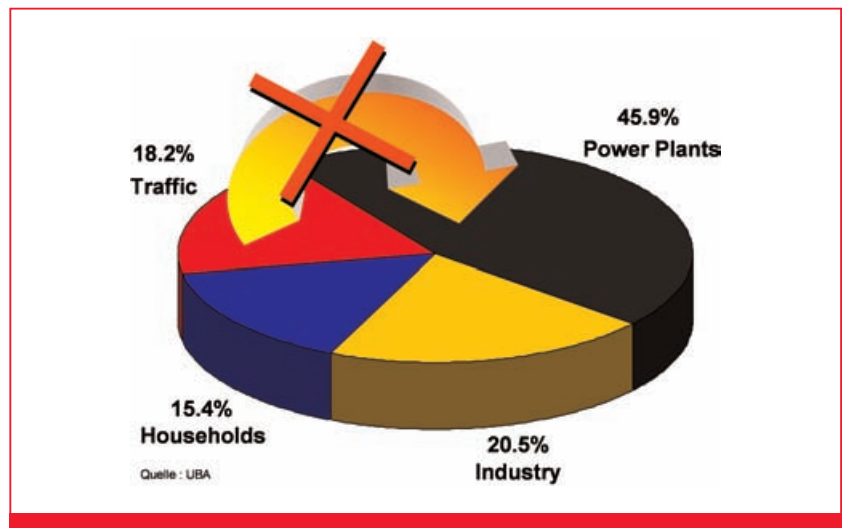
In den Emerging Markets ist in den nächsten 15 Jahren noch von Anteilen kleiner 10 Prozent an elektrifizierten Antriebssträngen (mit Ausnahme von Start/Stop-Systemen) auszugehen, da das Kosten-/Nutzen-Verhältnis zu ungünstig bleibt. Diese Aussage ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass die Anzahl der Kraftfahrzeuge in den Emerging Markets insgesamt sehr stark zunehmen wird und die Anteile von preisgünstigen, „bezahlbaren“ und „Kosten-/Nutzen-optimierten“ Fahrzeugen bis hin zu den Low-Prize-Vehicles, mit Anschaffungspreisen kleiner 5000 Euro, dominieren. Um die „Dimensionen“ anschaulich zu beschreiben: Wenn im Jahre 2025 in den Emerging Markets ca. fünf Millionen Hybrid- und Elektrofahrzeuge pro Jahr produziert werden (entsprechend 50 Prozent der gesamten weltweiten Produktion), dann entspricht dies zwar fast der gesamten Jahresproduktion an Fahrzeugen in Deutschland, aber weniger

als zehn Prozent der gesamten Fahrzeugproduktion in den Emerging Markets im Jahre 2025! Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Vorhersagen erwartungsgemäß schwierig sind, aber ein Trend dazu besteht, dass die Entwicklung in den Emerging Markets schneller verläuft als bislang erwartet wurde. Dies führt zu der Erkenntnis, dass die gesamte Antriebsforschung und -entwicklung in den klassischen Märkten ihre Systemgeschwindigkeit ebenfalls erhöhen muss, will sie den Anschluss nicht verlieren. Mit rasanter Geschwindigkeit entsteht in Asien ein riesiger Markt für aus unserer Sicht relativ einfache, preisgünstige Antriebstechnologien. Wir dürfen uns also auf gar keinen Fall nur auf die vermeintlichen „Hochtechnologien“ fokussieren. Es sind in viel größerer Stückzahl einfache, intelligente Lösungen gefragt.

„Einfach“ bezieht sich hierbei ausschließlich auf die „Hardware“ der Motoren. Die „Software“, d.h. die „Intelligenz“ der Steuerung und Regelung ist umso mehr gefordert, da mit nach unserem Verständnis „billiger“ Hardware z.B. die gleichen Abgasgrenzwerte zu erfüllen sein werden, wie in den etablierten Märkten. Vorteilhaft für den hiesigen Forschungs- und Entwicklungsmarkt wird sich auch auswirken, dass mit Sicherheit zukünftig eine größere Vielfalt von maßgeschneiderten Antriebslösungen nachgefragt werden wird. Wir dürfen uns also nicht nur einseitig auf alternative Antriebskonzepte konzentrieren, sondern müssen auch die vermeintlich „konventionellen“ Antriebslösungen mit höchster Intensität weiterentwickeln, sonst wird zukünftig die Musik nicht nur woanders gespielt, sondern auch komponiert.

2. Umweltbelastung

Bis vor wenigen Jahren galt der Dieselmotor als Umweltsünder Nr. 1 auf den Straßen dieser Welt. Dies nicht nur wegen der Partikel-, sondern auch wegen der höheren Stickoxidemissionen im Vergleich zu mit 3-Wege-Katalysatoren betriebenen Ottomotoren. Dank Partikelfiltern und DENOX-Katalysatoren (SCR oder LNT), kombiniert mit innermotorischen Emissionsreduzierungen und einer ausgefeilten, digitalen Regelungs- und Steuerungsstrategie, können heute strenge amerikanische Grenzwerte erfüllt werden (04) und auch schärfste, kalifornische SULEV-Grenzwerte sind für heutige Dieselmotoren erreichbar.



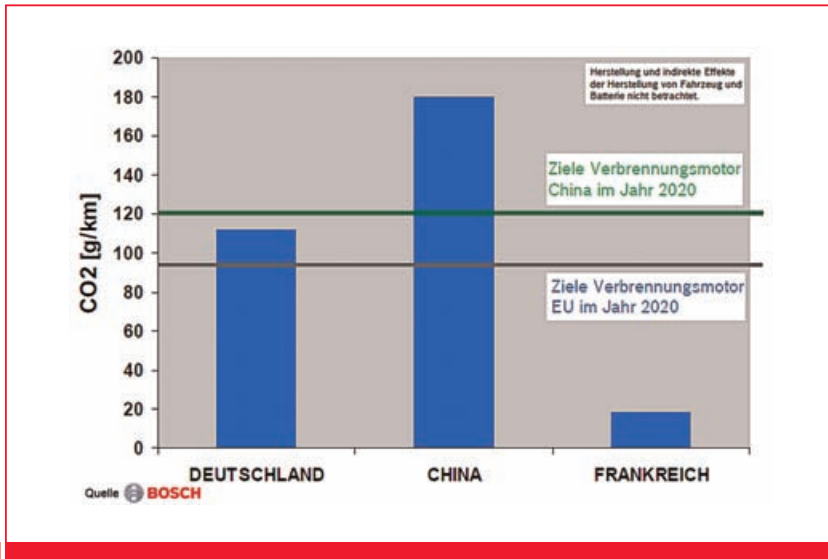
Verteilung der CO₂-Emissionen in Deutschland 2007.

Insbesondere hinsichtlich Steuerung und Regelung des motorischen Verhaltens mittels modellbasierter Algorithmen (Ladungswechsel, Gemischbildung und Verbrennung) ist ein sehr hoch entwickelter Stand erreicht (die Rechenleistung eines Dieselsteuergerätes entspricht ungefähr der eines modernen Hochleistungs-PC und die Bedienung der Regelungs- und Steuerungsalgorithmen erfordert ca. zwei Jahre Motorprüfstandslaufzeit), so dass auch der Nachweis der Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte über mehr als 100.000 Meilen gelingt.

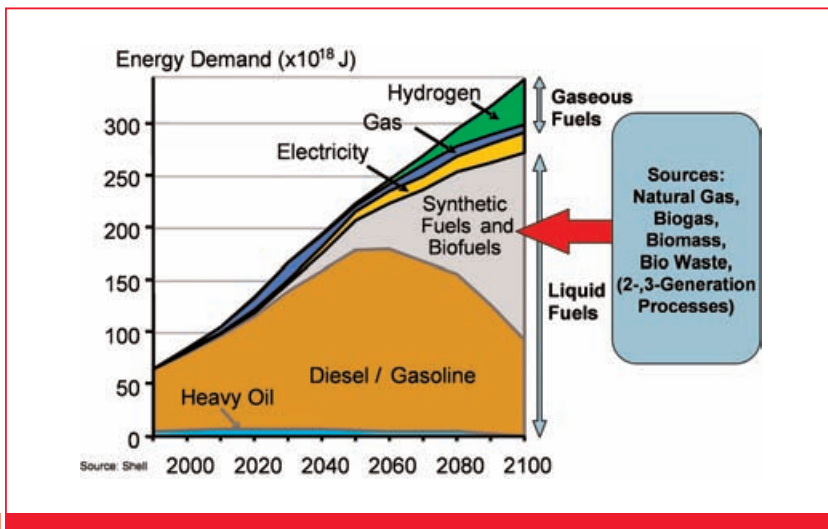
Ottomotoren halten die genannten Grenzwerte bereits seit Jahren ein. Mittlerweile nicht nur mit 3-Wege-Katalysatoren, sondern auch solche mit einer hochpräzisen, strahlgeführten Direkteinspritzung mit Piezo-Düsen, welche eine stabile und verbrauchsoptimale Schichtladeverbrennung zulassen.

Nur dort, wo zwingend Null-Emissionen erforderlich sind, müssen Verbrennungsmotoren passen. Dies betrifft aber nur noch die Phase des Kaltstarts, d.h. den Betrieb des Motors bis die jeweilige Abgasnachbehandlung ihre Betriebstemperatur erreicht hat (so genannte Light-Off-Temperatur). Ab da kann in Industriegebieten sogar das Paradoxon eintreten, dass die Luft gereinigt wird: Das heißt, die Schadstoffkonzentration in der Ansaugluft ist höher als die Konzentration im den Auspuff verlassenden Abgasstrom.

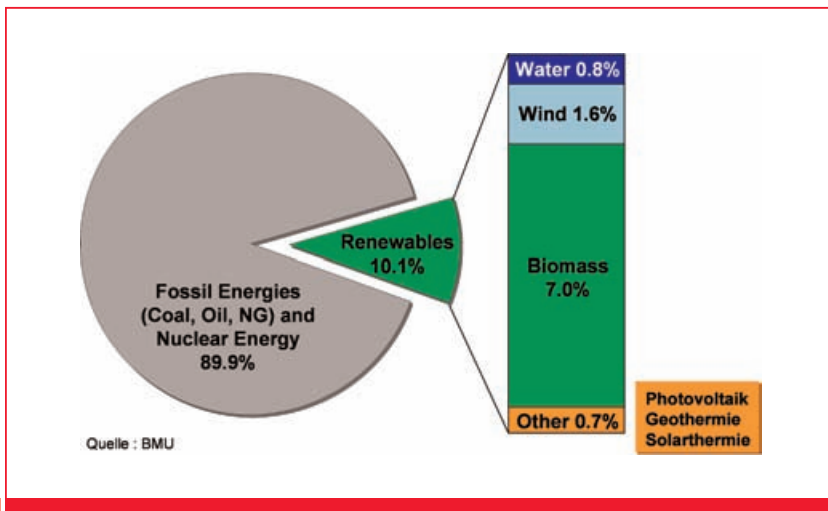
Zudem darf man nicht meinen, dass Elektrofahrzeuge völlig emissionsfrei wären. Zumindest Partikel werden im Fahrbetrieb emittiert. Die Quellen sind dabei der Rei-



CO₂-Emissionen BEV im Energiemix 2008.



Zukünftige Verfügbarkeit von Kraftstoffen.



Anteil Erneuerbarer Energien und Quellen in Deutschland 2009.

fen- und Bremsenabrieb. Auch sehr geringe Mengen an Kohlenwasserstoffen entstehen aus den zu schmierenden Funktionsteilen. Die Kombination eines Elektromotors für den innerstädtischen Betrieb und eines Verbrennungsmotors für den Ex-Urban-Bedarf wäre also ideal, wenn da nicht das den Verbrauch erhöhende Gewicht und die höheren Kosten wären.

Verbleibt, nachdem Verbrennungsmotoren so sauber geworden sind, dass ihr Betrieb praktisch keine Gesundheitsschädigung mehr hervorruft, als Umweltbelastung der Beitrag zur Erderwärmung durch die Methan- und CO₂-Emissionen. Erstere sind gegenüber den natürlichen Quellen praktisch vernachlässigbar und bei Zweiteren ist zu beachten, dass Klimagas im Unterschied zu eigentlichen Schadstoffemissionen nicht lokal, sondern global wirken. Das heißt der Emittent spielen keine Rolle. Ein Blick auf die Verteilung der CO₂-Emittenten in Deutschland (05) zeigt, dass die Kraftwerke den weitaus größten Anteil haben. Es wäre nun kontraproduktiv, wenn die CO₂-Emissionen nur auf die Kraftwerke verlagert würden, wie dies bei der Nutzung von elektrischem Netzstrom der Fall wäre. Vielmehr muss entweder der „Well to Wheel“-Wirkungsgrad verbessert oder regenerativ erzeugter Strom genutzt werden.

Bei Betrachtung des Mixes der Stromerzeugung in verschiedenen Beispielländern wird deutlich, dass die Stromerzeugung nach wie vor sehr stark auf Kohle basiert, mit der Konsequenz sehr hoher CO₂-Emissionen. Einzig Frankreich und die Schweiz weisen sehr viel günstigere Werte auf, da vorrangig CO₂-freie Nuklearenergie genutzt wird. Konsequenterweise erzielen batterieelektrische Fahrzeuge im Vergleich zu zukünftigen Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antrieb in Deutschland kaum CO₂-Vorteile (06). In China ist sogar eine sehr deutliche Verschlechterung zu konstatieren, nur in Frankreich sind Elektrofahrzeuge richtige „CO₂-Saubermänner“.

3. Ressourcenverfügbarkeit

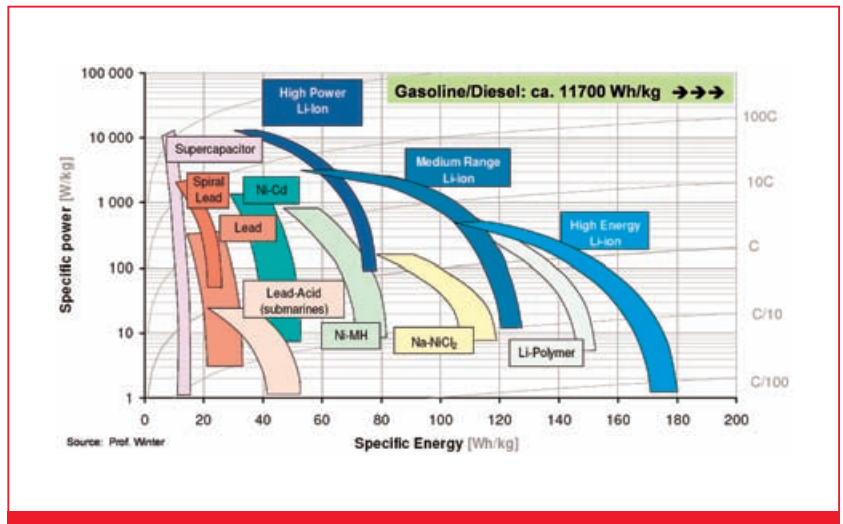
07 zeigt die Ergebnisse einer Studie von Shell zur Entwicklung der zukünftigen Kraftstoffverfügbarkeit. In dieser Studie wird der sogenannte „Oil-Peak“ zwischen 2050 und 2060 prognostiziert. Shell erwartet, dass die sinkende Erdölverfügbarkeit im Wesentli-

chen durch synthetische Kraftstoffe und Biokraftstoffe kompensiert wird. Die direkte Verwendung von elektrischer Energie und gasförmigen Kraftstoffen wird auch zukünftig eine eher untergeordnete Rolle spielen. Die Studie glaubt, dass eine Betankungsinfrastruktur geschaffen wird, welche eine direkte Verwendung von Wasserstoff im Verkehr ermöglicht. Hier hätten Brennstoffzellen, kombiniert mit Batterien und Elektromotoren, als mobiles Antriebssystem einen klaren Wirkungsgradvorteil gegenüber mit Wasserstoff betriebenen Ottomotoren, sofern die sehr viel höheren Kosten der Brennstoffzellenfahrzeuge reduziert werden können. Allerdings muss bei der Quantifizierung aller drei alternativen Zukunftsressourcen ein Fragezeichen hinsichtlich des tatsächlichen Eintretens gesetzt werden. Bei derartigen Vorhersagen spielen aktuelle Trends wie „Wasserstoffzeitalter“ und „Elektro-Hype“ erfahrungsgemäß bei realistischer Betrachtung des Zustandekommens eine viel zu große Rolle. Bleibt die Frage, ob synthetische Kraftstoffe und Biokraftstoffe die schwindenden Erdölressourcen kompensieren können?

Bevor wir versuchen auf diese Frage eine Antwort zu geben, sei noch vermerkt, dass aktuell weltweit nach wie vor ca. 50 Prozent des in den Raffinerien erzeugten Benzin, Kerosin und Diesel nicht für den Straßen- oder Luftverkehr verwendet wird, sondern zur stationären Stromerzeugung und auf der Schiene (besonders exzessiv in den USA mangels elektrifizierter Schienenwege) eingesetzt wird. Hier ist ein riesiges Substitutionspotenzial vorhanden, das einfacher, kostengünstiger und nachhaltiger erschlossen werden kann, als flüssige Kohlenwasserstoffe im Verkehr durch Alternativen zu ersetzen.

Synthetische Kraftstoffe – so genannte Designer-Fuels – werden aus Erdgas hergestellt. Dies ist überall dort sinnvoll, wo Erdgasvorkommen sind, aber keine Erdgaspipelines existieren. Biokraftstoffe – so genannte Sun-Fuels – werden aus Biogas, Biomasse und Bioabfällen gewonnen. Die größtenteils noch dominierenden Verfahren der ersten Generation sind wegen der Konkurrenz zur Nahrungserzeugung abzulehnen. Hingegen verwenden Verfahren der zweiten und dritten Generation keine essbaren Pflanzenteile, sondern Pflanzenreste und speziell für die Prozesse gezüchtete Pflanzen.

Heute entstammen 70 Prozent der regenerativ erzeugten Energien in Deutschland der



Leistungs- und Energiedichten verschiedener Batterietypen (Quelle: Prof. Winter).

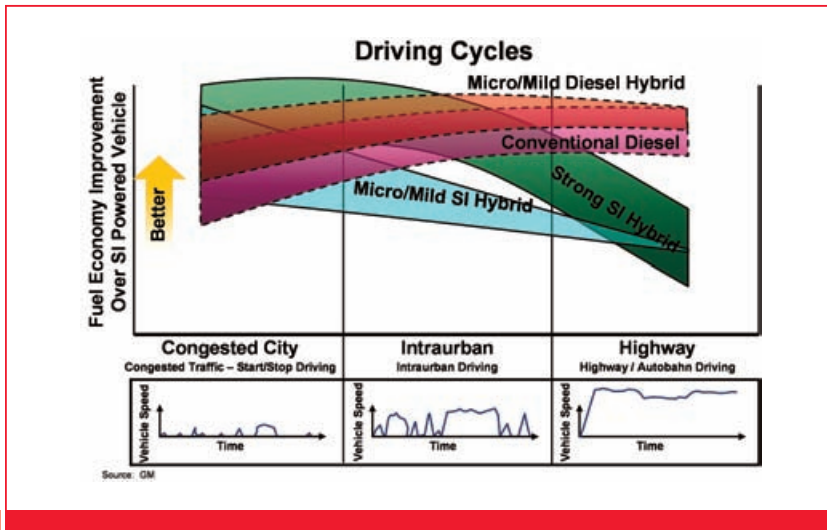
Biomasse in ihren verschiedenen Ausprägungen. Bei Betrachtung von **08** ist der addierte Anteil von Photovoltaik, Geo- und Solarthermie mit gerade mal 0,7 Prozent einigermaßen bescheiden. Ohne Biomasse sähe es schlecht aus um die Bilanz erneuerbarer Energien in Deutschland.

Vergegenwärtigt man sich nun, dass – mit Ausnahme von methanhaltigen Biogas – bei der Herstellung von Biokraftstoffen grundsätzlich ein eklatanter Wasserstoffmangel herrscht, weil die Biomasse selbst zu wenig Wasserstoff und zuviel regenerativen Kohlenstoff mitbringt, dann wird schnell klar, dass die Ausbeute aller dieser Prozesse dramatisch erhöht werden kann

	Kleinwagen als reine Stadtfahrzeuge	
	Kleinwagen, Niedrigpreissegment	
	Mittelklasse als "Universalfahrzeuge"	
	Familien Vans	
	Reisefahrzeuge (Mittel- und Oberklasse)	
	Transporter im reinen Verteilerverkehr	
	Transporter im Universaleinsatz	
	Sportwagen	
	SUV's (Light Duty Trucks)	
	Medium Duty Trucks	
	Heavy Duty Trucks	

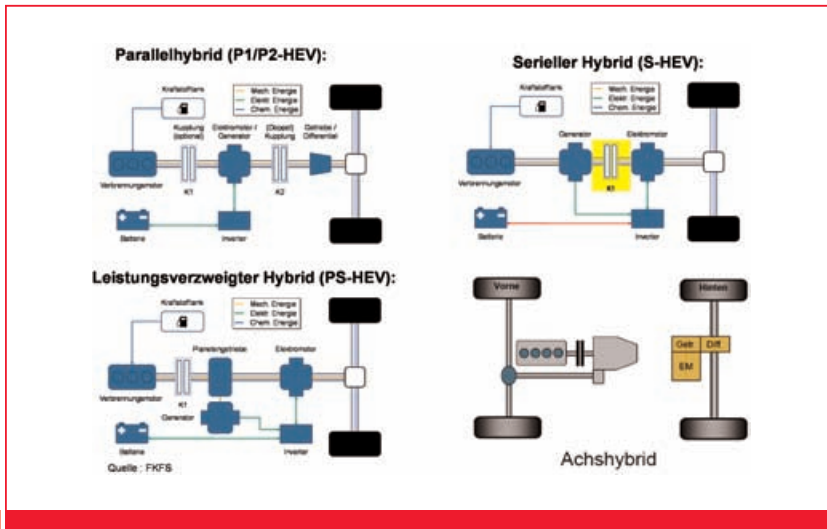
Quelle: FKFS

Substitutionspotenzial von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV).



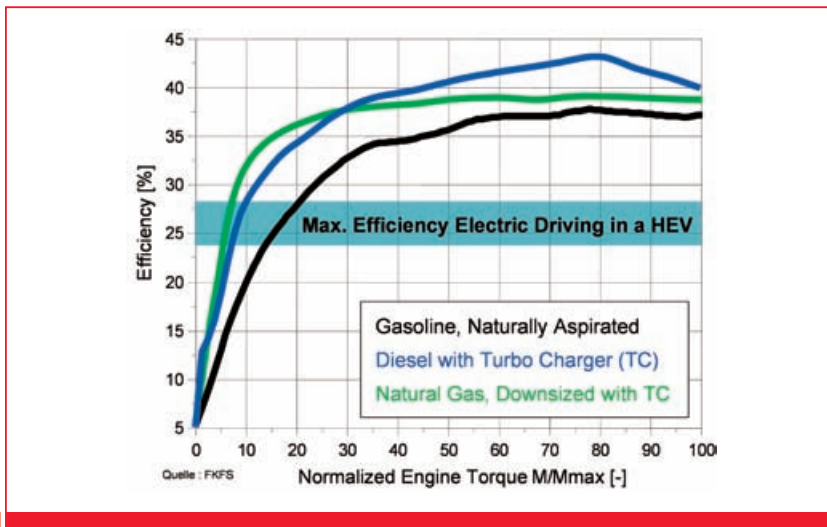
11

Wirkungsgradverbesserungspotenziale in Abhängigkeit des Fahrerprofils.



12

Verschiedene Hybridstrukturen [3].



13

Effektiver Wirkungsgradverlauf von Verbrennungsmotoren über der normierten Last [4].

(ca. verdoppelt), sofern mittels anderer regenerativer Quellen (z.B. Windenergie) erzeugter Wasserstoff zugeführt würde. Die wichtigste Feststellung überhaupt ist, dass wir auf dieser Erde keinen Mangel an regenerativem Kohlenstoff haben, um den Kraftstoffbedarf des Verkehrs zu decken, sondern einen Mangel an regenerativ erzeugtem Wasserstoff.

Unter diesen Aspekten erscheint es doch einigermaßen fraglich, ob direkt Wasserstoff tankende und mit Brennstoffzellen zur Energiewandlung (chemisch/elektrisch) ausgestattete Elektrofahrzeuge tatsächlich eine Option zur Massenmotorisierung sind. Eine Wirkungsgradbetrachtung von VW zeigt auch, dass der Wirkungsgrad nur etwa halb so hoch ist wie bei einem Elektrofahrzeug (BEV). Zudem können optimale Hybridantriebe vergleichbare Energieverbräuche erreichen, da sie je nach Auslegung signifikant leichter sind und damit Wirkungsgradnachteile kompensieren können.

4. Traktionsbatterien: die doppelte Herausforderung

Wenn wir aber wiederaufladbare und bezahlbare Traktionsbatterien zur Verfügung hätten, welche sowohl eine Energiespeicherdichte als auch eine Leistungsdichte, sowie Lebensdauer (kalendarisch sowie bezüglich Ladezyklen) hätten um eine Individualmobilität zu ermöglichen, wie wir sie heute gewohnt sind, dann bräuchten wir uns alle bisherigen Gedanken gar nicht zu machen. Wir würden problemlos auf batterieelektrische Fahrzeuge umschwenken und wären damit lokal einigermaßen Schadstoffemissionsfrei (Ausnahme: Partikel) und unabhängig von der zur Stromerzeugung verwendeten Primärenergiequelle.

Die besten verfügbaren Batterien erreichen jedoch gerade mal knapp zwei Prozent der gravimetrischen Energiespeicherdichte von Kohlenwasserstoffen wie Benzin, Diesel und Erdgas, wobei dies auch für Biokraftstoffe gilt (mit ganz leichten Einschränkungen bei Alkoholen, da erreichen Batterien ca. vier Prozent der entsprechenden Speicherdichte). Selbst unter Einbeziehung des besseren Wirkungsgrades von Elektrofahrzeugen und der Gegenrechnung von Mehrgewicht, aber möglicher Bremsrekuperation, ergeben sich nur maximal acht Prozent. **09** stellt verschiedene Batterietypen als Funktion von Leistungs- und Energiedichte gegenüber.

Zum Vergleich ist der Wert für Benzin und Diesel mit ca. 12 kWh/kg mit angegeben. Es scheint für die Lithium-Ionen Technologie eine Grenzlinie zu geben, von der noch offensichtlich niemand weiß, ob sie überwunden werden kann.

Und selbst wenn dies gelänge, dann tritt die nächste Herausforderung in den Vordergrund: die Wiederaufladedauer. Schon bei heutigen Batteriekapazitäten in BEVs oder pHEVs (entsprechend ca. 3 bis 4 Liter Benzin!) dauert das Laden solange, dass nicht von Aufladestellen – entsprechend heutiger Tankstellen – gesprochen werden kann, sondern es handelt sich mehr um Parkplätze mit Auflademöglichkeit. Man stelle sich dies bei Autobahntankstellen vor! Es wird immer gerne außer Acht gelassen, dass bei einer Pumpenleistung von 35 Liter/min, ca. 18 MW an „Energiefluss“ in den Tank eines Benzin- oder Dieselfahrzeugs fließen. Der mittlerweile genormte Ladestecker für Elektrofahrzeuge und Plug-In-Hybride erlaubt für Schnellladungen maximal 43.5 kW. Eine „Super-Batterie“ mit mehr als 100 kWh Kapazität benötigt dann immer mindestens drei Stunden Ladezeit, schon des Steckers wegen.

5. Substitutionspotenzial von BEV (Battery Electric Vehicle)

Es gibt noch eine Vielzahl von zu lösenden Herausforderungen, dazu gehören der Preis von Hochleistungsbatterien und das Reichweitenreduzierungsproblem durch Versorgung von elektrischen Nebenaggregaten, insbesondere der Heizung. Alles zu betrachten würde den Rahmen dieses Beitrages sprengen. Wagen wir trotzdem eine Prognose (10):

Bei Kleinwagen als reinen Stadtfahrzeugen sind BEV in der Zukunft gut vorstellbar, wenn das Kostenproblem gelöst wird. Gleiches gilt für Transporter im innerstädtischen Verteilerverkehr. Hier könnte auch der Batterietausch eine Option sein. Bei Sportwagen wird es davon abhängen, mit welcher Antriebsart der Kunde mehr Vergnügen empfindet.

Bei allen anderen Fahrzeugkategorien ist der Einsatz von BEV weder kurz- noch mittelfristig in Sicht und ob es überhaupt langfristig gelingen kann, hängt davon ab, ob die Physik das Erfinden der bezahlbaren „Super-Batterie“ mit ca. 2 Wh/g Speicherdichte auf Pack-Ebene überhaupt zulässt.

6. Hybride (HEV und pHEV): die nachhaltige Lösung?!

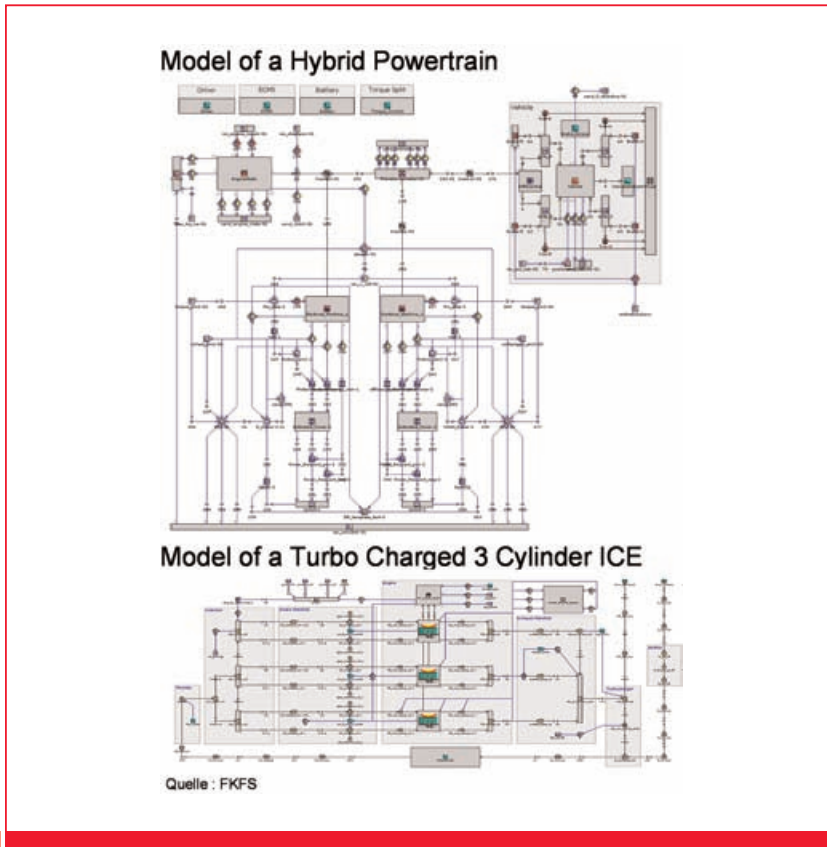
Der Hybridantrieb, d.h. die Kombination aus Verbrennungsmotor und Elektromotor, könnte also nicht nur die Rolle einer Übergangslösung einnehmen. Der Hybridantrieb hat vielmehr das Potenzial zu einer nachhaltigen Antriebslösung.

Jedoch sollte man sich nicht täuschen, auch Hybride (HEV) können keine Wunder vollbringen. Vielmehr sind je nach Anforderungsprofil unterschiedliche Hybridstrukturen energetisch oder emissionstechnisch optimal. 11 zeigt exemplarisch, dass der größte Wirkungsgradgewinn im Vergleich zu einem rein verbrennungsmotorischen Antrieb bei einem Betrieb entsteht, den man als „dynamisches Parken“ oder „Stop and Go“ bezeichnen kann. Schon bei innerstädtischem Betrieb hängt der erzielbare Gewinn von der „Flüssigkeit“ des Fahrbetriebs ab: je „flüssiger“, desto geringer der Gewinn. Außerstädtisch, insbesondere auf Autobahnen, kann sogar der Zustand eintreten, dass ein Mehrverbrauch entsteht, da die elektrischen Komponenten nicht genutzt werden können, aber das Zusatzgewicht zu transportieren ist. Das heißt letztlich, je nach vorrangigem Fahrbetrieb ist die eine oder andere Hybridarchitektur optimal.

12 zeigt Beispiele typischer Hybridarchitekturen. Jede dieser Architekturen hat ihre Berechtigung. Selbst ein serieller Hybrid, bei dem die vom Verbrennungsmotor erzeugte mechanische Arbeit ausschließlich zur Erzeugung elektrischer Energie dient und der Fahrzeugantrieb nur durch den (oder die) Elektromotoren erfolgt, hat seine Berechtigung, wenn mit dem Verbrennungsmotor nur ein Notbetrieb sichergestellt werden soll.

Bei den zurzeit in Entwicklung befindlichen sogenannten „Range Extendern“, bei denen der Verbrennungsmotor keinen Notbetrieb sicherstellen, sondern als Reichweitenverlängerer dienen soll, also einen realen und regelmäßigen Fahrbetrieb abdecken soll, erweist es sich bei näherer Betrachtung sehr schnell als sinnvoll zwischen Generator und E-Maschine (gelber Bereich im rechten oberen Teil von 12) eine Kupplung vorzusehen, wodurch der serielle Hybrid zu einer Sonderform des Parallel-Hybrids mit nur einer Kupplung wird.

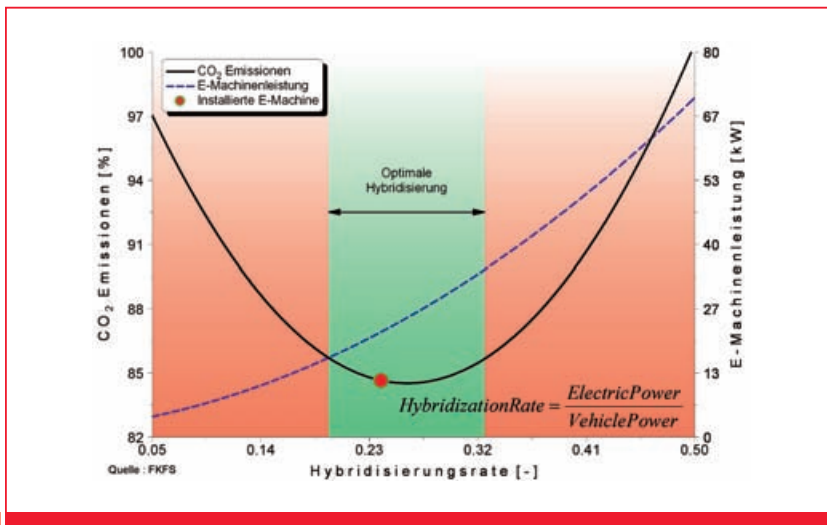
Dies wird deshalb vorgesehen, weil wie 13 für stationäre Zustände zeigt, der Wirkungs-



14

Simulationsmodell für eine leistungsverzweigte Hybridstruktur und einen aufgeladenen 3-Zylinder Verbrennungsmotor.

grad von Verbrennungsmotoren als Funktion der abgeforderten Last sehr steil ansteigt und damit schnell den durch die zu durchlaufende Wirkungsgradkette nach oben stark begrenzten Wirkungsgrad des elektrischen Fahrens übersteigt. Das heißt selbst ein Fahren mit relativ niedriger Geschwindigkeit von ca. 65 mph auf einem



15

CO₂-Emissionen im NEDC als Funktion des Hybridisierungsgrades [3].

amerikanischen Highway ist rein verbrennungsmotorisch verbrauchsgünstiger als elektrisch, wenn die elektrische Energie zuvor verbrennungsmotorisch erzeugt wurde.

Anders ist dies nur bei Plug-In-Hybriden (pHEV). Hier wird die elektrische Energie zunächst „aus der Steckdose“ bezogen. Solange diese „Füllung“ reicht, ist der Antriebswirkungsgrad jedem verbrennungsmotorischen Antrieb weit überlegen. Schwierig wird es allerdings einen realistischen, für das Fahrzeug charakteristischen Verbrauchswert anzugeben. Die derzeitige Lösung, bei der zweimal der Testzyklus mit voller Batterie (also rein elektrisch bei entsprechend ausgelegten pHEVs) und einmal mit leerer Batterie (d.h. rein verbrennungsmotorisch) zu durchfahren ist und der „zertifizierte“ Verbrauchswert (Liter oder g/km CO₂) dann der gedrittelte Wert der Summe aus den drei Fahrten ist, kann keinen Bestand haben, weil dies mit der Realität nichts zu tun hat. Auf jeden Fall ist die Auslegung von hybridisierten Antriebssträngen aufgrund der Vielfalt der Lösungsmöglichkeiten eine große Herausforderung und damit eine umfangreiche Forschungsaufgabe. Dies auch deshalb, weil derartige Betriebsstrategieauslegungen zunächst nur simulativ erfolgen können, ob der Vielfalt an möglichen Hardwarelösungen und deren Skalierung. Derartige Simulationen müssen streng modular aufgebaut sein, um einzelne Komponenten ohne erneutes Programmieren einfach austauschen zu können. Idealerweise stehen die Modelle verschiedener Einzelkomponenten (diverse Verbrennungsmotoren, E-Motoren, Generatoren, Batterien, Leistungselektroniken, Kupplungen, etc.) zur Verfügung, welche graphisch ausgewählt und zu einem kompletten Antriebsstrang verschaltet werden können. Nun wird eine, die gewünschte Betriebsstrategie beschreibende, Zielfunktion formuliert, ein Testzyklus ausgewählt und die Simulation berechnet nun, durch virtuelles, mehrfaches „Durchfahren“ des Testzyklus, die optimale Abstimmung der Parameter. Das heißt, eine Abstimmung auf minimale Emissionen wird ein anderes Ergebnis liefern, als eine Optimierung auf minimalen Verbrauch oder auf minimales Antriebsgeräusch.

14 zeigt beispielhaft ein Simulationsmodell einer leistungsverzweigten Hybridstruktur und das dazugehörige Modell eines aufgeladenen

denen 3-Zylindermotors wobei sowohl das Prozessgeschehen im Zylinder, als auch die Optimierungsstrategie eigene Entwicklungen sind. Mittels derartiger Simulationen lassen sich unter anderem auch Fragen nach der verbrauchsoptimalen Größe der E-Maschine als Funktion des Hybridisierungsgrades beantworten (15).

Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens mit den Firmen Opel und Bosch als Partnern, konnte mit einem Opel Astra, der optimal hybridisiert wurde, eine Halbierung der CO₂-Emissionen erreicht werden [5,6], womit trotz einem Fahrzeuggewicht von mehr als 1,6 Tonnen eine CO₂-Emission im Test von weniger als 90 g/km erzielt wurde.

Insgesamt sind die Entwicklungspotenziale der Verbrennungsmotoren noch lange nicht ausgeschöpft und der weltweit größte Automobilzulieferer Bosch schätzt das noch erschließbare Potenzial sowohl bei Otto- als auch Dieselmotoren auf 50 Prozent (16). Bei Verwendung ausschließlich biogener Kraftstoffe bedeutet dies sogar die Sicherstellung einer CO₂-neutralen Individualmobilität, wie wir sie heute gewohnt sind und sehr zu schätzen wissen.

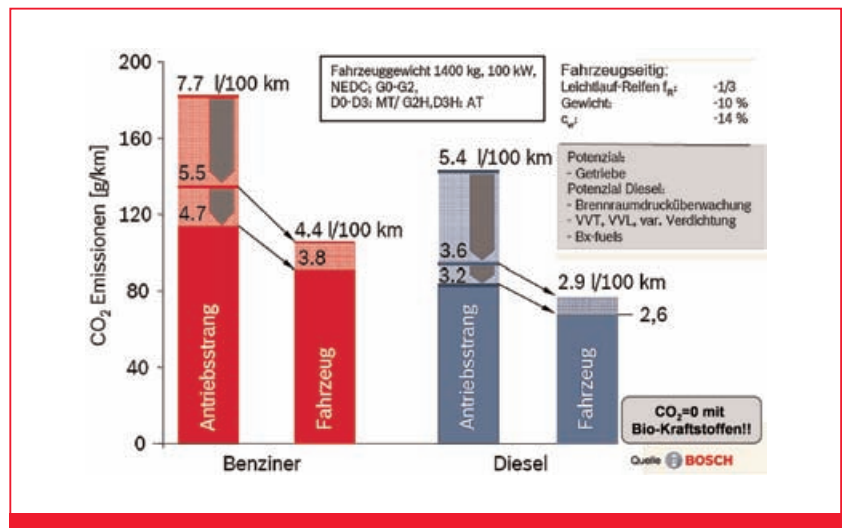
Allerdings wird die „Antriebslandschaft“ sehr viel differenzierter werden um für jede Aufgabe die jeweils richtige, passende und optimale Antriebslösung zur Verfügung zu stellen. Die Bandbreite wird dabei vom rein verbrennungsmotorischen über alle möglichen Ausprägungen der Hybride bis zum rein elektrischen Antrieb reichen.

Da es die Alternative der singulären und einfachen, für alles passenden Lösung nicht gibt, wird die Beherrschung dieser Vielfalt eine gigantische Zukunftsaufgabe darstellen und a) umfangreichen, lang anhaltenden und interdisziplinären Forschungsbedarf generieren, b) Beschäftigungssicherheit für die von uns ausgebildeten, hochqualifizierten Ingenieure garantieren, sowie c) den Hightech-Entwicklungs- und Produktionsstandort „Deutschland“ sichern helfen [7].

• Michael Bargende

Literatur

- [1] Bargende M., et al: Mobilität 2020 Baden-Württemberg, Szenarioworkshop des UVM-BW und der DaimlerChrysler AG, 2000
- [2] Bargende M.: Nikolaus Rudolf Diesotto, Engine of the Future. Some Remarks about Future Propulsion Systems with Special



Verbrauchsreduzierung bei zukünftigen Fahrzeugen.

Respect to Internal Combustion Engines. Seminarvortrag, The Ohio State University, Columbus, OH, USA, 2008

- [3] Boland D.: Wirkungsgradoptimaler Betrieb eines aufgeladenen 1,0 l Dreizylinder CNG Ottomotors innerhalb einer parallelen Hybridarchitektur, Dissertation Uni Stuttgart 2010
- [4] Bargende M.: Spark ignition or compression ignition? Which is the future?, Bosch Symposium 100 Jahre Zündung 2004
- [5] Boland D., Berner H-J., Bargende M.: Optimization of a CNG Driven SI Engine Within a Parallel Hybrid Power Train by Using EGR and an Oversized Turbocharger with Active-WG Control, SAE-Paper 2010-01-0820
- [6] Bargende M., Berner H-J.: A Downsized, Turbocharged Natural Gas SI Engine - Including Hybridization - For Minimized CO₂ Emissions, SAE-Paper 2005-24-026
- [7] Bargende M.: Über die Zukunft des Kraftfahrzeugs – Warum fahren wir (noch) nicht elektrisch, Landtagsausschuss für Energie und Umwelt Baden-Württemberg 2010

DER AUTOR

**PROF. DR.-ING. MICHAEL BARGENDE**

*ist seit 1998 Professor für Verbrennungsmotoren am IVK der Universität Stuttgart. In Personalunion ist er Mitglied des Vorstands der Stiftung „Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS)“. Er diplomierte in Maschinenbau an der Uni Stuttgart, nach einem Vordiplom in Luft- undRaumfahrttechnik. 1991 promovierte er berufsbe-
gleitend mit Auszeichnung zum Dr.-Ing. an der TU Darmstadt bei Prof. Hohenberg und der TU München bei Prof.
Woschni. Von 1982 bis 1998 arbeitete er in verschiedenen Positionen in der Motorenentwicklung der Daimler-Benz AG
und Mercedes-Benz AG in Stuttgart/Untertürkheim. Von 1996 bis 1998 nahm er in Nebentätigkeit einen Lehrauftrag an
der TU München wahr. Von Herbst 2007 bis Frühjahr 2008 verbrachte er auf Einladung von Prof. Giorgio Rizzoni ein
Half-Sabbatical als Visiting Professor am Center for Automotive Research (CAR) der Ohio State University (OSU),
Columbus, Ohio, USA.*

Kontakt

Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK)

Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 12, 70569 Stuttgart

Tel. 0711/685-65646, Fax 0711/685-65710, E-Mail: michael.bargende@ivk.uni-stuttgart.de, <http://www.ivk.uni-stuttgart.de/IVK>